

# Analisis Karakteristik Simulator Boiler Sebagai Acuan Perencanaan Ulang Boiler Kapasitas 100 kg/jam

Heru Kuncoro<sup>1</sup>, Nicko Pradipta<sup>1</sup>, Arief Rahman Prayuda<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Gunadarma  
Jl. Raya Margonda, No. 100, Depok, Indonesia  
\*Corresponding author: [prayudaarief24@gmail.com](mailto:prayudaarief24@gmail.com)

## Abstract

*Boilers remain one of the key components in various process industries today. Various processes such as heating, sterilization, distillation, steam production, and others still heavily rely on the role of boilers. This study aims to investigate the heat transfer characteristics during the boiling phase using a fire-tube boiler simulator with a vertical configuration fueled by LPG gas, with combustion rates of 1.64 kg/hour and 1.28 kg/hour. Additionally, this research aims to design the heat transfer surface area for another boiler with a larger capacity, based on the test results of the boiler simulator. The research methodology includes experimental and theoretical testing on the boiler system, supported by data processing software to collect and analyze data. Based on the calculations, to design another boiler with a desired capacity of 100 kg/hour, a heat transfer surface area of 2.03 m<sup>2</sup> is required, with 11 pipes, each measuring 1.2 m in length. The fuel supply needed for a boiler with a capacity of 100 kg/hour is 6.52 kg of LPG per hour.*

**Keywords:** boiler simulator, firetube, energy conversion, manufacture, design.

## Abstrak

Boiler dewasa ini masih menjadi salah satu komponen utama dalam berbagai industri proses. Beragam proses seperti pemanasan, sterilisasi, distilasi, produksi uap, dan lainnya masih sangat bergantung pada peran boiler. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari karakteristik perpindahan panas pada fase pendidihan menggunakan simulator boiler tipe pipa api dengan konfigurasi vertikal berbahan bakar gas LPG, dengan laju pembakaran sebesar 1,64 kg/jam dan 1,28 kg/jam. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk merencanakan luas permukaan perpindah panas untuk boiler lain dengan kapasitas yang lebih besar, berdasarkan hasil pengujian dari simulator boiler tersebut. Metodologi penelitian yang digunakan mencakup pengujian eksperimental dan teoretis pada sistem boiler, dengan bantuan perangkat lunak pengolah data untuk mengumpulkan dan menganalisis data. Berdasarkan perhitungan yang dilakukan, untuk merancang boiler lain dengan kapasitas 100 kg/jam, diperlukan luas permukaan perpindah panas sebesar 2,03 m<sup>2</sup>, dengan jumlah pipa sebanyak 11 batang dan panjang masing-masing pipa 1,2 m. Suplai bahan bakar yang diperlukan untuk boiler dengan kapasitas 100 kg/jam ini adalah 6,52 kg LPG/jam.

**Kata kunci:** simulator boiler, pipa api, konversi energi, manufaktur, perancangan.

## 1. Pendahuluan

Boiler, sebagai perangkat penting dalam dunia industri, telah mengalami perkembangan yang signifikan seiring berjalannya waktu. Fungsi utamanya adalah menghasilkan uap, mengkonversi energi, dan penyedia panas dalam berbagai proses industri [1]. Perkembangan teknologi dan penemuan baru telah membentuk evolusi boiler, membawa dampak positif dalam hal efisiensi dan keberlanjutan industri. Adapun beberapa aspek kunci dalam perkembangan boiler menyangkut peningkatan efisiensi energi, integrasi teknologi cerdas dalam pengoperasian, ramah lingkungan,

peningkatan standar keamanan dan control, serta pemanfaatannya dalam berbagai proses industri (energi, pangan, dan kimia) [1,2,3]. Perkembangan penelitian lebih spesifik telah dilakukan termasuk dalam optimisasi penggunaan bahan bakar dan analisis kegagalan dalam penggunaan pipa api pada boiler [4,5].

Berdasarkan kebutuhan yang belum terpenuhi dalam beberapa proses industri yang lebih kecil, boiler menjadi fokus penelitian yang membutuhkan lebih banyak eksplorasi terutama boiler untuk mendukung industri pangan skala yang lebih kecil [6,7,8]. Sehingga simulator boiler

dengan kapasitas mini memiliki peran penting untuk dapat meminimalisir resiko akan keselamatan, biaya serta kompleksitas dalam proses penelitian dan pengembangan. Hasil dari simulator ini akan mampu mempelajari karakteristik boiler sehingga perancangan boiler berkapasitas kecil yang sesuai dengan kebutuhan industri dapat dilakukan dengan lebih aman dan akurat.

