

Efisiensi Termal Cross Section Double Drum Water Tube Boiler Pengaruh Rasio Udara Bahan Bakar Solar Berbasis Water Level Control (AM61-F) pada Produksi Saturated Steam Proses Kontinyu

^{1)*Tiesyah Mainur Aini, ^{2)*Tahdid, ^{3)Isnandar Yunanto, ^{4)Erlinawati}}}}

^{(1,2,3,4)Program Studi Teknik Energi/Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya}

Jl. Srijaya Negara Bukit Besar, Palembang, Indonesia Telp. 0711-353414 Fax. 0711-355918

*Email: ^{1)tiesyahmainur02@gmail.com; ^{2)tahdid@polsri.ac.id}}

Diterima: 02.09.2024, Disetujui: 11.09.2024, Diterbitkan: 07.10.2024

ABSTRACT

A Boiler is a type of closed vessel that transfers heat energy from the combustion process to water until it becomes hot steam (steam). To produce good steam, the Boiler must be reliable in its heat transfer system, mass transfer system and hydrodynamic system. This will also have an impact on cost, thermal efficiency and the environment. In order to produce steam, good combustion and proper water level regulation are required. Combustion is an exothermic reaction that takes place very quickly, which releases energy in the form of heat and flame and is able to spread heat through a medium. In order for combustion to occur optimally, it must pay attention to the value of the Air Fuel Ratio (AFR). The regulation of the water level also affects the steam produced. This study studies the variables of air fuel ratios (Air Fuel Ratio) 16, 18, 20, 22 and 24 as well as water level levels of 20%, 30%, 40%, 50% and 60%. From this study, a flame temperature value of 685.9°C was obtained with a thermal efficiency of 69,61% Specific Fuel Consumption 0,0000339 kg/kJ which is in the 4th experiment, namely Air Fuel Ratio 22 and Water Level 50% with optimal combustion and steam production results.

Keywords: Boiler, Saturated Steam, Air Fuel Ratio, Water Level, Energy, Thermal Efficiency, Specific Fuel Consumption.

ABSTRAK

Boiler merupakan sejenis bejana tertutup yang mentransfer energi panas dari proses pembakaran ke air hingga menjadi uap panas (steam). Untuk menghasilkan steam yang baik, Boiler harus handal dalam sistem perpindahan panas, sistem perpindahan massa serta sistem hidrodinamika nya. Hal ini pula akan berdampak kepada biaya, efisiensi termal dan lingkungan. Agar dapat menghasilkan steam diperlukan pembakaran yang baik dan pengaturan level air yang tepat. Pembakaran merupakan reaksi eksotermis yang berlangsung sangat cepat, yang membebaskan energi berupa panas dan nyala api serta mampu menyebarkan panas melalui suatu media. Agar pembakaran terjadi dengan optimal maka harus memperhatikan nilai rasio udara bahan bakar atau Air Fuel Ratio (AFR). Pengaturan terhadap level air juga berpengaruh terhadap steam yang dihasilkan. Penelitian ini mempelajari variable rasio udara bahan bakar solar (Air Fuel Ratio) 16, 18, 20, 22 dan 24 serta level ketinggian air 20%, 30%, 40%, 50% dan 60%. Dari penelitian ini didapatkan nilai flame temperature 685,9°C dengan efisiensi termal sebesar 69,61% dan nilai Spesific Fuel Consumption 0,0000339 kg/kJ yang berada pada percobaan ke-4 yaitu Air Fuel Ratio 22 dan Level Ketinggian Air 50% dengan hasil pembakaran dan produksi steam yang optimal.

Kata kunci: Boiler, Saturated Steam, Air Fuel Ratio, Level Ketinggian Air, Flame Temperature, Efisiensi Termal, Spesific Fuel Consumption.

I. Pendahuluan

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi membawa banyak sekali dampak positif dibidang industri maupun kehidupan sehari-hari. Kehidupan manusia sudah tidak dapat terlepas lagi dari peranan penting industri yang didukung oleh kemajuan pada mesin-mesin konversi energi. Boiler merupakan salah satu mesin konversi yang sangat penting dalam

mendukung berbagai proses di industri-industri besar maupun industri kecil rumahan.

Boiler atau ketel uap merupakan sejenis bejana tertutup yang mentransfer energi panas dari proses pembakaran ke air hingga menjadi uap panas (steam). Uap panas tekanan tinggi kemudian digunakan untuk keperluan suatu proses yang paling dibutuhkan dari hampir semua sektor industri (Manggala et al., 2021).

Penggunaan Boiler pada industri manufaktur memegang peranan yang penting dalam penyempurnaan proses produksi, Boiler dapat menghasilkan energi yang dapat digunakan untuk mengalirkan panas dalam bentuk energi kalor ke suatu proses (Zakiyudin dalam Aisyah, 2021). Pada industri *pembangkit* listrik, uap digunakan untuk menggerakkan turbin dan menyediakan tenaga mekanik (Yunianto et al., 2022).

Menurut (Ningsih et al., 2021) *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. Keunggulan utama dari Boiler ini adalah distribusi panas yang merata dari *Water Tube* ke *Steam Drum* (Alidina, Arga et al., 2022).

Boiler memiliki banyak komponen atau peralatan yang apabila pada salah satu komponen atau peralatan tersebut mengalami gangguan atau kegagalan kinerja, maka akan mempengaruhi kinerja secara keseluruhan atau sistem (Pamungkas dkk., 2020). Banyak sekali faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi atau kinerja Boiler, antara lain adalah kualitas bahan bakar, jenis Boiler serta konfigurasi dari performa peralatan bantu (*Auxiliary*) yang menunjang kinerja Boiler (Mohamad & Subagyo, 2020). Kinerja Boiler dapat dilihat dari kualitas *steam* yang dihasilkan dengan melihat tingkat kondisi operasi (tekanan dan temperatur) yang dicapai pada kondisi *steadystate* ataupun *non steadystate* (Hardi et al., 2021). Untuk mencapai kualitas *steam* yang baik dan efisiensi termal Boiler yang optimal dibutuhkan Boiler yang handal.

