



Efisiensi termal *water tube boiler* ditinjau dari pengaruh rasio udara bahan bakar dan level ketinggian air pada produksi *superheated steam*

SALSABILA*, ZUROHAINA, DAN TAHDID

Jurusan Teknik Energi, Fakultas Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya, Sumatera Selatan 30137, Indonesia

Kata kunci:

water tube boiler,
rasio udara bahan bakar,
level ketinggian air,
efisiensi termal

ABSTRAK: *Cross Section Double Drum Water Tube Boiler* merupakan sebuah bejana tertutup yang berfungsi untuk menghasilkan uap (steam). Boiler ini terdapat dua komponen utama penting yaitu ruang bakar yang berfungsi sebagai tempat pembakaran bahan bakar dan *steam drum* sebagai tempat terjadinya perubahan fase, Dimana air berubah menjadi uap. *Cross Section Double Drum Water Tube* merupakan tube yang tersusun melintang terhadap drum dengan kemiringan 65° dengan tujuan untuk memperluas area perpindahan panas. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh rasio udara bahan bakar (17, 19, 21, 23, 25) dan level ketinggian air (20%, 30%, 40%, 50%, 60%) terhadap efisiensi termal. Bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini yaitu bahan bakar gas LPG. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan Rasio udara bahan bakar yang optimal pada 23 dengan level ketinggian air 50% dan mendapatkan efisiensi termal sebesar 72,39% pada temperature 205 °C, tekanan 9,3 bar. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan bahwa rasio udara bahan bakar dan level ketinggian air sangat berpengaruh terhadap efisiensi pada *boiler*.

Keywords:

water tube boiler,
air fuel ratio,
water level level,
thermal efficiency

ABSTRACT: The *Cross Section Double Drum Water Tube Boiler* is a closed vessel designed to produce steam. This boiler has two main components: the combustion chamber, which serves as the place for fuel combustion, and the steam drum, where the phase change occurs, turning water into steam. The *Cross Section Double Drum Water Tube* is characterized by tubes arranged transversely to the drum with a 65° incline, aiming to expand the heat transfer area. This study was conducted to determine the effect of the air-to-fuel ratio (17, 19, 21, 23, 25) and water level (20%, 30%, 40%, 50%, 60%) on thermal efficiency. The fuel used in this study is LPG gas. From the results obtained, the optimal air-to-fuel ratio was found to be 23 with a water level of 50%, achieving a thermal efficiency of 72.39% at a temperature of 205°C and a pressure of 9.3 bar. Based on the research conducted, it was concluded that the air-to-fuel ratio and water level significantly affect the boiler's efficiency.

1 PENDAHULUAN

Dalam lingkungan industri kebutuhan uap atau steam sangat penting dan tidak dapat dipisahkan dari aktivitas atau proses produksi untuk mendapatkan sumber uap dan dapat memenuhi kebutuhan uap dalam kapasitas yang diinginkan. *Boiler* merupakan alat yang digunakan untuk memproduksi uap. prinsip kerja dari *Boiler* adalah terjadinya pembakaran dari bahan bakar sehingga akan menghasilkan panas. panas ini kemudian digunakan untuk memanaskan air dalam *Boiler* sehingga meningkatkan tekanan dalam *Boiler* dan menghasilkan steam. untuk mendapatkan kualitas steam yang baik maka dibutuhkan *Boiler* yang han-

dal. Keandalan peralatan *Boiler* sangat bergantung pada kemampuan sistem perpindahan panas, perpindahan massa dan sistem hidrodinamika yang terjadi. Sistem perpindahan massa pada peralatan *Boiler* terjadi ketika molekul air berubah fase dari liquid ke gas. perpindahan massa tersebut sangat tergantung dari sistem perpindahan panas yang terjadi antara panas di ruang bakar ke aliran fluida di dalam *Tube Saturated* dan *Tube Superheated*. Sistem perpindahan panas terbagi menjadi tiga bagian penting yaitu radiasi, konduksi dan konveksi. sistem perpindahan panas yang baik sangat bergantung pada sistem hidrodinamika yang ada di ruang bakar. sementara itu sistem hidrodinamika ini terdiri dari jenis *Boiler*, sistem geometrik yang melibatkan sistem *Tub-*

* Corresponding Author: salsabilasabil280202@gmail.com

ing yang terdapat didapat didalam ruang bakar yang bertujuan untuk menghasilkan panas konveksi sebanyak mungkin untuk mencapai efisiensi termal yang optimal.

Untuk mendapatkan sistem perpindahan panas yang baik yang bertujuan untuk menyerap panas sebanyak mungkin panas yang terdapat pada ruang bakar. maka dibutuhkan sistem *Tubing* yang tepat untuk disusun diruang bakar yang berfungsi untuk memperluas bidang area perpindahan panas. adapun sistem *tubing* pada ruang bakar *Boiler* yang digunakan adalah sistem *Longitudinal Tube* dan *Cross-Section Tube*. Menurut [1]. *Longitudinal Tube* berarti susunan pipa sejajar. Sedangkan *Cross Section Tube* berarti bahwa pipa tersusun secara melintang terhadap *Steam Drum* agar dapat memperluas area *Tube* sehingga luas area pada saat perpindahan panas di *Boiler* ini dapat menjadi lebih besar dengan menggunakan kemiringan 65° dengan tujuan agar pada saat proses perpindahan panas pada *Boiler* berlangsung dengan optimal dan dapat meningkatkan efisiensi termal pada *Boiler*.

