

**ANALISIS EFISIENSI DAN FLAME TEMPERATURE CROSS SECTION DOUBLE DRUM WATER TUBE BOILER DITINJAU DARI PENGARUH RASIO UDARA BAHAN BAKAR GAS LPG PADA PRODUKSI SATURATED STEAM PROSES CONTINUE**

**EFFICIENCY AND FLAME TEMPERATURE ANALYSIS CROSS SECTION DOUBLE DRUM WATER TUBE BOILER REVIEWED FROM THE INFLUENCE OF LPG GAS AIR FUEL RATIO ON CONTINUOUS SATURATED STEAM PRODUCTION**

Neisyah Enjelina<sup>1)</sup>, Indah Pratiwi<sup>2)</sup>, Tahdid Pramona<sup>3)</sup>, Tria Apriyanti<sup>4)</sup>

<sup>1,2,3,4)</sup> Program Studi Teknik Energi Politeknik Negeri Sriwijaya, 30139, Indonesia

Corresponding Author E-mail: [neisyahenjelina@gmail.com](mailto:neisyahenjelina@gmail.com) [indahp@polsri.ac.id](mailto:indahp@polsri.ac.id) [tahdid@polsri.ac.id](mailto:tahdid@polsri.ac.id) dan [triaapriyanti28@gmail.com](mailto:triaapriyanti28@gmail.com)

**Abstract:** A boiler, or steam generator, is a key energy conversion machine in industries, playing an essential role in producing steam for various purposes, such as in Steam Power Plants (PLTU). Previous research has identified some issues, including low thermal efficiency due to an improper air-fuel ratio and the continued use of a manual water level control system. Based on these issues, the purpose of this study is to investigate the optimal air-fuel ratio for LPG gas and to improve efficiency and achieve high flame temperatures in a Cross Section Double Drum Water Tube Boiler by utilizing an automatic water level control system to detect water levels accurately. The fixed variables in this study include a fuel flow rate of 0,1 kg/min and a water level height of 50%, while the independent variables are air-fuel ratios of 17, 19, 21, 23, and 25. Based on the results, it was found that the air-fuel ratio significantly affects both flame temperature and thermal efficiency; higher air-fuel ratios lead to increased flame temperatures and thermal efficiency. The optimal air-fuel ratio found in this study is 23, which results in a flame temperature of 795,64°C and a thermal efficiency of 72,56%. Accurate ratio adjustments can reduce fuel consumption and enhance energy output without increasing pollution, as an incorrect air-fuel ratio affects exhaust gas emissions.

**Keywords:** Water Tube Boiler, Air-Fuel Ratio, Flame Temperature, Thermal Efficiency.

**Abstrak:** Boiler atau ketel uap merupakan salah satu mesin konversi energi dalam industri yang memiliki peran penting dalam menghasilkan uap (steam) untuk berbagai keperluan seperti Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Pada penelitian sebelumnya masih terdapat kekurangan seperti efisiensi termal yang rendah karena penggunaan rasio udara bahan bakar yang belum tepat dan masih menggunakan sistem water level control manual. Berdasarkan permasalahan tersebut tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui pengaruh rasio udara bahan bakar gas LPG yang optimal serta untuk meningkatkan efisiensi dan flame temperatur yang tinggi pada Cross Section Double Drum Water Tube Boiler dengan menggunakan sistem water level control otomatis, agar dapat mendeteksi level ketinggian air. Variabel tetap yang digunakan pada penelitian ini adalah laju alir bahan bakar sebesar 0,1 kg/min dan level ketinggian air 50%, sedangkan variabel bebas yang digunakan yaitu rasio udara bahan bakar sebesar 17; 19; 21; 23; dan 25. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diketahui bahwa rasio udara bahan bakar berpengaruh terhadap flame temperature dan efisiensi termal, semakin besar rasio udara bahan bakar maka flame temperatur dan efisiensi termal juga akan semakin tinggi. Nilai rasio udara bahan bakar optimal yang dihasilkan pada penelitian ini, yaitu 23 yang menghasilkan flame temperatur sebesar 795,64°C serta efisiensi termal sebesar 72,56%. Penyesuaian rasio yang tepat dapat mengurangi konsumsi bahan bakar dan meningkatkan output energi tanpa menambah polusi, karena pengaturan rasio udara bahan bakar yang tidak tepat berdampak pada emisi gas buang.

**Kata kunci:** Water Tube Boiler, Rasio Udara Bahan Bakar, Flame Temperature, Efisiensi Termal.

## 1. PENDAHULUAN

Energi merupakan elemen kunci sebagai sumber kehidupan, digunakan untuk memenuhi berbagai kebutuhan, termasuk pemanasan dan pembangkit listrik. Beragam sumber energi seperti bahan bakar fosil, biomassa, atau energi terbarukan menjadi

dasar bagi proses konversi energi. Konversi energi di era modern berfokus pada solusi yang lebih berkelanjutan, lebih ramah lingkungan yang berpotensi untuk menurunkan emisi gas rumah kaca yang menjadi penyebab utama perubahan iklim. Mesin konversi energi adalah alat yang

mengubah satu bentuk energi menjadi bentuk energi lain untuk menghasilkan kerja atau usaha.