Kehandalan peralatan Boiler akan sangat tergantung dari kemampuan sistem perpindahan panas, perpindahan massa dan sistem hidrodinamika yang terjadi. Sistem perpindahan massa pada peralatan Boiler terjadi pada perpindahan massa molekul air pada zona fase liquid di dalam unit *Steam Drum*, dimana molekul air berpindah dari zona liquid ke zona fase gas di dalam. Pindahan massa tersebut sangat tergantung dari sistem perpindahan panas yang terjadi antara panas di ruang bakar ke aliran fluida di dalam *Tube Saturated*.

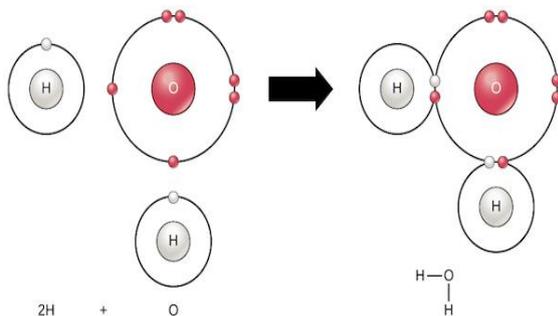
Sistem perpindahan panas yang baik akan sangat tergantung dari sistem hidrodinamika yang ditawarkan pada daerah ruang bakar sebagai tempat disusunnya tubing yang digunakan pada ruang bakar. Dimana sistem perpindahan panas tersebut terjadi pada tiga tahap penting berupa proses perpindahan panas secara radiasi, konduksi dan konveksi. Pada Boiler perpindahan panas secara radiasi adalah perpindahan panas yang terjadi saat dinding luar tubing menerima panas reaksi dari hasil pembakaran pada ruang bakar, perpindahan panas konduksi adalah saat kalor yang di terima dinding luar tubing menembus hingga ke dinding bagian dalam tubing, sedangkan perpindahan panas konveksi terjadi saat kalor yang dibawa ke dinding bagian dalam tubing dialirkan ke fluida air di dalam tubing.

Proses pembakaran pada ruang bakar terjadi saat sumber panas, udara dan bahan bakar di suplai ke *Burner*. Untuk mencapai pembakaran yang optimal maka dibutuhkan perbandingan antara udara dan bahan bakar yang tepat atau biasanya disebut dengan AFR (*Air Fuel Ratio*). AFR bertujuan untuk menghasilkan suatu pembakaran yang sempurna (Ayuni dkk., 2021).

Dalam proses pembakaran di ruang bakar Boiler umumnya menggunakan bahan bakar cair (solar dan residu), padat (batubara) atau gas (Putri et al., 2022). Jika di bandingkan dengan bahan bakar gas, maka bahan bakar cair berupa solar dinilai lebih aman karena mengandung lebih banyak atom karbon dengan rantai yang lebih panjang sehingga memerlukan suhu yang lebih tinggi untuk menguap (Bambang Puguh Manunggal, 2019). Selain itu untuk mencapai efisiensi termal yang optimal maka di perlukan bahan bakar yang mempunyai jangkauan area nyala api yang lebih luas persatuan massa bahan bakar yang sama dengan bahan bakar gas. Hal ini akan dapat memberikan efek perpindahan panas secara radiasi antara nyala api dan area permukaan tubing yang optimal.

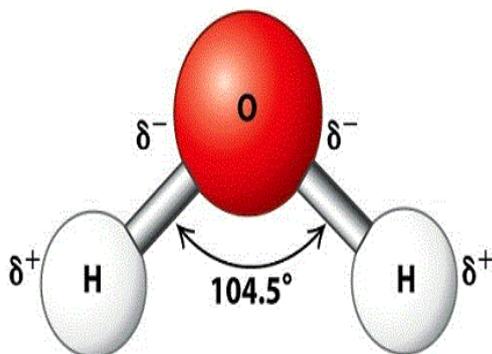
Air adalah senyawa kimia yang terdiri dari dua atom hidrogen (H) dan satu atom oksigen (O) atau lebih dikenal dengan H_2O . Air dapat berbentuk cair, padat (es) atau gas (uap) tergantung pada suhu dan tekanan. Oksigen memiliki 2 lapisan kulit yang berisi elektron

yang mana lapisan kulit dalam memiliki 2 elektron, sedangkan lapisan kulit luar memiliki 6 elektron. Jumlah elektron yang stabil pada lapisan kulit luar adalah 8 elektron, oleh karena itu oksigen kekurangan 2 elektron agar stabil. Sedangkan hidrogen hanya memiliki satu lapisan kulit yang berisi 1 elektron, lapisan kulit ini akan stabil saat berisi 2 elektron. Karena oksigen kekurangan 2 elektron dan hidrogen kekurangan 1 elektron, maka 1 atom oksigen akan berikatan dengan 2 atom hidrogen. Dengan membentuk ikatan H_2O maka hidrogen dan oksigen sekarang sudah stabil.

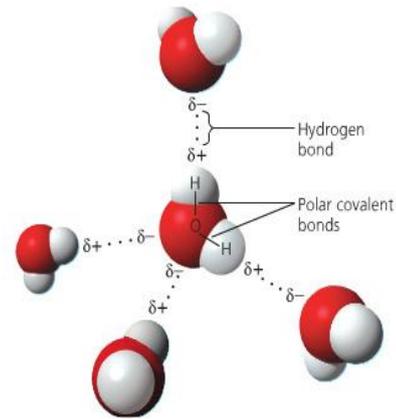


Gambar 1. Ikatan senyawa Hidrogen dan Oksigen

Ketika satu atom oksigen berikatan dengan 2 atom hidrogen agar stabil maka molekul H_2O ini akan menjadi bentuk V. Sudut yang dibentuk antara hidrogen 1 dan hidrogen 2 adalah $104,5^\circ$ dengan oksigen cenderung bermuatan negatif sedangkan hidrogen cenderung bermuatan positif. Ikatan yang terbentuk antara oksigen dan hidrogen dalam satu molekul air atau H_2O disebut dengan ikatan kovalen. *Ikatan kovalen* adalah ikatan yang terjadi akibat pemakaian pasangan elektron secara bersama-sama oleh dua atom.