Boiler dengan sistem *longitudinal* sebagai *superheated* untuk menghasilkan *superheated steam* dan system hanya terdiri dari satu buah drum yang berfungsi sebagai *Water Drum* dan *Steam Drum*. Menurut penelitian yang dilakukan tentang *Longitudinal Water Tube Boiler* masih banyak kekurangan. dimana salah satunya sistem *Longitudinal Tube* yang artinya *Tube* tersusun sejajar dengan *Steam Drum* sehingga mengakibatkan mempersempit area *Tube* dan memperkecil perpindahan panas [2]

Penelitian mengenai efisiensi *Boiler* tipe *Water Tube* dilakukan di PT. Toba Pulp Lestari, Tbk di Porsea, Sumatera Utara. Penelitian ini menggunakan bahan bakar campuran serat (fiber) sebanyak 50%, cangkang sawit sebanyak 20% dan kayu sebanyak 30%. Dari hasil Analisa yang dilakukan bahwa, semakin tinggi tekanan *superheater* mengakibatkan penurunan jumlah uap yang dihasilkan namun tidak signifikan. pada penelitian ini memiliki efisiensi pada *Boiler* sebesar 57% dengan nilai kalor pembakaran tinggi (HHV) adalah 18673,55 Kj/kg, nilai pembakaran rendah (LHV) adalah 17444,51 Kj/kg [3]

Kemudian penelitian tentang peluang penghematan energi pada sistem *Longitudinal Water Tube Boiler* yang menggunakan bahan bakar LPG menghasilkan sistem *Boiler* yang memiliki efisiensi termal sebesar 37,13%. Efisiensi termal yang dihasilkan tersebut masih terbilang kecil, terdapat beberapa hal yang menyebabkan kecilnya efisiensi termal pada *Boiler* tersebut, diantaranya kebutuhan udara excess yang cukup besar, besarnya panas

konduksi dan konveksi yang hilang. selain itu, perpindahan panas secara konveksi yang terjadi dari air pada *Water Tube* ke *Steam Drum* tidak merata karena konfigurasi *Water Tube* terhadap *Steam Drum* hanya tersambung pada salah satu sisi *Steam Drum* [4]

Dari penelitian [1] [2] [3] terdapat banyak kelemahan diantaranya, efisiensi termalnya rendah. Efisiensi termal yang rendah artinya membutuhkan biaya yang sangat tinggi (menggunakan bahan bakarnya banyak atau boros) disamping itu efisiensi yang rendah memberikan dampak negatif yang sangat besar terhadap lingkungan dan pemborosan energi. sehingga pada penelitian ini akan melakukan improvisasi *Boiler* yang akan menggunakan sistem *Double Drum* yang terdiri dari *Steam Drum* dan *Water Tube*. Dua buah *drum* dipasang dengan menggunakan sistem *Tubing Cross Section* dengan kemiringan 65° . Pada sistem ini dilakukan perubahan sistem pemompaan yang tahan tekanan balik. Selanjutnya yaitu sistem *Water Level Control* pada *drum* yang bertujuan untuk mengontrol air yang ada pada *drum* selama proses berlangsung. Variabel yang akan diamati adalah Rasio Udara Bahan Bakar dan Level Ketinggian Air terhadap *Steam Superheated* yang dihasilkan

2 ALAT, BAHAN DAN METODA

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu air, gas LPG dan udara. dimana air sebagai umpan boiler yang akan dipanaskan sehingga menghasilkan uap *saturated* dan *superheated*, gas LPG digunakan sebagai bahan bakar pada *furnace* dan udara yang didapat dari udara bebas yang di supply dengan menggunakan alat yaitu *compressor*. Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu seperangkat *Unit Boiler Cross Section Double Drum Water Tube Boiler* yang terdiri dari *Steam Drum*, *furnace* (Ruang Bakar), *Feed Water Drum*, *Water Tube*, *Super Heater Tube*, *Burner*, *safety valve*, *safety valve*, *Themperature Instrument*, *Pressure Instrument*, *Main Steam Valve*, *Blowdown Valve* dan terdapat alat pendukung lainnya yaitu *Compressor*, pompa, *thermoman*, dan *anemometer*. Penelitian yang dilakukan dengan menggunakan *Cross Section Double Drum Water Tube Boiler* yang masing-masing memiliki fungsi yakni sebagai *feed water drum* dan *steam drum* untuk pengolahan air umpan Boiler menjadi steam yang berkualitas *saturated* maupun *superheated* memiliki beberapa variabel-variabel yang diambil antara lain variabel tetap, variabel berubah dan variabel terikat. Variabel tetap yang digunakan yaitu air umpan 1,1 L/min, bahan bakar gas LPG 0,10 Kg/min dan aliran steam 1,1 L/min. Variabel berubah yang digunakan

yaitu rasio udara bahan bakar 17, 19, 21, 23, 25 dan level ketinggian Air 20, 30, 40, 50, 60%. Variabel terikat yang digunakan yaitu tekanan, temperatur, entalpi, temperatur flame dan warna api.

Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada maret-juni 2024 di Laboratorium Program Studi Teknik Energi Jurusan Teknik Kimia Politeknik Negeri Sriwijaya.