Mesin konversi energi menjadi sumber tenaga untuk menjalankan suatu proses produksi di industri, sehingga diperlukan berbagai teknologi *boiler* yang ramah lingkungan untuk dapat bekerja secara efisien. *Boiler* atau ketel uap merupakan sebuah bejana tertutup yang terbuat dari baja dan berfungsi untuk mentransfer panas dari pembakaran bahan bakar ke air, sehingga menghasilkan uap (Sutikno et.al., 2019). Uap tersebut kemudian akan digunakan untuk industri seperti pada pembangkit listrik menggunakan tenaga uap (PLTU).

Kinerja *boiler* dapat diukur dari efisiensi termal keseluruhan, dimana efisiensi termal ini mencerminkan seberapa efektif *boiler* mengkonversi energi bahan bakar menjadi energi uap, yang mana merupakan parameter kritis dalam mengevaluasi performa dan biaya operasional. Kinerja *boiler* dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti kualitas bahan bakar, sistem konfigurasi, proses pembakaran, kondisi lingkungan dan pengelolaan gas buang. Jenis-jenis *boiler* melibatkan variasi dalam desain dan fungsinya.

Beberapa jenis umum yang sering digunakan adalah *boiler* pipa air dan *boiler* Pipa Api, keduanya memiliki keunggulan dan kelemahan tertentu tergantung pada kebutuhan aplikasi. Berdasarkan konfigurasi *boiler*, dapat berupa longitudinal atau *cross*, yang menentukan arah aliran gas panas keduanya dirancang untuk memaksimalkan perpindahan panas, perpindahan massa dan karakteristik hidrolika, yang terjadi dalam *boiler* sesuai dengan kebutuhan aplikasi dan faktor-faktor desain seperti efisiensi perpindahan panas. Untuk mendapatkan sistem kinerja *boiler* yang optimal, berbagai ahli telah mempelajari dan melakukan penelitian. Tercatat pada penelitian yang dilakukan oleh (Hardi et.al., 2021) tentang Analisis peluang penghematan energi pada *water tube boiler* menggunakan bahan bakar LPG, menggunakan sistem *water*

*tube boiler*, memiliki efisiensi termal sebesar 46,08%.

Efisiensi termal tersebut masih terbilang kecil dikarenakan terdapat beberapa hal yang menyebabkan kecilnya efisiensi, yaitu adanya kendala pada kebutuhan udara *excess* yang cukup besar. Pada penelitian berikutnya yang dilakukan oleh (Alidina et.al., 2022) tentang Analisis Sistem Termal Pada *double drum water tube boiler* Untuk Memproduksi *superheated* pengaruh rasio udara bahan bakar gas menghasilkan efisiensi termal menggunakan bahan bakar LPG sebesar 64,52%, Sedangkan menggunakan bahan bakar solar efisiensi termalnya sebesar 62,57% lebih kecil dari efisiensi penggunaan bahan bakar gas LPG dipilih karena kualitasnya yang lebih baik dari pada solar, dengan api biru yang dihasilkan di ruang bakar pembakaran menghasilkan panas yang lebih efisien, penelitian ini juga menggunakan jenis *boiler cross section* sehingga mampu memperluas area pada *tube*, yang merupakan komponen utama dalam proses perpindahan panas didalam *boiler*, dengan memperluas area *tube* laju perpindahan panas dapat diminimalkan, hal ini terjadi karena panas dapat tersebar lebih merata di sepanjang *tube*, sehingga mengurangi *hots spots* atau area dengan konsentrasi panas tinggi yang menyebabkan penurunan efisiensi *boiler*. Penelitian yang dilakukan oleh (Aswan et.al., 2017) tentang *boiler* pipa air yang menggunakan bahan bakar solar, dengan konfigurasi pipa longitudinal di mana sistem hanya memiliki satu drum yang berfungsi sebagai *water drum* dan *steam drum*.

Dari penelitian tersebut memiliki beberapa kekurangan, salah satunya adalah susunan pipa yang sejajar dengan *steam drum* yang mengakibatkan penurunan luas area pada pipa dan memperkecil perpindahan panas yang terdapat pada *boiler* sehingga efisiensi yang dihasilkan tidak maksimal. Dari ketiga penelitian yang telah dilakukan, masih banyak terdapat kelemahan terutama pada nilai pencapaian efisiensi termal berkisar di rentang 40-50%.