Gambar 2. Sudut ikatan pada molekul H_2O



Gambar 3. Ikatan kovalen dan ikatan hidrogen pada senyawa H_2O

Level ketinggian air ditujukan untuk mengetahui pada level ketinggian berapa terjadinya peningkatan sistem perpindahan massa optimal dalam area *Steam Drum*. Dalam hal ini perubahan molekul fasa cair menjadi fasa gas dalam *Steam Drum* diperlukan usaha yang lebih spesifik terhadap bagaimana pengaturan rasio ruang uap dan ruang ketinggian fluida air dalam *Steam Drum* yang diatur dengan secara otomatis dan dikaji secara *komprehensif* mengenai hubungan dan pengaruh level ketinggian fluida air terhadap kualitas steam yang dihasilkan.

II. Bahan dan Metode

1. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Unit *Cross Section Double Drum Water Tube Boiler (CSDDWTB)*
2. *Gas Analyzer* untuk menentukan komposisi *flue gas (CO)* dan laju alir udara
3. *Thermogun* untuk menentukan *Temperatur Flame*
4. *Anemometer* untuk mengukur kecepatan Udara

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

a. Air :

- 1,34 , 1,33 , 1,32 , 1,35 , 1,34 liter/menit
- 1,34 , 1,33 , 1,32 , 1,35 , 1,34 kg/menit

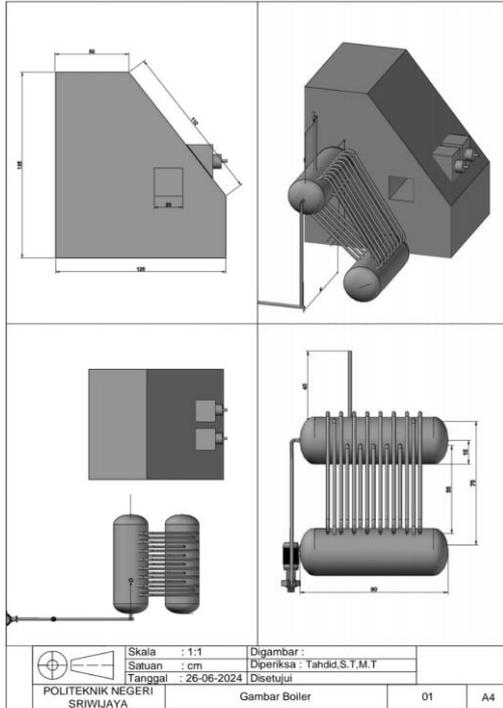
b. Udara Proses :

- 1813 , 2040 , 2267 , 2493 , 2720 liter/menit
- 2,18 , 2,45 , 2,72 , 2,99 , 3,26 kg/menit
- 24,06 , 27,07 , 30,08 , 33,09 , 36,09 m/s

c. Bahan Bakar Solar :

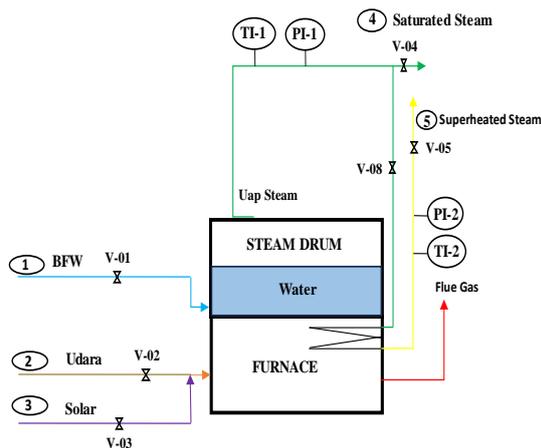
- 1,7 liter untuk 1 kali percobaan
- 42,5 liter untuk 25 kali percobaan

Berikut ini adalah desain alat Cross Section Double Drum Water Tube Boiler (CSDDWTB)



Gambar 4. Desain Struktural Alat CSDDWTB

Berikut ini diagram alir proses pada alat Cross Section Double Drum Water Tube Boiler



Gambar 5. Diagram Alir Proses CSDDWTB

Spesifikasi alat Cross Section Double Drum Water Tube Boiler dapat dilihat pada tabel 1 berikut ini

Tabel 1. Spesifikasi Alat

No	Bahan/Alat	Merk/Spesifikasi	Kuantitas
1	Burner	Jenis Atomizing Oil Burner, Fuel Solar	2 buah
2	Steam Drum	Material Baja, Merk SEFIC, Dimensi 232 mm x 1450 mm	1 buah
3	Water Drum	Material Baja, Merk SEFIC, Dimensi 232 mm x 1450 mm, Tekanan max 300 bar	1 buah
4	Water Tube	Material Seamless Carbon Steel, Dimensi 1/2" SCN 40, Tekanan max 63,58 bar, Suhu max 454 °C	35 buah
5	Pompa	Merk CNP CDMF 5	1 buah
6	Kompresor	Merk Izumi OL 07-24, Power 550 W/ 0,75 hp	1 buah
7	Safety Valve	Tipe SRVC 390, Tekanan max 10 Bar	1 buah
8	Pressure Indicator	Jenis Pressure gauge, Merk ASHCROFT, Dimensi 4" connection 1.2", Tekanan max 60 kg/cm ²	3 buah
9	Temperature Indicator	Jenis Temperature bimetal, Merk WIPRO, Dimensi 4" connection 1.2", Suhu max 400 °C	3 buah
10	Water Level Gauge (Manual)	Jenis Transparant Reflex Glass Tube FBG, Merk Habei, Skala 10% - 50%	1 buah
11	Water Level Gauge (Otomatis)	WLC AM61-F, Ukuran WLC 20 cm	1 buah
12	Valve	Tipe Socked Weld Floating Ball Valve 1/2, Material Galvanis, Applied Temp -196 °C - 450 °C	7 buah
13	Blowdown Valve	Tipe Ball Valve 1/2, Material Galvanis, Applied Temp -196 °C - 450 °C	2 buah
14	Check Valve	Merk ONDA, Tipe Swing Check Valve 1/2", Material Kuningan	1 buah
15	Drain Valve	Tipe Ball Valve 1/2", Material Galvanis Applied, Temp 196°C to 450°C	6 buah

2. Metode Penelitian

Dalam metode penelitian terdapat variabel yang digunakan, yaitu :