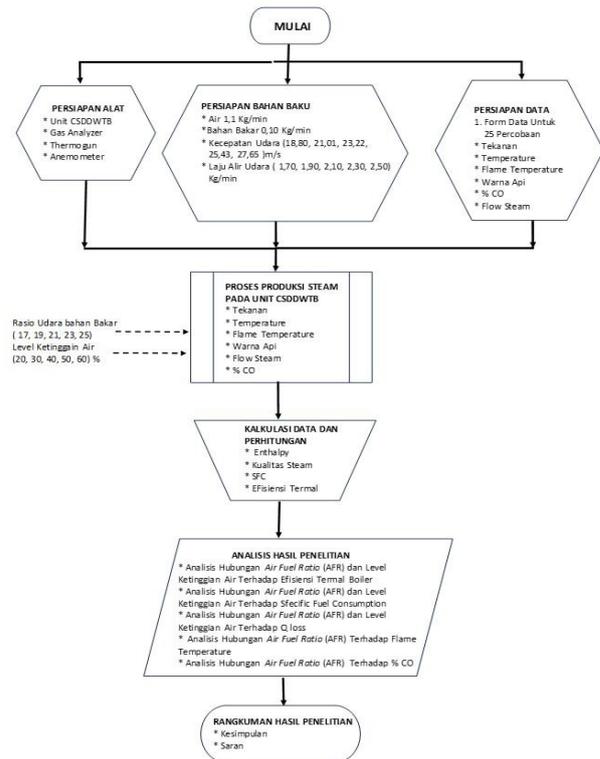
Perlakuan Penelitian

Pada perlakuan penelitian *Cross Section Double Drum Water Tube Boiler* dimulai dari persiapan alat berupa 1 unit *Cross Section Double Drum Water Tube Boiler* (CSDDWTB) as analyzer untuk menentukan komposisi *flue gas* (CO) dan laju alir udara, Thermogun untuk menentukan temperatur *flame*, Anemometer untuk mengukur kecepatan, Persiapan bahan baku berupa air, bahan bakar dan udara, persiapan Form data untuk percobaan (tekanan, temperatur, flame temperature, warna api, % CO, flow steam). jika sudah disiapkan semua dilanjutkan dengan running unit CSDDWTB Menggunakan rasio udara bahan bakar 17,19,21,23,25 dan level ketinggian 20%,30%,40%,50%,60% dengan 25 kali percobaan yang akan mendapatkan data berupa temperatur, tekanan, flame temperature, karakter nyala api dan %CO yang akan mendapatkan kalkulasi data berupa *enthalpy steam* dan efisiensi termal Boiler. Dari kalkulasi data akan mendapatkan 4 analisa metode grafik yaitu pengaruh rasio udara bahan bakar dan level ketinggian air terhadap efisiensi termal, pengaruh rasio udara bahan bakar dan level ketinggian air terhadap kehilangan panas (Q_{loss}), pengaruh rasio udara bahan bakar terhadap temperatur *flame*, pengaruh rasio udara terhadap konsentrasi %CO *flue gas*. Kemudian dari berbagai 4 metode grafik yang didapatkan maka dapat diambil kesimpulan dan saran dari penelitian yang telah dilakukan.

Untuk melihat lebih jelas penelitian dari CSDDWTB dapat dilihat dari Gambar 1.

Langkah Percobaan

Prosedur percobaan pada produksi steam dengan bahan bakar solar pada peralatan CSDDWTB. Penting dilakukan pemanasan/kontrol yang seksama terhadap semua peralatan pada boiler untuk memastikan bahwa semuanya berada dalam kondisi siap pakai sebelum dilakukan pemanasan.



Gambar 1 Perlakuan Penelitian Pada Alat CSDDWTB

Persiapan kelengkapan Boiler

- Menguji kebocoran
- Menguji kesiapan peralatan
- Menguji distribusi pada LPG
- Menguji saat penyalaan Boiler

Pengoperasian Boiler

- Pengisian air sebagai feed kedalam Boiler.
- Udara dari sirkulasi Bahan Bakar.
- Pembakaran.
- Langkah pengaturan pengoperasian.
 - Menyiapkan bahan bakar gas LPG dan kompressor
 - Melakukan pengaturan-pengaturan operasi perbedaan rasio udara bahan bakar dan level ketinggian air sesuai dengan yang yang telah ditentukan
 - Setelah proses pengisian feed water, udara dan pembakaran Boiler siap dioperasikan dalam keadaan non steady state.
 - Setelah pengoperasian Boiler dalam keadan non steady state dilanjutkan pengoperasian dalam kondisi steady state.

- o Pada saat pengoperasian berlangsung dilakukan pengambilan data dari awal proses pemanasan sampai memproduksi dengan rasio udara bahan bakar yang berbeda.
- o Pada saat pengoperasian steady state untuk mengambil data pada superheated steam
- o Jika kondisi operasi telah stabil maka lakukan pencatatan terhadap data-data yang diper-

lukan seperti tekanan, temperature dan flame temperature sesuai dengan matrik

3 HASIL

Data hasil penelitian yang telah dilakukan pada alat *Cross Section Double Drum Water Tube Boiler* dan hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Hasil Penelitian di Ruang Bakar

No	Ruang Bakar								
	Kec. Udara (m/s)	Flow Udara (L/min) (Kg/min)		Bahan Bakar Flow BB (L/min) (Kg/min)		RasioUdara /BB (AFR)	Temp. Flame (C)	CO (%)	Warna Api
1	18,80	1416,67	1,70			17	652,96	0,88	Kuning
2	21,01	1583,33	1,90			19	677,67	0,84	Kuning
3	23,22	1750,00	2,10	0,07	0,10	21	696,81	0,81	Kuning
4	25,43	1916,67	2,30			23	725,7	0,78	Kuning
5	27,65	2083,33	2,50			25	731,15	0,78	Biru
6	18,80	1416,67	1,70			17	603,32	0,81	Kuning
7	21,01	1583,33	1,90			19	700,76	0,79	Kuning
8	23,22	1750,00	2,10	0,07	0,10	21	720,94	0,77	Kuning
9	25,43	1916,67	2,30			23	745,88	0,75	Biru
10	27,65	2083,33	2,50			25	752,14	0,75	Biru
11	18,80	1416,67	1,70			17	737,06	0,77	Kuning
12	21,01	1583,33	1,90			19	754,23	0,74	Kuning
13	23,22	1750,00	2,10	0,07	0,10	21	769,66	0,71	Kuning
14	25,43	1916,67	2,30			23	781,72	0,7	Biru
15	27,65	2083,33	2,50			25	783,93	0,69	Biru
16	18,80	1416,67	1,70			17	742,63	0,72	Kuning
17	21,01	1583,33	1,90			19	757,94	0,67	Kuning
18	23,22	1750,00	2,10	0,07	0,10	21	773,95	0,63	Biru
19	25,43	1916,67	2,30			23	795,64	0,61	Biru
20	27,65	2083,33	2,50			25	798,66	0,61	Ungu
21	18,80	1416,67	1,70			17	747,97	0,71	Kuning
22	21,01	1583,33	1,90			19	763,98	0,67	Kuning
23	23,22	1750,00	2,10	0,07	0,10	21	776,74	0,64	Biru
24	25,43	1916,67	2,30			23	799,59	0,62	Biru
25	27,65	2083,33	2,50			25	800,75	0,62	Ungu