Hal ini sangat berdampak pada biaya produksi dan akan berdampak terhadap lingkungan karena tingginya produksi gas emisi CO<sub>2</sub>. Dengan demikian ruang lingkup penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan pemanfaatan energi secara efisien dan ramah lingkungan pada boiler, maka penelitian ini mengenai “Analisis *Effisiensi dan Flame Temperatur Cross Section Double Drum Water Tube Boiler* Ditinjau dari Pengaruh Rasio Udara Bahan Bakar Gas LPG Pada Produksi *Saturated Steam* Proses Kontinyu”.

## 2. TEORI DASAR

### 2.1 Boiler

*Boiler* adalah alat seperti bejana tertutup terbuat dari baja yang berfungsi untuk mentransfer panas dari pembakaran bahan bakar ke air, yang kemudian menghasilkan uap. *Boiler* mengubah energi kimia menjadi energi termal. Proses ini dimulai dengan pembakaran bahan bakar seperti batubara, gas alam, atau minyak didalam *boiler*.

Dengan demikian, *boiler* berperan dalam mengkonversi energi kimia dalam bahan bakar menjadi energi termal yang dapat digunakan untuk memenuhi berbagai keperluan seperti pembangkit listrik tenaga uap (Sutikno, et.al., 2019).

Berdasarkan fluida yang mengalir di dalam *tube*, *boiler* terbagi menjadi 2, yaitu:

#### a. *Fire Tube Boiler*

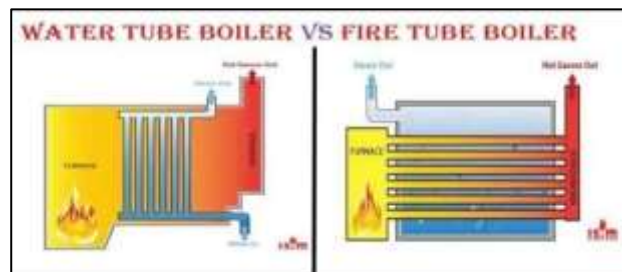
*Fire tube boiler* adalah jenis *boiler* dimana gas panas dari pembakaran melewati pipa-pipa yang terendam dalam air dan air umpan *boiler* ada di dalam *shell* untuk dirubah menjadi *steam*, *fire tube boiler* memiliki struktur yang relatif sederhana. Biasanya bahan bakar seperti batubara, gas alam, atau minyak dibakar di dalam tungku *boiler*, gas panas dan asap dari pembakaran bergerak melalui ruang di antara pipa-pipa, yang menciptakan panas yang mentransfer ke air di sekitarnya.

Aplikasi *fire tube boiler* umumnya digunakan dalam aplikasi kecil hingga menengah seperti pemanasan bangunan, pengeringan, dan proses industri ringan. Meskipun *fire tube boiler* cocok untuk

sejumlah aplikasi, pemilihan jenis *boiler* harus didasarkan pada kebutuhan spesifik, tekanan, dan kapasitas produksi uap yang diinginkan.

#### b. *Water Tube Boiler*

*Water tube boiler* adalah jenis *boiler* dimana air mengalir melalui pipa-pipa (*tube*) dan gas panas mengelilingi pipa-pipa tersebut. *Water tube boiler* memiliki struktur yang lebih kompleks dibandingkan dengan *fire tube boiler*. Prinsip kerja *water tube boiler* yaitu air umpan di pompa ke dalam pipa-pipa *boiler*, Gas panas dari pembakaran mengelilingi pipa-pipa tersebut sehingga menghasilkan uap. Aplikasi *water tube boiler* umumnya digunakan dalam industri besar seperti pembangkit listrik tenaga uap, industri kimia, dan proses industri berat lainnya. *Water tube boiler* ini adalah konstruksi dan pemeliharaan yang lebih rumit dibandingkan dengan *fire-tube boiler* dan juga harus dibutuhkan lebih banyak waktu untuk memanaskan *boiler*, sehingga perlu diperhatikan saat memilih jenis *boiler* yang cocok sesuai dengan kebutuhan, dan efisien (Moran, et.al., 2010).



**Gambar 2.1** Perbedaan *Water Tube Boiler* dan *Fire Tube Boiler*

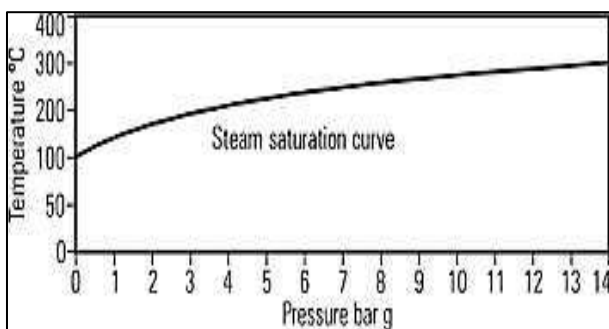
### 2.2 Proses Pembentukan Steam dalam Boiler

*Steam* merupakan fase uap air yang terbentuk ketika air mendidih. Bahan baku yang digunakan untuk menghasilkan steam adalah air bersih dan bebas dari kontaminasi, untuk mencegah kerusakan pada peralatan dan meningkatkan efisiensi *boiler*, maka air harus dilakukan proses *water treatment*. Setelah proses tersebut air dialirkan menggunakan pompa ke *daerator tank* hingga pada level yang ditentukan. Pemanasan dilakukan dengan menggunakan bahan bakar, seperti

batubara, gas alam, atau minyak, yang dibakar di dalam tungku *boiler*.