1. Variabel Tetap

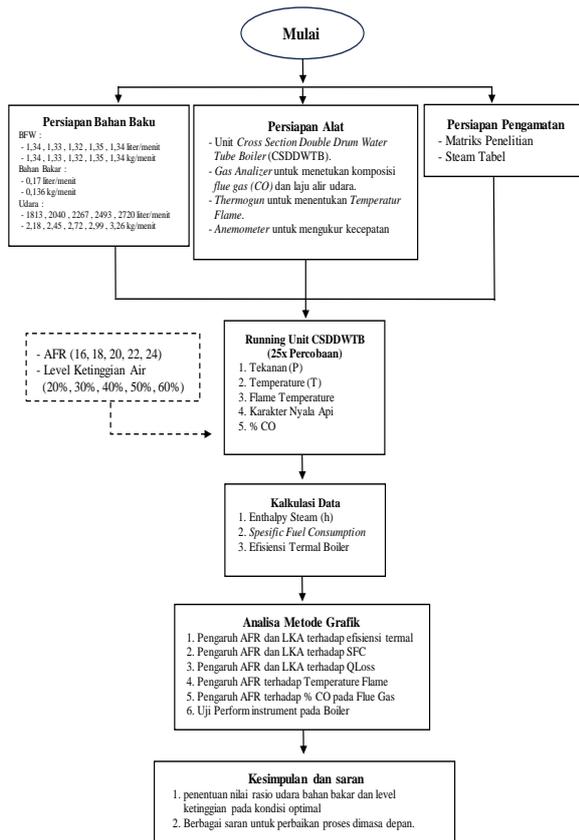
- a. Bahan Bakar Solar : 0,17 L/menit
- b. Boiler Feed Water : 1,35 kg/menit
- c. Massa Steam : 1,35 kg/menit
- d. Kapasitas Steam Drum : 120 liter
- e. Kapasitas Water Drum : 120 liter

2. Variabel Berubah

- a. Ratio Udara Bahan Bakar: 16, 18, 20, 22, 24
- b. Udara :
 - 1813, 2040, 2267, 2493, 2720 liter/menit
 - 2,18 , 2,45 , 2,72 , 2,99 , 3,26 kg/menit
 - 24,06 , 27,07 , 30,08 , 33,09 , 36,09 m/s
- c. Level Ketinggian Air :
 - 20%, 30%, 40%, 50%, 60%

3. Variabel Terikat

- a. Tekanan Saturated (bar)
- b. Temperatur Saturated (°C)
- c. Flame Temperature
- d. Warna Api
- e. Gas CO (%)



Gambar 6. Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan penentuan Rasio Udara dan Bahan Bakar serta perhitungan pada Efisiensi Termal, *Specific Fuel Consumption (SFC)* dan Persen Kehilangan Panas (*Q Loss*). Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. *Air Fuel Ratio (AFR)*

$$AFR = \frac{\text{massa udara}}{\text{massa bahan bakar}}$$

(sumber : Heywood, 1988 page : 53)

2. Efisiensi Termal

$$\% \text{ Eff} = \frac{\text{Panas Termanfaatkan}}{\text{Panas Input}} \times 100\%$$

(sumber : Hougen, page 141)

3. *Specific Fuel Consumption (SFC)*

$$SFC = \frac{\text{massa bahan bakar (kg)}}{m_{\text{Steam}} \times h_g \text{ Steam}}$$

(sumber : Internal Combustion Engine, 1997 page : 51)

4. Persen Kehilangan Panas

$$Q \text{ Loss} = \frac{\text{Panas Input} - \text{Panas Steam}}{\text{Panas Input}} \times 100\%$$

3. Tempat

Pelaksanaan penelitian dan proses pengambilan data dilakukan di Laboratorium

dan Bengkel Teknik Energi Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang.

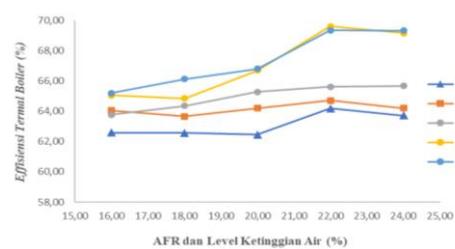
III. Hasil dan Pembahasan

Dari penelitian yang telah dilakukan, di dapatkan data pengamatan dan analisa hasil penelitian sebagai berikut :

No	Steam						Efisiensi (%)	SFC (kg/kJ)	Panas Hilang (Q _{Loss}) (%)	T Saturatd Tabel (°C)
	Saturatd									
	TI-2 (°C)	PI-2 (Bar)	massa steam (kg/min)	hf (kJ/kg)	hg (kJ/kg)	hfg (kJ/kg)				
1	112,00	1,50	1,34	467,08	2693,11	2226,03	62,59	0,0000377	37,41	111,35
2	124,50	2,30	1,33	523,73	2712,66	2188,93	62,56	0,0000377	37,44	124,69
3	137,00	3,30	1,32	575,50	2729,27	2153,77	62,46	0,0000378	37,54	136,81
4	148,00	4,50	1,35	623,22	2743,39	2120,16	64,18	0,0000367	35,82	147,91
5	149,00	4,60	1,34	626,73	2744,38	2117,65	63,72	0,0000370	36,28	148,72
6	158,00	6,00	1,34	670,50	2756,14	2085,64	64,05	0,0000368	35,95	158,83
7	163,00	6,60	1,33	686,86	2760,25	2073,39	63,66	0,0000370	36,34	162,59
8	168,00	7,20	1,34	702,12	2763,94	2061,82	64,20	0,0000367	35,80	166,09
9	168,00	7,50	1,35	709,38	2765,64	2056,26	64,70	0,0000364	35,30	167,76
10	167,60	7,50	1,34	709,38	2765,64	2056,26	64,21	0,0000367	35,79	167,76
11	165,80	7,30	1,33	704,57	2764,51	2059,95	63,77	0,0000370	36,23	166,65
12	171,50	8,30	1,33	727,74	2790,80	2042,06	64,36	0,0000366	35,64	171,95
13	174,00	8,80	1,34	738,54	2810,15	2033,62	65,28	0,0000361	34,72	174,41
14	175,40	9,00	1,34	742,73	2825,04	2030,32	65,61	0,0000359	34,39	175,36
15	176,20	9,20	1,34	746,85	2828,90	2027,06	65,68	0,0000359	34,32	176,29
16	172,50	8,40	1,34	729,93	2799,28	2040,35	65,05	0,0000363	34,95	172,45
17	175,00	8,90	1,33	740,64	2811,60	2031,96	64,84	0,0000364	35,16	174,88
18	182,50	10,50	1,34	772,11	2870,95	2006,85	66,69	0,0000354	33,31	182,02
19	190,00	12,60	1,35	808,37	2975,45	1977,07	69,61	0,0000339	30,39	190,18
20	191,00	12,80	1,34	811,59	2978,98	1974,39	69,16	0,0000341	30,84	190,90
21	174,00	8,60	1,34	734,27	2805,23	2036,96	65,19	0,0000362	34,81	173,44
22	176,00	9,00	1,35	742,73	2825,04	2030,31	66,12	0,0000357	33,88	175,36
23	183,00	10,70	1,34	775,78	2875,65	2003,87	66,80	0,0000353	33,20	182,85
24	192,00	12,90	1,34	813,18	2986,24	1973,06	69,35	0,0000340	30,65	191,26
25	191,50	12,90	1,34	813,18	2986,24	1973,06	69,33	0,0000340	30,67	191,26