Tabel 2 Data hasil penelitian pada *Steam Drum*

No	Steam Drum				
	Level Ketinggain Air (%)	BFW		TI-01 (°C)	PI-01 (Bar)
		(L/min)	(kg/min)		
1	20	1,10	1,10	153,00	5,40
2		1,11	1,11	155,30	5,50
3		1,10	1,10	158,50	6,00
4		1,11	1,11	164,30	6,80
5		1,11	1,11	164,50	7,00
6	30	1,10	1,10	162,20	6,50
7		1,10	1,10	166,00	7,10
8		1,12	1,12	168,30	7,70
9		1,11	1,11	171,50	8,00
10		1,12	1,12	171,00	8,00
11	40	1,11	1,11	166,20	7,50
12		1,10	1,10	169,00	7,90
13		1,10	1,10	169,00	8,00
14		1,11	1,11	172,40	8,80
15		1,11	1,11	174,50	9,00
16	50	1,10	1,10	167,40	7,50
17		1,10	1,10	173,50	8,50
18		1,10	1,10	175,20	9,00
19		1,10	1,10	176,00	9,30
20		1,11	1,11	177,40	9,50
21	60	1,10	1,10	169,30	7,80
22		1,10	1,10	171,40	8,80
23		1,10	1,10	175,60	9,10
24		1,11	1,10	177,20	9,50
25		1,11	1,11	179,50	9,70

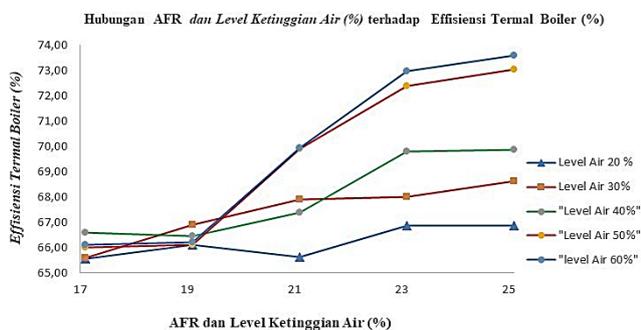
Tabel 3 Data perhitungan pada 25 kali percobaan

No	Steam Superheated					Efisiensi (%)	Panas Hilang (Q_{loss}) (%)
	TI-2 (°C)	PI-2 (Bar)	Flow Steam		hg (kj/kg)		
			(L/min)	(kg/min)			
1	182,00	5,40	2748,82	1,10	2814,37	65,55	34,45
2	182,30	5,50	2749,17	1,11	2814,41	66,13	33,87
3	186,00	6,00	2753,46	1,10	2819,60	65,64	34,36
4	191,30	6,80	2759,48	1,11	2846,77	66,86	33,14
5	193,50	7,00	2761,81	1,11	2847,60	66,87	33,13
6	186,20	6,50	2756,69	1,10	2816,98	65,61	34,39
7	194,00	7,10	2762,34	1,10	2873,15	66,91	33,09
8	197,30	7,70	2785,84	1,12	2865,25	67,91	32,09
9	198,50	8,00	2827,11	1,11	2896,31	68,03	31,97
10	198,00	8,00	2827,58	1,12	2897,15	68,64	31,36
11	196,20	7,50	2775,32	1,11	2833,87	66,60	33,40
12	197,00	7,90	2820,52	1,10	2853,41	66,45	33,55
13	198,00	8,00	2827,58	1,10	2895,15	67,40	32,60
14	202,40	8,80	2975,98	1,11	2972,54	69,82	30,18
15	203,50	9,00	2990,03	1,11	2975,33	69,87	30,13
16	196,40	7,50	2807,88	1,10	2834,33	66,02	33,98
17	201,20	8,50	2925,84	1,10	2839,75	66,13	33,87
18	203,00	9,00	2949,03	1,10	3002,16	69,89	30,11
19	205,00	9,30	3010,04	1,10	3109,87	72,39	27,61
20	205,40	9,50	3022,05	1,11	3110,90	73,05	26,95
21	199,30	7,80	2822,96	1,10	2839,28	66,13	33,87
22	203,40	8,80	2885,87	1,10	2843,21	66,21	33,79
23	204,60	9,30	2950,04	1,10	3003,87	69,93	30,07
24	207,20	9,50	3022,53	1,10	3135,00	72,97	27,03

4 PEMBAHASAN

Hubungan Rasio Udara Bahan Bakar dan Level Ketinggian Air Terhadap Efisiensi Termal Boiler

Pada **Gambar 1** terlihat bahwa efisiensi termal Boiler memberikan yang meningkat dengan naiknya AFR pada setiap level ketinggian fluida air akan tetapi kenaikan Efisiensi termal pada AFR 17 hingga 19 mengalami kenaikan yang sangat lambat pada angka 0,16 % dengan efisiensi termal sebesar 66,13% pada Air Fuel Ratio (AFR) 19. Menginjak pada AFR 23 kenaikan efisiensi termal meningkat tajam sebesar 8,64 % dengan efisiensi termal yang di capai hingga 72,39 %. sementara nilai AFR pada 25 efisiensi termal yang dicapai memperlihatkan hasil yang hampir sama dengan efisiensi termal pada AFR 23 yaitu 73,05. sehingga nilai Air Fuel Ratio (AFR) optimal terjadi pada nilai AFR 23. Hal ini juga terjadi pada di setiap Level Ketinggian Fluida Air dimana AFR yang dicapai Optimal pada AFR 23. Level Ketinggian Fluida Air optimal terjadi pada level ketinggian 50%, hal ini terlihat jelas pada **Gambar 1** bahwa pola yang terjadi antara level ketinggian 50% dan 60% sangat berimpit dengan efisiensi termal yang dicapai pada 72,39% dan 73,05%. Untuk melihat hubungan secara lebih rinci antara Hubungan Rasio Udara Bahan Bakar dan Level Ketinggian Air terhadap efisiensi termal Boiler dapat dilihat pada Gambar 1:



Gambar 1. Hubungan Air Fuel Ratio (AFR) dan Level Ketinggian Air terhadap Efisiensi Termal Boiler

Air Fuel Ratio (AFR) merupakan perbandingan massa udara dengan massa bahan bakar di suatu reaksi pembakaran. AFR juga dapat menggambarkan seberapa efisien pembakaran yang dicapai. Dimana nilai AFR yang tepat akan memberikan suatu proses pembakaran yang baik yang dapat memberikan panas reaksi yang optimal yang artinya panas reaksi yang optimal akan memberikan dampak pada proses pembakaran yang sempurna dan menghasilkan sedikit emisi. AFR dapat dihitung dengan rumus:

$$\text{Air Fuel Ratio (AFR)} = \frac{\text{massa udara}}{\text{massa bahan bakar}} \quad (1)$$

Untuk mencapai pembakaran yang optimal dan mengurangi emisi, penting untuk mencari rasio udara bahan bakar yang tepat sesuai dengan kebutuhan udara untuk membakar sejumlah bahan bakar. hal ini akan sangat berhubungan langsung dengan tingkat kinerja dari pada sistem pembangkit uap. Sehingga AFR merupakan salah satu parameter yang sangat penting pada sistem pembangkit uap dalam menentukan kualitas steam, efisiensi termal Boiler, efisiensi termal ruang bakar, kehilangan panas, serta Spesifik Fuel Consumption (SFC).

Dengan kata lain, rasio udara bahan bakar terkait langsung dengan jumlah udara yang tepat untuk dapat membakar sepenuhnya bahan bakar yang digunakan. jika terlalu banyak udara yang digunakan (udara berlebih), maka pembakaran menjadi tidak optimal karena dapat menurunkan suhu pada ruang bakar serta dapat meningkatkan terjadinya kehilangan panas. Sebaliknya, jika terlalu sedikit udara yang digunakan (udara kurang) pembakaran menjadi tidak sempurna dan dapat menurunkan efisiensi [6]. Rasio udara bahan bakar juga dapat mempengaruhi kualitas pembakaran. Pembakaran yang optimal dengan rasio udara bahan bakar yang tepat dapat menghasilkan pembakaran yang lebih bersih dan stabil, yang berkontribusi pada kinerja yang baik dan mengurangi pembentukan emisi seperti karbon monoksida (CO), Nitrogen Oksida (NO_x) dan partikulat.

Level ketinggian fluida air dalam Steam Drum merupakan tingkat ketinggian air yang ditentukan dari level dasar bagian bawah sampai ke batas permukaan air di dalam Steam Drum. Level ketinggian air akan berpengaruh pada luasnya permukaan air dan kapasitas volume ruang uap di dalam Steam Drum. sehingga level ketinggian fluida air akan sangat menentukan tingkat kecepatan penguapan dan jumlah molekul fluida air yang akan terkonversi menjadi uap di dalam Steam Drum.

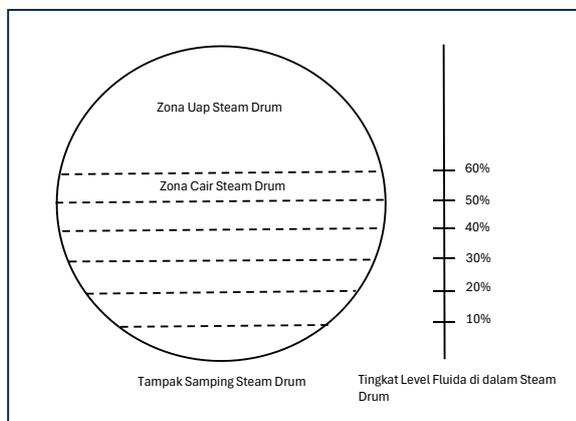
Penguapan adalah proses perubahan molekul di dalam keadaan cair sehingga menjadi uap. rata-rata molekul tidak memiliki energi yang cukup untuk lepas dari cairan. sehingga dibutuhkan panas yang cukup untuk fluida dapat berubah menjadi uap dengan kecepatan yang cepat. ketika molekul-molekul air yang mendapatkan panas akan mendapatkan energi sehingga air mendapatkan energi yang cukup untuk mencapai titik didih. Bila ini terjadi di dekat permukaan cairan molekul tersebut dapat "menguap" [7]

Kembali ke **Gambar 1**, hubungan AFR dan Level Ketinggian Air terhadap Efisiensi Termal Boiler bahwa pada AFR 17 hingga 19 mengalami kenaikan hanya 0,16%. Hal ini diakibatkan oleh jumlah udara yang tersedia pada AFR yang rendah dan mengakibatkan rendahnya suhu yang dicapai pada saat pembakaran bahan bakar di ruang bakar (*Furnace*), buruknya proses perpindahan panas maka akan mengakibatkan sejumlah panas yang terkandung pada bahan bakar tidak dapat ditransfer dengan baik menjadi panas yang dapat diserap oleh fluida cair di dalam *tube* yang dapat mempengaruhi tingkat efisiensi termal Boiler.

Perbaikan tingkat efisiensi termal Boiler yang terjadi pada AFR 19 hingga AFR 23 dengan efisiensi termal sebesar 72,39% diakibatkan oleh jumlah udara yang tersedia sangat cukup untuk membakar bahan bakar gas yang disuplay ke *Burner* di daerah ruang bakar, sehingga berkontribusi baik terhadap proses perpindahan panas yang terjadi antara *tube* dan fluida di dalam *tubing*.

Sedangkan pada AFR 25, efisiensi yang dicapai pada setiap level ketinggian fluida memberikan hasil yang sudah konstan. dengan kata lain kenaikan efisiensi hampir sama nilainya dengan efisiensi termal pada AFR 23. sehingga nilai AFR optimal terjadi pada nilai AFR 23 dengan efisiensi termal sebesar 72,39 %.