Panas yang dihasilkan dari pembakaran tersebut ditransfer ke air di dalam *boiler* melalui permukaan pemanas seperti, pipa-pipa *boiler*. Ketika air terus dipanaskan, energi panas diserap oleh molekul-molekul zat cair, yang meningkatkan energi kinetik hal ini menyebabkan molekul-molekul zat cair bergerak lebih cepat hingga melebihi energi ikatan antar molekul. Akibatnya, ikatan antar molekul dalam air menjadi lemah, dan molekul-molekul individu mulai terlepas dari permukaan cairan untuk membentuk fase gas.

Ketika *steam* yang dihasilkan sudah berada dalam kondisi *saturated*, yaitu *steam* sudah pada titik jenuhnya, dimana *steam* memiliki suhu dan tekanan yang sesuai dengan kondisi jenuh pada diagram uap air. Pada titik ini, *steam* memiliki kualitas uap sebesar 100%, yang berarti uap murni tanpa ada campuran dengan air cair. Setelah *steam* mencapai kondisi jenuh, pemanasan tambahan dapat diberikan ke *steam* tanpa adanya perubahan tekanan, pemanasan ini dilakukan dengan memasukan *steam* ke dalam *superheater* yang berfungsi meningkatkan suhu *steam* di atas suhu jenuhnya. Selama *steam* melewati *superheater*, *steam* menerima energi panas tambahan tanpa mengalami kondensasi, ini menyebabkan suhu *steam* meningkat di atas suhu jenuhnya, mengubahnya menjadi *steam superheated*.



**Gambar 2.2** Kurva *Steam* Jenuh

*Steam superheated* memiliki suhu yang lebih tinggi dibandingkan *steam saturated* pada tekanan yang sama. Suhu *saturated* yang ada di dalam *boiler* sekitar

400°C-459°C. Sedangkan suhu *steam superheated* berkisar 520°C-600°C.

Hubungan antara suhu jenuh dan tekanan dikenal sebagai kurva *steam* jenuh. Pada kurva gambar 2.2 sumbu horizontal mewakili suhu dalam satuan derajat celcius, sedangkan sumbu vertikal mewakili tekanan dalam satuan bar. Kurva ini menunjukkan bagaimana tekanan *steam* berubah seiring dengan perubahan suhu, dan sebaliknya. Titik-titik dimana kurva *steam* jenuh menyentuh batas antara fase cair dan fasa uap adalah titik-titik dimana air berada dalam keadaan jenuh. Pada kondisi ini air dan uap dalam keseimbangan termal. Air dan uap dapat berada bersamaan pada berbagai tekanan dalam kurva ini, dimana keduanya akan mencapai suhu jenuh. Uap yang berada di atas kurva jenuh dikenal sebagai uap jenuh, sementara air yang berada di bawah kurva tersebut disebut air sub-jenuh (Apriani, et.al., 2021).

### 2.3 LPG (*Liquid Petroleum Gas*)

LPG singkatan dari *liquid petroleum gas*, adalah bahan bakar gas yang berasal dari gas alam dan terdiri dari campuran propana ( $C_3H_8$ ) dan butana ( $C_4H_{10}$ ). Selain itu, LPG juga mengandung hidrokarbon ringan dalam jumlah kecil misalnya etana ( $C_2H_6$ ) dan pentana ( $C_5H_{12}$ ), yang dikompresi menjadi bentuk cair dengan cara menambah tekanan dan menurunkan suhunya. Secara spesifik, jenis LPG dapat dibedakan berdasarkan proses pencairannya sebagai berikut:

#### a. LPG dalam Bentuk Cair (*Liquid Petroleum Gas / LPG Liquid*)

LPG dalam bentuk cair disimpan dalam wadah bertekanan yang dirancang khusus untuk menahan tekanan tinggi Saat dikeluarkan dari wadah, tekanan berkurang dan cairan tersebut menguap menjadi gas. Proses ini memerlukan energi panas yang diambil dari sekitarnya, sehingga dapat menyebabkan pendinginan pada sekitarnya. Biasanya digunakan untuk keperluan rumah tangga, industri, dan transportasi.