Gambar 7. Data hasil pengamatan dan hasil perhitungan

1. Pengaruh *Air Fuel Ratio (AFR)* dan Level Ketinggian Air terhadap Efisiensi Termal Boiler



Grafik 1. Pengaruh *Air Fuel Ratio (AFR)* dan Level Ketinggian Air terhadap Efisiensi Termal Boiler

Salah satu faktor yang mempengaruhi cepatnya proses pemanasan air sehingga temperatur meningkat dengan cepat adalah sistem perpindahan panas yang akan terjadi secara baik dengan adanya pembakaran yang optimal. Pembakaran yang optimal akan didapatkan dengan komposisi rasio udara bahan bakar yang tepat. Besarnya temperatur uap saturatd yang dihasilkan tergantung pada laju

penguapan air di dalam Boiler yang menerima transfer panas pembakaran dari hasil rasio udara bahan bakar yang digunakan, oleh karena itu dengan menggunakan nilai rasio udara bahan bakar yang tepat maka panas yang ditransfer akan cukup sehingga laju penguapan air akan semakin meningkat dan nilai temperatur uap saturated juga akan semakin tinggi. Untuk meningkatkan sistem perpindahan massa dalam hal ini perubahan molekul dari fasa cair ke fasa gas diperlukan perlakuan yang lebih spesifik terhadap pengaturan rasio ruang uap dan ruang fluida air pada *Steam Drum*.

Pada AFR 16 sampai 18 persen rata-rata kenaikan efisiensi termal hanya pada rentan 2,45% atau efisiensi termal hanya sebesar 66,69%. Hal ini disebabkan karena kurangnya udara pada proses pembakaran yang menyebabkan terjadinya pembakaran yang tidak sempurna atau adanya bahan bakar yang tidak habis terbakar. Saat pembakaran yang terjadi tidak sempurna maka reaksi pembakaran yang terjadi tidak sempurna pula. Hal ini menyebabkan panas reaksi yang dihasilkan tidak optimal sehingga flame temperatur yang di dapatkan rendah. Secara umum saat flame temperatur yang di dapatkan rendah maka sistem proses perpindahan panas konduksi akan terganggu. Sistem perpindahan panas konduksi adalah sistem perpindahan panas yang diterima dari panas reaksi melalui radiasi yang akan di teruskan ke tubing bagian luar hingga ke tubing bagian dalam. Saat perpindahan panas secara konduksi terganggu atau dapat dikatakan jumlah panas yang dibawa oleh perpindahan panas konduksi rendah maka hal ini akan menyebabkan proses perpindahan panas pada konveksi tidak optimal karena panas yang diterima konveksi juga akan rendah. Nilai konveksi yang rendah ini berpengaruh terhadap pergerakan molekul H_2O yang terdapat di bagian aliran laminar menjadi tidak optimal, hal ini akan menyebabkan aliran laminar meluas sedangkan aliran ini memiliki pola gerakan aliran yang pelan. Sementara aliran turbulen yang terjadi akan mengecil cakupannya sehingga pergerakan kinetik antar molekul H_2O akan terjadi secara lambat. Gaya kinetik antar molekul H_2O ini akan tetap terus berlangsung hingga fluida berada di *Steam Drum*. Namun, uap yang dihasilkan akan sedikit dengan nilai temperatur yang rendah karena sejumlah panas yang dibawa dalam jumlah yang rendah atau tidak optimal.

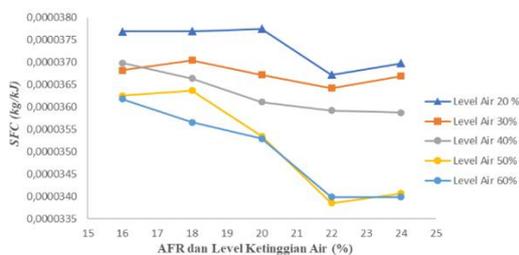
Selanjutnya pada AFR 20 sampai 22 dengan rata-rata persen kenaikan efisiensi sebesar 4,20% atau persen efisiensi termal yang didapat yaitu 69,61%. Hal ini disebabkan oleh membaiknya proses pembakaran bahan bakar pada ruang bakar, artinya bahan bakar mulai terbakar habis atau sempurna yang pada akhirnya hal ini akan memperbaiki sistem proses perpindahan panas baik secara radiasi, konduksi dan konveksi pada tubing. Sedangkan pada AFR 24 di dapatkan efisiensi termal sebesar 69,16% Selisih efisiensi antara AFR 22 dan 24 tidak jauh berbeda yakni hanya pada kisaran 0,45% saja. Hal ini disebabkan adanya penambahan udara yang sudah jauh berlebih yang mengakibatkan sejumlah panas akan diserap dan dibawa oleh udara yang berlebih menuju *steam gas* sebagai gas buang yang tidak termanfaat.