Untuk level ketinggian fluida air memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap efisiensi termal CSDDWTB pada level 30% hingga 50%. pada level ketinggian 50%, efisiensi termal yang dicapai hingga 72,39%. Pada level ketinggian 50%, luas area permukaan air lebih luas dibandingkan pada level ketinggian yang lainnya. Pada **Gambar 2** diperlihatkan bagaimana luas area yang terjadi pada bagian antarmuka permukaan air pada setiap level ketinggian fluida air yang digunakan sebagai variabel bebas pada penelitian ini.



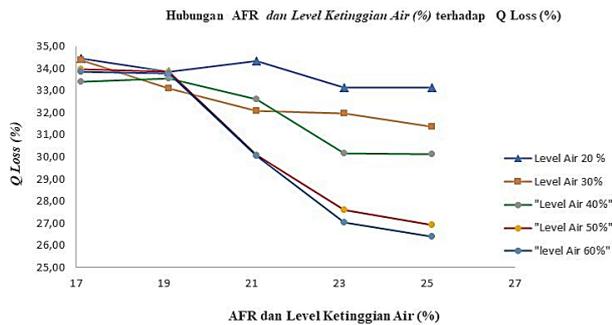
Gambar 2. luas antar muka molekul fluida cair di dalam *Steam Drum* pada setiap level ketinggian fluida.

Penguapan merupakan proses dimana molekul-molekul didalam permukaan cairan mendapatkan energi yang cukup untuk berubah menjadi uap. kecepatan penguapan sangat dipengaruhi oleh luas permukaan cairan. dimana, semakin besar luas permukaan maka semakin banyak molekul yang berpotensi untuk menguap. Luasnya permukaan cairan pada Level Ketinggian Fluida Air 50% memberikan dampak yang baik pada tingkat kecepatan penguapan dan jumlah molekul fluida air yang akan terkonversi menjadi uap di dalam *Steam Drum*. Pada Level Ketinggian Fluida Air 50% merupakan Level ketinggian Fluida Air yang optimal dengan pencapaian efisiensi termal 72,39%. Karena luas permukaan area pada level 50% lebih luas dibandingkan yang lainnya.

Sedangkan untuk Level Ketinggian Fluida Air 60% tidak memberikan kenaikan yang berarti terhadap efisiensi termal CSDDWTB. Pada Level Ketinggian Fluida Air 60% efisiensi termal yang dicapai sebesar 73,05% dan hampir mendekati efisiensi termal yang terjadi pada Level ketinggian Fluida Air sebesar 50%

Pengaruh Hubungan Air Fuel Ratio (AFR) dan Level Ketinggian Air terhadap Q loss (%)

AFR dan Level Ketinggian Fluida Air memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kehilangan (Q loss) dalam sistem pembakaran. Kehilangan panas dapat diakibatkan dengan beberapa hal antara lain kehilangan panas karena gas buang, kehilangan panas yang terjadi melalui dinding dan permukaan Boiler. Pada **Gambar 4.3** pada grafik hubungan AFR dan Level Ketinggian Air terhadap q loss. bahwa pada AFR 17 hingga 19 mengalami penurunan yang sangat sedikit pada angka 0,33 % dengan q loss 33,87 % pada AFR 19. sementara pada AFR 23 pada Level Ketinggian Fluida Air 50% menurun sangat cepat sebesar 12,66 % dengan q loss 27,61 % namun pada pada AFR 25 dan Level Ketinggian Fluida Air 60% mendapatkan q loss hampir sama seperti pada AFR 23 yaitu sebesar 26,95 %. jadi AFR 23 pada level 50% bisa diartikan sudah dalam keadaan yang optimal.



Gambar 3. Hubungan Air Fuel Ratio (AFR) dan Level Ketinggian Air terhadap Q loss (%)

q loss merupakan sejumlah energi panas yang tidak digunakan secara efektif untuk memanaskan air menjadi uap dan akhirnya hilang ke lingkungan sekitarnya atau tidak dikonversi menjadi energi yang bermanfaat.

AFR mengacu pada jumlah udara yang dibutuhkan untuk membakar sepenuhnya bahan bakar dalam proses pembakaran. AFR dapat mempengaruhi efisiensi pembakaran dan jumlah panas yang dihasilkan. AFR yang tepat dapat mengoptimalkan pembakaran dan mengurangi emisi gas buang. Jika AFR terlalu rendah, maka pembakaran tidak sempurna yang dapat meningkatkan q loss karena adanya sisa-sisa bahan bakar yang tidak terbakar. Dan sebaliknya jika AFR terlalu tinggi, maka proses pembakaran dapat menjadi tidak sempurna dan menyebabkan efisiensi yang rendah serta menyebabkan q loss.

Level ketinggian fluida air, terutama dalam sistem pemanas dapat mempengaruhi sistem pemanas. jika level ketinggian fluida air terlalu rendah maka dapat menyebabkan terjadinya overheating yang dapat menyebabkan kehilangan panas dan bahkan dapat menyebabkan kerusakan pada sistem. Sebaliknya, jika level ketinggian fluida air yang terlalu tinggi juga dapat mengganggu efisiensi pemanasan karena dapat mempengaruhi sirkulasi panas secara optimal [8].

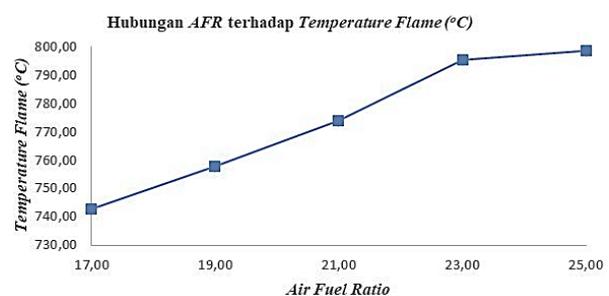
Pada **Gambar 3** pada grafik Hubungan AFR dan Level Ketinggian Air terhadap q loss bahwa pada AFR 17 hingga 19 mengalami penurunan yang sangat sedikit pada angka 0,19 % dengan k q loss 33,87 % pada AFR 19. sementara pada AFR 23 pada Level Ketinggian Fluida Air 50% menurun sangat cepat sebesar 17,39 % dengan q loss 27,61 % . Namun pada AFR 25 dan Level Ketinggian Fluida Air 60% mendapatkan q loss hampir sama seperti pada AFR 23 yaitu sebesar 26,95 %. jadi AFR 23 pada level 50% bisa diartikan sudah dalam keadaan yang optimal.