#### b. LPG dalam Bentuk Gas (*Vaporized Liquid Petroleum Gas / LPG Gas*)

LPG dalam bentuk gas disimpan dalam wadah bertekanan yang dirancang untuk menahan tekanan tinggi tetapi dengan katup pengatur tekanan. Saat digunakan, gas LPG dikeluarkan dari wadah dan langsung siap untuk digunakan tanpa perlu mengalami proses pencairan terlebih dahulu. Proses ini memungkinkan penggunaan yang lebih mudah dan cepat, tanpa perlu menunggu untuk mencapai kondisi penggunaan yang optimal. Biasanya digunakan untuk keperluan rumah tangga, *outdoor*, dan komersial di mana kecepatan dan kemudahan penggunaan penting (Pertamina, 2020)

#### 2.4 Efisiensi Termal Ruang Bakar

Efisiensi ruang bakar adalah ukuran seberapa baik ruang bakar Boiler mengkonversi energi kimia dalam bahan bakar menjadi energi panas melalui proses pembakaran. Untuk menentukan efisiensi termal ruang bakar. Efisiensi ruang bakar Boiler dipengaruhi oleh berbagai faktor yang saling berinteraksi. Salah satu faktor utama adalah kualitas dari bahan bakar. Bahan bakar dengan nilai kalor yang tinggi dan kandungan air, serta kotoran yang rendah akan menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna. Bahan bakar dengan kadar air yang tinggi akan menyerap panas selama pembakaran, yang mengurangi suhu pembakaran dan efisiensi. Selain itu, bahan bakar kotor dapat menyebabkan penumpukan residu pada permukaan ruang bakar, yang menghambat transfer panas dan meningkatkan konsumsi bahan bakar.

Suhu dan tekanan udara pembakaran juga sangat penting. Udara yang masuk ke ruang bakar harus memiliki suhu dan tekanan yang optimal untuk memastikan pembakaran yang efisien, udara yang terlalu dingin akan menyerap panas dari proses pembakaran, menurunkan suhu ruang bakar dan mengurangi efisiensi, sebaliknya udara yang terlalu panas dapat menyebabkan masalah seperti *over-firing*, yang bisa merusak komponen *boiler*. Pencampuran udara dan bahan bakar merupakan faktor yang penting lainnya. Jika pencampuran tidak merata, akan terjadi pembakaran yang tidak sempurna,

menghasilkan emisi yang lebih tinggi dan pemborosan energi. Kondisi dan pemeliharaan ruang bakar seperti pembersihan rutin dari kerak dan jelaga sangat penting karena penumpukan residu dapat mengurangi efisiensi transfer panas. Kerak dan jelaga bertindak sebagai isolator, mencegah panas dari pembakaran mencapai air dalam *boiler* secara efektif, sehingga meningkatkan konsumsi bahan bakar.

### 3. METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan-tahapan dalam penelitian ini digambarkan melalui bagan alir yang memberikan gambaran visual mengenai alur proses yang dilalui yang dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Bagan Alir Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam metode penelitian ini antara lain yaitu:

- 1 unit alat cross section double drum water tube boiler: 1 buah
- Kompresor : 1 buah
- Pompa : 1 buah
- Anemometer tipe digital *wind speed* GM816 : 1 buah
- Thermogun* tipe *infrared* TM 990 : 1 buah
- Flue Gas Analyzer* : 1 buah

Selain itu, bahan-bahan yang digunakan dalam metode penelitian ini meliputi:

- Feed water* yang digunakan untuk menjadi steam, baik *saturated* maupun *superheated* sebanyak 120 liter.
- LPG yang digunakan sebagai bahan bakar 3 kg untuk 1 kali percobaan.
- Udara ( $N_2$  dan  $O_2$ ) yang digunakan dalam reaksi pembakaran bahan bakar di *furnace*.

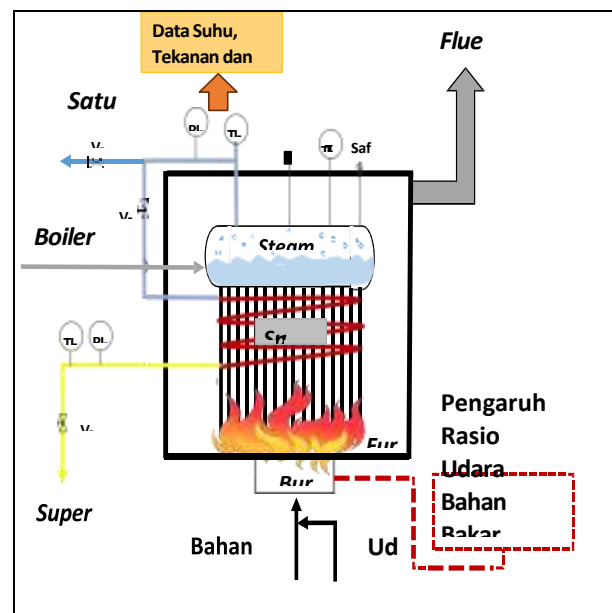
Variabel penelitian ini mengenai rancang bangun cross section *double drum water tube boiler* untuk menghasilkan produksi *saturated steam* yang berkualitas. Terdiri dari beberapa variabel penelitian diantaranya:

- Variabel tetap
  - Laju alir Bahan Bakar = 0,1 kg/menit
  - Laju alir BFW = 1,10 kg/menit
  - Laju alir Flow Steam = 1,10 kg/menit
- Variabel bebas
  - Rasio Udara bahan bakar = (17, 19, 21, 23, 25)
- Variabel terikat
  - Tekanan, Suhu, *Entalpy*, *Flame* Temperatur, dan Warna Api

Tahap awal penelitian ini dimulai dengan kondisi operasi *boiler nonsteady state*, dimana *feed water* sebanyak 120 liter di pompakan menuju ke zona steam drum dan menuju ke *feed water drum* melalui pipa-pipa water tube yang terhubung antara *steam drum* dan *water drum*, ketika air sudah mencapai tingkat ketinggian air 50% , maka *water level control*. otomatis akan memberikan informasi sensor tersebut ke kontroler dengan menggunakan elektroda yang terendam dalam air yang bekerja berdasarkan prinsip konduktivitas listrik, sistem ini akan terus memantau level air dan membuat penyesuaian secara otomatis untuk menjaga air pada level 50%, selanjutnya bahan bakar gas LPG disiapkan dengan laju alir sebesar 0,1 kg/menit serta udara diambil dari lingkungan sekitar dan dialirkan ke ruang bakar. Boiler. Kemudian proses operasi *water tube boiler* dapat dijalankan sebanyak lima kali percobaan dengan menggunakan variasi rasio udara bahan bakar, yaitu 17, 19, 21, 23 dan 25 untuk percobaan pertama digunakan rasio udara bahan bakar yang paling kecil, yaitu AFR 17,

Setelah itu, air dipanaskan sampai mendidih, panas yang dihasilkan oleh sumber energi ditransfer ke air melalui *tube-tube* pada *boiler*, ketika panas ditransfer ke air, energi kinetik molekul air meningkat, menyebabkan kenaikan suhu dan perubahan fase menjadi uap. Uap yang dihasilkan memiliki tekanan tinggi karena proses ini terjadi di dalam tabung-tabung tertutup. Proses ini berlangsung selama 20 menit untuk mencapai kondisi *steady state* dengan tekanan 7,50 bar dan suhu 167,40°C.

Pengambilan data pada kondisi *steady state* dilakukan pada laju alir *saturated steam* setelah suhu dan tekanan stabil, dengan durasi proses selama 10 menit. Setelah mencapai kondisi *steady state*, data temperatur dan tekanan *saturated steam* di catat, dimana data kondisi operasi temperatur dan tekanan dapat dikalkulasi untuk mendapatkan entalpi *saturated steam* yang selanjutnya digunakan untuk menghitung nilai efisiensi optimal.



Gambar 3.2 Alur Logika Penelitian

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian kali ini, dilakukan pengembangan alat Tube Boiler menggunakan sistem *water level control* otomatis, yang dapat mendeteksi level ketinggian air, ketika memproduksi *saturated steam* yang berkualitas, berdasarkan pengaruh rasio udara bahan bakar gas LPG yang optimal pada *tube*

boiler untuk meningkatkan efisiensi dan *flame* temperatur yang tinggi sesuai dengan standar efisiensi boiler di PLTU. Setelah melalui serangkaian proses penelitian yang sesuai dengan prosedur yang telah ditetapkan, dimana dilakukan pengambilan data sebanyak 5 (lima) kali percobaan dengan rasio udara bahan bakar yang berbeda-beda didapatkan data hasil pengamatan yang telah dikumpulkan dan didokumentasikan secara lengkap dalam tabel-tabel berikut ini.

**Tabel 4.1** Data Kondisi Operasi di Ruang Bakar Boiler

No	Udara			Bahan Bakar		Rasio Udara /BB (AFR)	Temp Flame (°C)	CO (%)
	Kec. Udara (m/s)	Flow Udara		Flow BB				
		(L/min)	(kg/min)	(L/min)	(kg/min)			
1	18,80	1416,6	1,70	0,07	0,1	17	742,63	0,72
2	21,01	1583,3	1,90			19	757,94	0,67
3	23,22	1750,0	2,10			21	773,95	0,63
4	25,43	1916,6	2,30			23	795,64	0,61
5	27,65	2083,3	2,50			25	798,66	0,61