Level Ketinggian Air dihitung dari kedalaman air yang terdapat pada *Steam Drum* (20%, 30%, 40%, 50%, 60%) yang mana setiap ketinggian air berpengaruh terhadap luas area permukaan cairan fluida air pada *Steam Drum*. Menginjak pada pengaruh Level Ketinggian Air terhadap efisiensi termal yang didapatkan dari hasil penelitian, pada level ketinggian 20%, 30% dan 40% nilai efisiensi termal berada pada kisaran 62,46% hingga 65,68%. Pada ketiga tahap ketinggian level air ini terdapat kenaikan bertahap tiap level nya. Hal ini disebabkan oleh ukuran luas antara ruang uap dan permukaan fluida yang berbeda. Di ambil contoh pada level ketinggian air 20% maka kedalaman fluida air pada *Steam Drum* yaitu 20% dan sisanya adalah ruang uap dari total *Steam drum*. Hal ini memberikan fakta bahwa ruang uap lebih besar daripada kedalaman fluida, sehingga tekanan yang terbangun akan rendah yang berakibat pada temperatur steam yang dihasilkan kecil. Sehingga steam yang dihasilkan sedikit dan berdampak pada efisiensi termal yang rendah.

Pada kondisi operasi pada level ketinggian 50% efisiensi termal yang didapatkan yaitu sebesar 69,61%. Yang mana seimbang antara kedalaman fluida air dan ruang uap yang disediakan pada *Steam Drum*. Hal ini memberikan pengaruh tekanan kesegala arah dan temperatur yang tinggi dihasilkan oleh steam saat proses perubahan fasa cair menjadi fasa gas pada *Steam Drum*, dimana karena adanya tekanan steam yang semakin tinggi maka molekul H_2O yang berada di permukaan cairan fluida air akan mengalami gaya tarik antar molekul yang semakin kuat sehingga

terjadi perenggangan serta pemutusan ikatan lemah atau ikatan hidrogen antar molekul H₂O dari fase cair ke fase gas, menghasilkan steam optimal dengan temperatur ideal yang diinginkan serta berdampak pada efisiensi termal yang lebih baik. Sedangkan dengan level ketinggian 60% memberikan tingkat kedalaman fluida yang berlebih dan ruang uap yang hanya 40% dari total *Steam Drum*. Hal ini mempersempit area uap dan menyebabkan uap yang terbangun akan terkondensasi sehingga steam yang dihasilkan sedikit dengan efisiensi termal yang menurun.

2. Pengaruh Air Fuel Ratio (AFR) dan Level Ketinggian Air terhadap Specific Fuel Consumption (SFC)



Grafik 2. Pengaruh Air Fuel Ratio (AFR) dan Level Ketinggian Air terhadap Specific Fuel Consumption (SFC)

Specific Fuel Consumption (SFC) pada Boiler merupakan nilai koefisien dalam satuan kg bahan bakar persatuan energi kalor steam yang di produksi. Sehingga SFC merupakan nilai koefisien yg dapat digunakan untuk menghitung jumlah bahan bakar ketika akan memproduksi sejumlah steam.

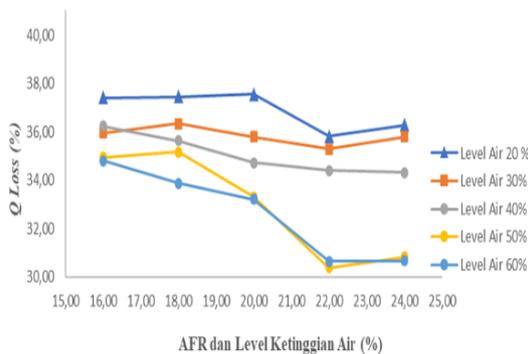
Pada AFR 16 hingga 18 di dapatkan persen rata-rata SFC yaitu 2,56% yang mana besarnya SFC pada rentang AFR ini adalah 0,0000354 kg/kJ. Nilai ini terbilang cukup tinggi dibandingkan AFR lain nya, dapat dilihat pada grafik bahwa pada AFR ini SFC tidak mengalami penurunan yang signifikan. Hal ini disebabkan pada AFR 16 hingga 18 pembakaran masih tergolong belum baik, banyak bahan bakar yang tidak terbakar habis sehingga konsumsi bahan bakar tinggi dengan persatuan massa steam yang dihasilkan.

Pada AFR 20 hingga 24 didapatkan % rata-rata SFC nya yaitu 4,41% dengan besaran SFC pada nilai 0,00003339 kg/kJ. Dapat disimpulkan pula bahwa nilai SFC mengalami penurunan dari AFR sebelumnya. Turun nya

nilai SFC tersebut dikarenakan pada AFR 22 adalah titik optimal yang di dapatkan, hal ini dipengaruhi oleh terbakarnya bahan bakar secara habis dan sempurna, sehingga bahan bakar yang diperlukan dalam memproduksi persatuan massa steam turun. Penurunan ini memberikan dampak positif yang mana dengan penurunan tersebut maka penggunaan bahan bakar lebih efisien, steam yang dihasilkan baik dan biaya yang dibutuhkan lebih murah. Sedangkan pada AFR 24 mengalami kenaikan kembali pada nilai SFC yaitu 0,0000341. Hal ini dikarenakan jumlah suplai udara yang berlebih sehingga terdapat energi panas yang terbawa ke flue gas atau tidak termanfaatkan. Saat panas tidak termanfaatkan dan terbuang ke stack gas dengan suplai udara berlebih maka dibutuhkan bahan bakar solar yang lebih banyak pula untuk memproduksi persatuan steam pada Boiler. Hal ini memberikan dampak buruk berupa panas yang hilang dan biaya produksi yang tinggi dengan hasil persatuan steam nya.

Level Ketinggian Air pada *Steam Drum* juga memberikan pengaruh terhadap nilai *Specific Fuel Consumption (SFC)* pada Boiler. Pada level kedalaman fluida yang rendah yaitu 20%, 30% dan 40% didapatkan nilai SFC pada rentang nilai 0,0000378 kg/kJ hingga 0,000059 kg/kJ. Nilai ini menyatakan bahwa dibutuhkan bahan bakar solar yang tinggi pada produksi persatuan steam nya. Hal ini dikarenakan diperlukan bahan bakar yang banyak untuk uap air mengejar temperatur dan tekanan yang harus diberikan pada *Steam Drum* untuk menghasilkan uap yang baik. Pada kedalaman fluida 50% didapatkan nilai SFC sebesar 0,0000339 kg/kJ yang mana nilai tersebut terhitung mengalami penurunan jumlah bahan bakar yang dibutuhkan dalam memproduksi persatuan massa steam nya. Dengan tingkat kedalaman fluida yang tepat dengan ruang uap yang cukup serta disertai dengan pembakaran yang baik maka bahan bakar yang dibutuhkan lebih efisien. Sedangkan pada level kedalaman fluida 60% didapati nilai SFC naik dengan nilai 0,0000362 kg/kJ hal ini disebabkan oleh ruang uap yang disediakan terlalu sedikit dan membuat uap yang terbentuk mengalami perubahan fasa menjadi cair kembali karena kurangnya volume ruang uap yang disiapkan pada *Steam Drum*. Hal ini membuat pembakaran terus berlangsung dan bahan bakar yang dibutuhkan untuk memproduksi persatuan steam pun meningkat.