AFR dan Level Ketinggian fluida air yang tidak optimal dapat menyebabkan kebocoran atau kehilangan panas yang signifikan dalam sistem pemanas. Oleh karena itu, pengaturan yang tepat dari kedua faktor ini sangat penting untuk meminimalkan q loss dan meningkatkan efisiensi sistem. pengontrolan yang tepat terhadap kedua parameter ini tidak hanya memaksimalkan efisiensi termal tetapi juga memastikan operasi yang aman dan handal.

Pengaruh Rasio Udara/Bahan Bakar Terhadap Temperature Flame (°C)

Rasio udara bahan bakar terhadap temperature flame pada Boiler sangatlah penting untuk efisiensi dan operasi. Rasio udara bahan bakar yang optimal diperlukan untuk mencapai temperature flame yang tinggi serta efisiensi pembakaran yang baik **Gambar 4** hubungan antara Rasio Udara Bahan Bakar terhadap temperature flame terjadi peningkatan. Dimana pada grafik menunjukkan semakin tinggi nilai rasio udara bahan bakar maka temperature flame akan meningkat. dimana pada grafik menunjukkan pada AFR 17 temperature flame yang didapat sebesar 742,63°C. pada AFR 19 temperature flame yang didapat sebesar 757,94 °C, pada AFR 21 temperature flame yang didapat sebesar 773,95 °C, pada rasio/BB 23 temperature flame yang didapat 795,64 °C, pada AFR 25 temperature flame yang didapat 798,66 °.

Temperature Flame merupakan suhu yang dicapai oleh nyala api dalam ruang bakar pada saat bahan bakar dibakar dengan udara. Suhu ini sangat penting karena mempengaruhi efisiensi pembakaran, transfer panas dan emisi gas buang. Hubungan rasio udara bahan bakar terhadap temperature flame sangat penting untuk menghasilkan Boiler yang efisien dan ramah lingkungan. mengetahui rasio stoikiometri dengan tepat dapat memungkinkan pembakaran jadi lebih efisien, peningkatan efisiensi energi dan pengurangan emisi berbahaya. Dimana rasio stoikiometri merupakan rasio tepat dimana jumlah udara yang disuplai cukup untuk membakar semua bahan bakar tanpa sisa.



Gambar 4. Hubungan AFR terhadap Temperature Flame (°C)

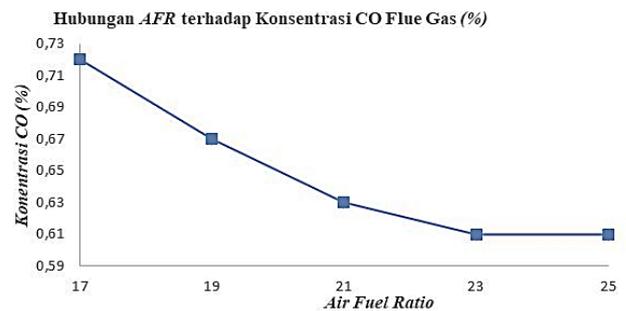
Pada **Gambar 4** AFR ke-4 *temperature flame* terjadi kenaikan, hal ini terjadi dikarenakan pembakaran didalam *furnace* menghasilkan energi kalor yang tinggi yaitu dengan *flame temperature* 795,65 dan pada AFR ke-5 mendapatkan *flame temperature* 798,65. Artinya *flame temperature* pada AFR 23 mengalami keadaan yang optimal dimana pada AFR 23 memiliki nilai yang hampir sama dan hanya mengalami kenaikan yang sangat kecil dibandingkan dengan AFR 25.

Pengaruh Air Fuel Ratio (AFR) Terhadap % CO

Hubungan antara AFR terhadap konsentrasi CO flue gas pada *Boiler* merupakan faktor yang sangat penting untuk mempengaruhi efisiensi pembakaran dan emisi. Dengan mengetahui udara stoikiometri digunakan untuk mensuplai udara yang tepat untuk membakar semua bahan bakar tanpa sisa. Karena ketika udara kurang dari rasio stoikiometri maka bahan bakar tidak terbakar sepenuhnya sehingga pembakaran menjadi tidak efisien serta meningkatkan konsentrasi CO.

Karbon Monoksida (CO) merupakan gas beracun yang didapatkan dari pembakaran bahan bakar yang tidak sempurna. Konsentrasi CO yang tinggi di lingkungan dapat memiliki berbagai dampak negatif. Diantaranya dampak Kesehatan manusia dan kualitas terhadap udara. Penyakit jantung merupakan salah satu dari banyak masalah Kesehatan yang dapat disebabkan oleh peningkatan kadar CO karena kemampuan untuk mendapatkan oksigen semakin berkurang. Sehingga jika kadar CO meningkat penyakit jantung, masyarakat yang menghirup CO dengan dosis yang tinggi dapat menyebabkan kematian dan jika menghirup CO secara terus menerus dapat membahayakan kesehatan jantung dan otak serta paru-paru bagi yang terpapar.[9]. CO yang tinggi juga memiliki dampak yang signifikan terhadap kualitas udara. salah satu polutan udara merupakan CO yang dihasilkan dari pembakaran tidak sempurna. Tingkat CO yang tinggi dapat menunjukkan adanya masalah pembakaran bahan bakar atau sumber emisi yang tidak terkendali.

Untuk mengurangi konsentrasi CO yang dihasilkan dapat dengan memastikan bahwa suplai udara pada pembakaran optimal agar mencapai pembakaran yang sempurna. Karena jika kekurangan udara dapat menyebabkan pembakaran menjadi tidak sempurna dan menghasilkan CO serta dengan menggunakan bahan bakar alternatif yang lebih bersih seperti gas lpg dapat memiliki potensi emisi CO yang dihasilkan lebih rendah.