**Tabel 4.2** Data Kondisi Operasi di Steam Drum Boiler

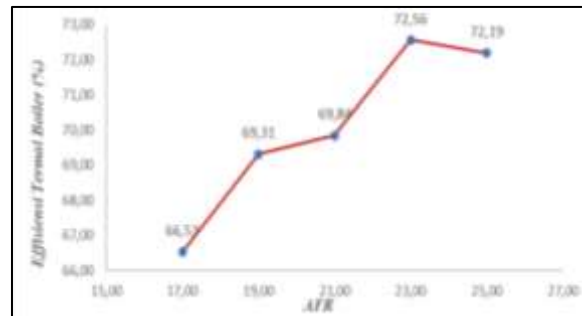
No	Steam Drum				
	Level Ketinggian Air (% LD)	Bfw		TI-1 (°C)	PI-1 (Bar)
	(% LD)	(L/min)	(kg/min)	(°C)	(Bar)
1	50	1,10	1,10	167,40	7,50
2		1,10	1,10	173,50	8,50
3		1,10	1,10	175,20	9,00
4		1,12	1,12	176,00	9,30
5		1,11	1,11	177,40	9,50

**Tabel 4.3** Data Kondisi Operasi Steam Boiler

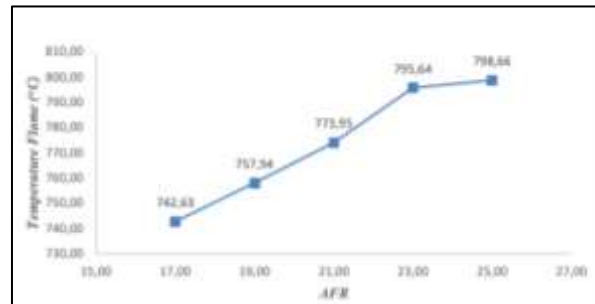
No	Steam Saturated						
	TI-2 (°C)	PI-2 (Bar)	Flow Steam		hf (kJ/kg)	hg (kJ/kg)	Hfg (kJ/kg)
	(°C)	(Bar)	(L/min)	(kg/min)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)
	(°C)	(Bar)	(L/min)	(kg/min)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)
1	167,40	7,50	1,10	1,10	703,49	2807,88	2104,39
2	173,50	8,50	1,10	1,10	724,49	2925,84	2201,35
3	175,20	9,00	1,10	1,10	732,41	2949,03	2216,62
4	176,00	9,30	1,12	1,12	741,22	3010,04	2268,83
5	177,40	9,50	1,11	1,11	742,98	3022,05	2279,07

**Tabel 4.4** Data Hasil Perhitungan Efisiensi, SFC dan Heat Loss

No	Rasio Udara /BB (AFR)	Efisiensi (%)	SFC (Kg/kJ)	Panas Hilang (Q Loss) (%)	T Saturated Tabel (°C)
		(%)	Kg/kJ	(%)	(°C)
1	17	66,53	0,0000324	33,47	167,75
2	19	69,31	0,0000311	30,69	172,94
3	21	69,84	0,0000308	30,16	175,40
4	23	72,56	0,0000297	27,44	176,75
5	25	72,19	0,0000298	27,81	177,70



**Gambar 4.1** Grafik Hubungan Rasio Udara Bahan Bakar Terhadap SFC



**Gambar 4.2** Grafik Hubungan Rasio Udara Bahan Bakar Terhadap Flame Temperatur

AFR (*Air Fuel Ratio*) merupakan rasio antara jumlah udara dan bahan bakar yang disuplai dalam proses pembakaran (Heywood, 1988), sementara efisiensi termal mengukur seberapa efektif energi bahan bakar diubah menjadi energi panas yang digunakan untuk menghasilkan uap. Dari Gambar 4.1, terlihat bahwa pada AFR 17, efisiensi termal meningkat secara signifikan dari 6,53% menjadi 69,31%. Hal ini disebabkan oleh peningkatan pembakaran yang lebih sempurna, yang menghasilkan lebih sedikit karbon monoksida dan hidrokarbon yang tidak terbakar, sehingga lebih banyak energi bahan bakar diubah menjadi energi panas,

menyebabkan suhu pembakaran yang lebih tinggi (Perry, 2007). Namun, laju peningkatan efisiensi termal mulai menurun saat AFR meningkat dari 19 hingga 21, dengan kenaikan hanya sebesar 3,74%. Ini menunjukkan bahwa pembakaran mendekati kondisi optimal, dimana meskipun AFR masih meningkat, efisiensi termal hanya bertambah sedikit. Pada AFR 23 dan 25, laju peningkatan efisiensi termal menurun drastis, mengindikasikan bahwa kondisi optimal telah tercapai dengan efisiensi maksimum sebesar 72,56% pada AFR 23. Pada AFR 25, efisiensi termal justru menurun menjadi 72,19% akibat pembakaran yang lebih dingin karena kelebihan udara, yang mengurangi suhu gas buang dan efisiensi termal. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa rasio udara-bahan bakar optimal untuk efisiensi termal maksimum boiler adalah 23, dengan efisiensi 72,56%.