3. Pengaruh Air Fuel Ratio (AFR) dan Level Ketinggian Air terhadap Panas Hilang (Q_{loss})



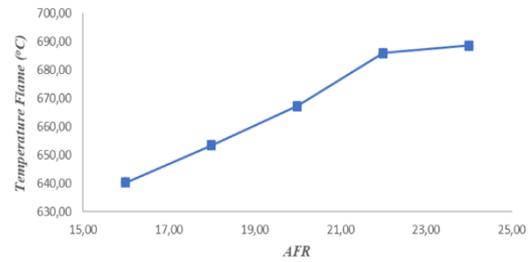
Grafik 3. Pengaruh Air Fuel Ratio (AFR) dan Level Ketinggian Air terhadap Panas Hilang

Pada AFR 16 hingga 18 di dapatkan nilai persen rata-rata panas hilang sebesar 4,90% dengan persen kehilangan panas dinilai 33,31%. Kehilangan panas ini disebabkan oleh kurangnya udara yang disuplai menyebabkan pembakaran yang tidak sempurna.

Pada AFR 20-22 didapatkan nilai persen kehilangan panas sebesar 30,39%. Persen kehilangan panas ini mengalami penurunan dari AFR sebelumnya. Hal ini dikarenakan perbandingan udara dan bahan bakar yang tepat. Sedangkan pada AFR 24 terjadi kenaikan persen panas hilang yang menduduki angka 30,84%. Hal ini disebabkan adanya suplai udara berlebih yang membawa panas ke flue gas, sehingga panas tidak dimanfaatkan dan terbuang sia-sia.

Pengaruh level ketinggian air yang terjadi pada kedalaman fluida di *Steam Drum* dengan level 20%, 30% dan 40% menunjukkan persen kehilangan panas dikisaran nilai 36,34% hingga 37,55%. Hal ini dikarenakan jumlah fluida yang dipanaskan terlalu sedikit dibandingkan jumlah energi yang dihasilkan dari pembakaran. Sedangkan pada level ketinggian 50% di dapatkan persen kehilangan panas sebesar 30,39% karena panas yang dihasilkan seimbang dengan kedalaman fluida yang akan dipanaskan.

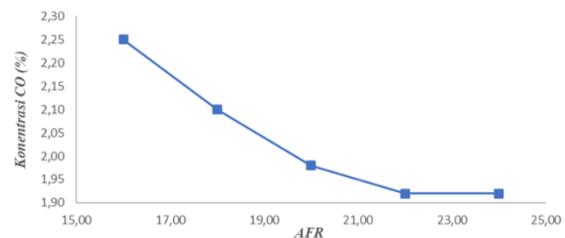
4. Pengaruh Air Fuel Ratio (AFR) terhadap Temperatur Flame



Grafik 4. Pengaruh Air Fuel Ratio (AFR) terhadap Temperatur Flame

Grafik 4 menunjukkan pengaruh Air Fuel Ratio (AFR) terhadap Temperatur Flame yang mana pada AFR 16 dan 18 di dapatkan temperatur flame sebesar 640,20°C hingga 653,40°C. Hal ini menunjukkan bahwa pada AFR 16 hingga 18 pembakaran belum terlalu baik. Sedangkan pada AFR 20 hingga 22 didapatkan nilai temperatur flame pada titik 667,20°C hingga 685,90°C. Pada AFR 22 perbandingan udara dan bahan bakar berada pada titik yang tepat dan menghasilkan pembakaran yang optimal. Sementara pada AFR 24 didapatkan nilai 688,50°C yang mana selisih temperatur antara AFR 22 dan AFR 24 ini tidak signifikan. Berdasarkan hal tersebut dapat dinyatakan bahwa AFR 22 adalah AFR optimal pada penelitian ini.

5. Pengaruh Air Fuel Ratio (AFR) terhadap persen CO pada Flue Gas

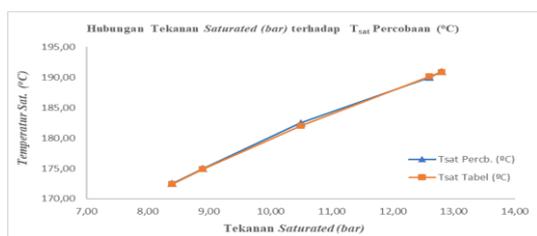


Grafik 5. Pengaruh Air Fuel Ratio (AFR) terhadap persen CO pada Flue Gas

Data yang terdapat pada grafik 5 menyatakan bahwa pada AFR 16 hingga 18 kandungan gas CO yang terdapat pada flue gas sebesar 2,10% hingga 2,25%. Hal ini dikarenakan terjadinya pembakaran yang tidak sempurna sehingga gas CO yang dihasilkan tinggi. Pada AFR 20 hingga AFR 22 di dapatkan data gas CO pada *flue gas* pada nilai 1,92% hingga 1,98%.

Terlihat penurunan yang cukup signifikan dari AFR sebelum nya. Hal ini disebabkan adanya pembakaran sempurna yang membakar habis bahan bakar dengan udara yang tepat. Artinya perbandingan udara dan bahan bakar nya optimal sehingga gas CO yang dihasilkan lebih rendah. Semakin tinggi nilai atau kandungan CO pada flue gas maka semakin besar dampaknya untuk lingkungan.