Gambar 5. Hubungan Air Fuel Ratio (AFR) terhadap Konsentrasi CO (%)

Pada **Gambar 5** hubungan AFR terhadap konsentrasi CO dimana pada AFR 17 pada kondisi ini gas buang CO nya yang paling maksimum yaitu sebesar 0,72 % dan pada AFR 19 hingga 23 akan mengalami penurunan sangat cepat pada angka 15,27% dengan % CO sebesar 0,61%. Hal ini terjadi karena AFR 17 udara yang masuk kedalam ruang bakar masih kecil. Pada AFR 23 akan mengalami penurunan, dan pada AFR 25 sudah dalam keadaan optimal karena mendapatkan konsentrasi gas CO yang hampir sama dengan dengan AFR 23. Turunnya nilai konsentrasi CO dalam gas buang pada *Boiler* disebabkan oleh beberapa faktor yang mempengaruhi efisiensi pembakaran dan ketersediaan udara untuk reaksi pembakaran. Udara yang tepat merupakan faktor agar dapat menghasilkan emisi gas buang CO yang rendah ataupun kecil. karena konsentrasi CO yang rendah menunjukkan bahwa pembakaran bahan bakar terjadi secara lebih sempurna, mengubah karbon dalam bahan bakar menjadi karbon dioksida (CO₂) dari pada CO.

5 KESIMPULAN

Dari serangkaian penelitian yang dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa: Rasio udara bahan bakar yang digunakan yaitu: 17,19,21,23,25. Rasio yang paling optimal pada penelitian ini yaitu pada rasio udara bahan bakar 23 karena pada rasio tersebut udara yang disuplai cukup untuk membakar bahan bakar secara sempurna, karena jika kurangnya udara akan menyebabkan terjadinya pembakaran tidak sempurna dan akan menghasilkan CO. Level ketinggian fluida air merupakan level yang mengindikasikan volume air yang berisi didalam drum. Level yang digunakan pada penelitian ini yaitu: 20 %, 30%, 40%, 50% dan 60%. Level ketinggian fluida air yang optimal pada level ke-4 yaitu 50% karena pada level 50% memiliki luas permukaan yang besar sehingga dapat mempengaruhi kecepatan penguapan sehingga molekul fluida air menjadi uap. dimana penguapan merupakan proses

molekul-molekul permukaan cairan mendapatkan energi yang cukup untuk berubah menjadi fasa uap. Efisiensi pada *Cross Section Double Drum Water Tube Boiler* optimal pada level ketinggian 50% pada rasio udara bahan bakar ke 4 yaitu 23 dengan efisiensi 72,39% , *heat loss* 27,61 %, tekanan 9,3 bar dan temperature 205 °C

REFERENSI

- [1] Ningsih, A. S., Syakhdani, A., Rusnadi, I., Oktaviani, Y., Veronica, F., & Anisya, J. T. (2021). Efisiensi Termal Produksi Steam Ditinjau Dari Rasio Udara Bahan Bakar Solar Pada Cross Section Water Tube Boiler. *Jurnal Kinetika*, 12(01), 18–22.
<https://jurnal.polsri.ac.id/index.php/kimia/index>
- [2] Aswan, A., Sulsilowati, E., & Juriwon. (2017). [4] Analisis Energi Boiler Pipa Air Menggunakan Bahan Bakar Solar. *Jurnal Hasil Penelitian Dan Ulasan Ilmiah*, 8(2), 7–13.
- [3] Hasudungan Baringbing, M., & Nazaruddin Sinaga, I. (2023). Analisis Efisiensi Water Tube Boiler Menggunakan Metode Langsung di PT. Toba Pulp Lestari, Tbk PORSEA-Sumatera Utara. *Jurnal Teknik Mesin S-1*, 11(2), 49–68.
- [4] Rizki Pebriani (2017). Politeknik Negeri Sriwijaya Palembang 2017. Analisis Peluang Penghematan energi pada *Water Tube Boiler* Menggunakan Bahan Bakar LPG.
- [5] Grimaldi, C. N., & Millo, F. (2015). Internal Combustion Engine (ICE) Fundamentals . In *Handbook of Clean Energy Systems* (Vol.21).
<https://doi.org/10.1002/9781118991978.hces077>
- [6] Tahdid, T., Ridwan, K. ., 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.
<https://doi.org/10.46774/pptk.v5i1.414>
- [7] Aulia (2015). *Badan Pengembangan SDM Perhubungan Sekolah Tinggi Ilmu Pelayaran Skripsi Optimalisasi Perencanaan Cargo Heel Demi Menunjang Kelancaran Operasional Diatas Kapal LNG / C Tangguh Sagi Program Pendidikan Diploma IV*.
- [8] Putri, D. N., Yuliani, A., Fatria, Amin, J. M., & Tahdid. (2022). Efisiensi Termal Water Tube Boilerberbahan Bakar Gas Dan Solar Pada Produksi Saturated dan Superheated Steam berdasarkan Level Ketinggian Air Dalam Steam Drum. *Distilasi*, 7 No. 1(1), 1–7.
- [9] Lestari, A., Situmorang, V. T., Tahdid, T., Ridwan, K. ., & Manggala, A. (2021). Analisa Efisiensi Termal Water Tube Boiler Berdasarkan Rasio Udara Bahan Bakar LPG Untuk Memproduksi Saturated dan Superheated Steam. *Jurnal pendidikan Dan Teknologi Indonesia*, 1(10), 415–421. [tps://doi.org/10.52436/1.jpti.105](https://doi.org/10.52436/1.jpti.105).
- [10] Rizaldi, M. A., Azizah, R., Latif, M. T., Sulistyorini, L., & Salindra, B. P. (2022). Literature Review: Dampak Paparan Gas Karbon Monoksida Terhadap Kesehatan Masyarakat yang Rentan dan Berisiko Tinggi. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 21(3), 253–265.
<https://doi.org/10.14710/jkli.21.3.253-265>