Meskipun efisiensi meningkat seiring peningkatan rasio udara-bahan bakar, penting untuk dicatat bahwa efisiensi yang tinggi belum tentu efisiensi optimal karena adanya kehilangan panas yang tidak dapat dihindari dalam proses pembakaran. Oleh karena itu, pengaturan rasio udara-bahan bakar yang tepat sangat penting untuk mencapai efisiensi termal maksimum pada boiler (Sutikno, 2022). Penelitian ini juga menunjukkan bahwa pembakaran menggunakan bahan bakar gas LPG mencapai efisiensi 72,56%, lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar solar yang hanya mencapai 62% (Aldina et.al., 2022). Efisiensi yang lebih tinggi pada LPG disebabkan oleh pembakaran yang lebih sempurna dan nilai kalor yang lebih tinggi, yang menghasilkan konversi energi yang lebih efektif dan emisi yang lebih rendah, sehingga mengurangi kerugian energi terkait pengendalian polusi. Suhu nyala (*flame temperature*) juga dipengaruhi oleh rasio udara-bahan bakar, dimana peningkatan rasio menyebabkan suhu nyala yang lebih tinggi. Pada Gambar 4.2 menunjukkan bahwa suhu nyala meningkat seiring peningkatan rasio udara-bahan bakar dari 17 hingga 25.

Namun, laju peningkatan suhu nyala melambat pada AFR 17 hingga 19 karena kurangnya oksigen untuk pembakaran sempurna. Peningkatan signifikan terjadi pada AFR 19 hingga 23, dengan suhu nyala mencapai 795,64°C, mendekati kondisi pembakaran optimal. Namun, pada AFR 25, terjadi penurunan laju peningkatan suhu akibat oversaturasi udara, yang menyebabkan sebagian energi panas diserap oleh udara berlebih, sehingga menurunkan suhu nyala (Apriani, 2021). Dari data suhu nyala, dapat disimpulkan bahwa rasio optimal udara bahan bakar untuk pembakaran LPG adalah 23, dengan suhu nyala sebesar 795,64°C. Pengaturan udara berlebih merupakan kunci untuk mencapai pembakaran sempurna dan efisiensi termal maksimum, namun harus dihindari kelebihan udara yang berlebihan karena dapat menurunkan efisiensi termal.

## 5. KESIMPULAN

Setelah melakukan penelitian pengaruh rasio udara bahan bakar gas LPG terhadap *flame temperature* dan efisiensi termal *water tube boiler* pada produksi proses *continue, saturated steam* dapat disimpulkan bahwa efisiensi termal optimal terdapat pada rasio udara bahan bakar 23 dengan efisiensi termalnya 72,56 %. Rasio udara bahan bakar juga berpengaruh pada nilai *flame temperatuer*, yang menghasilkan suhu nyala yang maksimal, yaitu 795,10°C. Penyesuaian rasio yang tepat dapat mengurangi konsumsi bahan bakar dan meningkatkan output energi tanpa menambah polusi, karena pengaturan rasio udara-bahan bakar yang tidak tepat berdampak pada emisi gas buang.

## DAFTAR PUSTAKA

Alidina, D., Arga, E., Ridwan, K. A., Syakdani, A., Studi, P., Energi, T., Kimia, J., dan 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*. Vol. 2(1), 33–40.

Apriani, M., Susanti, A., Moneta Has, C., Manggala, A., & Teknik Kimia Program Studi Teknik Energi Politeknik Negeri Sriwijaya Jl Sriwijaya Negara Bukit Besar, J. 2021. Pengaruh Rasio Udara Bahan Bakar Lpg Terhadap *Flame Temperature Dan Efisiensi Termal Cross Section Water Tube Boiler Effect of Lpg Air Fuel Ratio on Flame Temperature and Thermal Efficiency of Cross Section Water Tube Boiler*. *Jurnal Kinetika*, 12(03), 19–25. <https://jurnal.polsri.ac.id/index.php/kimia/index>

Aswan, A., Sulsilowati, E., & Juriwon. 2017. *Analisis Energi Boiler Pipa Air Menggunakan Bahan Bakar Solar*. *Jurnal Hasil Penelitian dan Ulasan Ilmiah*, 8(2), 7–13.

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. <https://jurnal.wastukencana.ac.id/index.php/teknologika/article/view/123>

Heywood, John B. "Internal Combustion Engine Fundamentals." McGraw-Hill Education, 1988.

Moran, M.J., & Shapiro, H.N. 2010. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. Wiley.

Perry, Robert H., and Don W. Green (Eds). 2007. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill Education.

Pertamina. 2020. *Spesifikasi Produk BBM, BBN & LPG*, 23.

Sutikno, A. T., Purnama, H. S., Subrata, A. C., Pamungkas, A., Arsadiando, W., & Wahono, T. 2019. *Konversi energi: Manajemen, Prinsip dan Aplikasi*.