6. Uji Performa Peralatan Instrumen dengan Perbandingan Temperatur Saturated Aktual dan Steam Tabel



Grafik 6. Uji Performa Peralatan Instrumen dengan Perbandingan Temperatur Saturated Aktual dan Steam Tabel

Pada grafik uji performa instrumentasi pada alat, percobaan ini dilakukan dengan melihat perbandingan nilai temperature saturated aktual dan temperature saturated pada steam tabel dengan tekanan yang sama guna memastikan bahwa instrument pada alat berfungsi dengan baik. Dari penelitian pada tekanan 8,40 bar didapatkan temperatur saturated aktual di 172,50°C sedangkan dengan tekanan yang sama pada steam tabel di dapatkan nilai temperatur sebesar 172,45°C. Selanjutnya dilakukan dengan tekanan 8,90 bar hingga 12,80 bar dan didapatkan hasil dengan selisih yang berbeda dengan kisaran hanya 0,05°C hingga 0,48°C. Dengan di dapatkan nya hasil grafik yang berhimpit dan di dapatkan nilai selisih temperatur yang tidak jauh berbeda dengan tekanan yang sama maka dapat di tarik kesimpulan bahwa hal ini menunjukkan alat instrument yang digunakan pada alat *Cross Section Double Drum Water Tube Boiler* dalam keadaan baik.

Tabel 2. Perbandingan hasil dengan penelitian sebelumnya

No	Penelitian	Kemiringan Boiler	Bahan Bakar	Air Fuel Ratio (AFR)	Level Ketinggian Air (%)	Temperatur (°C)	Tekanan (bar)	Efisiensi Termal (%)	SFC (kg/kJ)
1	Nataliana et al., 2012	TD	Gas	TD	60	189,10	6,00	TD	TD
2	Intang, 2014	TD	Solar	TD	TD	160,00	4,00	20,18	TD
3	Aswan dkk., 2017	TD	Solar	15,48	TD	150,98	7,00	34,23	TD
4	Penelitian saat ini	65°	Solar	20	50	182,50	10,50	66,69	0,0000354
5	Penelitian saat ini	65°	Solar	22	50	190,00	12,60	69,61	0,0000339
6	Penelitian saat ini	65°	Solar	20	60	183,00	10,70	66,80	0,0000353
7	Penelitian saat ini	65°	Solar	22	60	192,00	12,90	69,35	0,0000340

Note : TD = Tidak Diuji

IV. Kesimpulan

1. Efisiensi termal optimal di dapatkan pada percobaan ke-4 dengan AFR 22 dan Level Ketinggian Air 50% di nilai 69,61%
2. *Specific Fuel Consumption* optimal di dapatkan pada percobaan ke-4 dengan AFR 22 dan Level Ketinggian Air 50% di nilai 0,0000339 kg/kJ

Daftar Pustaka

Manggala, A., Tahdid, T., & Anggriani, Y. S. (2021). Analisis Sistem Termal Pada

Double Drum Water Tube Boiler Untuk Memproduksi Saturated Steam Pengaruh Rasio Udara Bahan Bakar. *Jurnal Pendidikan Dan Teknologi Indonesia*, 1(12), 491–496.

Suci Ningsih, A., Syakdani, A., Rusnadi, I., Oktaviani, Y., Veronica, F., Triani Anisya, J., & Srijaya Negara Bukit Besar, J. (2021). Efisiensi Termal Produksi Steam Ditinjau Dari Rasio Udara Bahan Bakar Solar Pada *Cross Section Water Tube Boiler the Thermal Efficiency of Steam Production in Terms of Air Fuel Ratio of Diesel in the*

- Cross Section Water Tube Boiler. Jurnal Kinetika, 12(01), 18–22.*
- Yunianto, I., Saragih, G., & Nurmadia Pasaribu, S. (2022). Perhitungan Steam Yang Dibutuhkan Pada Proses Pelumatan Buah Kelapa Sawit Di Unit Digester Pt. Perkebunan Sumatera Utara Pmks Tanjung Kasau
- Alidina, D., Arga, E., Ridwan, K. A., Syakdani, A., Studi, P., Energi, T., Kimia, J., & Sriwijaya, P. N. (2022). Analisis Sistem Termal Pada *Double Drum Water Tube Boiler* Untuk Memproduksi Superheated Pengaruh Rasio Udara Bahan Bakar Gas *Analysis of The Thermal System on A Double Drum Water Tube Boiler for Producing Superheated The Effect of The Air Fuel Gas Ratio. 2(1), 33–40.*
- Pamungkas, I., Irawan, H. T., & Saputra, A. (2020). Risk and Reliability Analysis on Critical Components of Boiler in Steam Power Plant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1003(1), 12048.* IOP Publishing.
- Mohamad, A., & Subagyo, R. (2020). Analisis Kinerja Boiler Pembangkit Listrik Tenaga Uap Asam Asam Unit Ii – Kalimantan Selatan. *Jtam Rotary, 2(1), 109.*
- Hardi, I. M., Heryadi, Y., Studi, P., Mesin, T., Tinggi, S., & Wastukencana, T. (2021). Analisis Efisiensi Boiler *Atmospheric Fluidized Bed Combustion Tipe Water Tube 75 Ton / Jam* Analysis Efficiency Boiler Atmospheric Fluidized Bed Combustion Type Water Tube 75 Ton / Hour. *Jurnal Teknologika, 1–11.*
- Ayuni Lestari, V. T. (2021). Analisa Efisiensi Water Tube Boiler Berdasarkan Rasio Udara Bahan Bakar LPG Untuk Memproduksi saturated dan Superheated Steam. *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia (JPTI), 415-421.*
- Putri, D. N., Yuliani, A., Fatria, Amin, J. M., & Tahdid. (2022). Efisiensi Termal Water Tube Boiler berbahan Bakar Gas Dan Solar Pada Produksi Saturated dan Superheated Steam berdasarkan Level Ketinggian Air Dalam Steam Drum. *Distilasi, 7 No. 1(1), 1–7.*
- Bambang Puguh Manunggal, Slameto. (2019). Studi sistem bahan bakar gas pada superheater untuk pengembangan bahan bakar alternatif. *Jurnal Teknik Energi, 9(1), 64–72.*
- Heywood, John B. *"Internal Combustion Engine Fundamentals." McGraw-Hill Education, 1988.*
- Hougen, Olaf A. 1959. *Chemical Process Principles. 2nd Edition. John Willey & Sons, Inc: New York.*