Dengan mempertimbangkan aspek peningkatan efektifitas akan keterbatasan ruang, penggunaan untuk skala komersil industri kecil, dan produksi uap yang cepat dalam jumlah kecil, maka boiler model pipa api vertikal dipilih dalam penelitian ini [9]. Kemudian pemilihan bahan bakar gas LPG menjadi aspek penting dalam pemilihan bahan bakar mengingat sifat gas LPG yang memiliki titik nyala yang sangat rendah, mudah menguap, dan memiliki rentang konsentrasi udara yang luas untuk pembakaran dibandingkan bahan bakar lain sehingga baik sebagai bahan bakar simulator boiler [10,11]. Langkah dalam menentukan jumlah pipa api juga dipelajari guna meningkatkan efektivitas perpindahan panas [12].

Dalam penelitian boiler simulator pipa vertikal belum banyak dilakukan penelitian, sehingga diperlukan pengembangan untuk meningkatkan kinerjanya [13]. Terdapat beberapa aspek krusial yang perlu diperhatikan guna memastikan keamanan proses pengoperasian. Pertama, dinding boiler yang transparan pada penelitian ini menjadi pilihan penting untuk memonitor proses pembentukan gelembung. Pembentukan gelembung liquid yang terjadi secara abnormal dimana kondisi gelembung tidak muncul pada temperatur yang seharusnya sangatlah dihindari dalam proses ini, sehingga penggunaan dinding transparan pada dinding boiler khususnya bertujuan untuk mendeteksi potensi *superheating*. Fenomena ini dapat menunjukkan bahwa cairan mencapai fase *superheated liquid*, kemudian secara tiba-tiba dapat memicu terjadinya ledakan, dan akan mengancam

keselamatan operator selama pengoperasian [14].

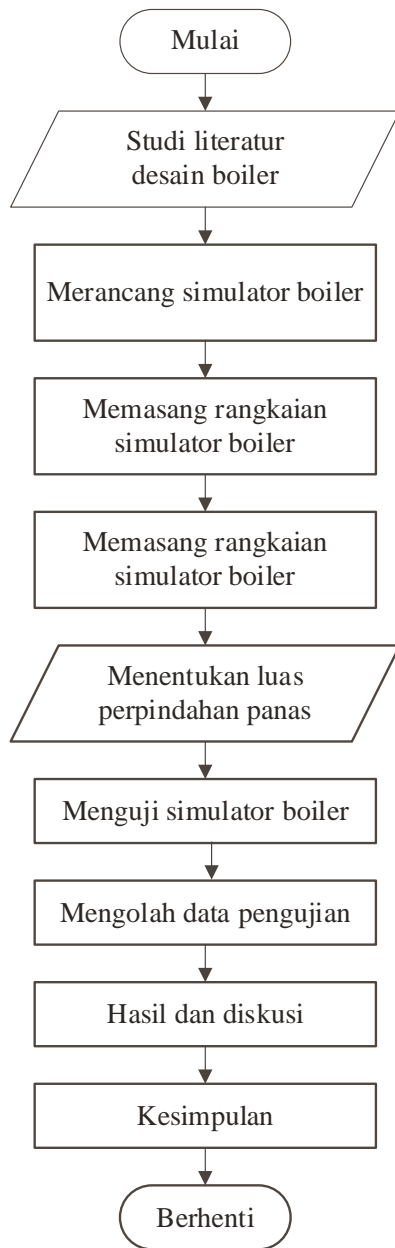
Kedua, pemilihan material *stainless steel* serta penggunaan teknologi *twister* pada pipa api dijelaskan sebagai keputusan yang didasari oleh kondisi harga material yang relatif terjangkau serta menjadi strategi untuk meningkatkan perbedaan suhu ( $\Delta T$ ) pada boiler [15,16,17]. Peningkatan intensitas perpindahan panas memiliki dampak positif dalam perancangan kapasitas boiler, terutama yang memiliki skala besar. Dengan meningkatnya intensitas perpindahan panas, boiler dapat dirancang untuk menghasilkan kapasitas yang signifikan, sambil tetap mempertahankan dimensi yang lebih kecil. Namun, peningkatan perpindahan panas yang besar pada pipa api dapat menyebabkan terjadinya fenomena *leidenfrost effect* atau *film boiling*, yaitu kondisi di mana *heat flux* berlebih terjadi dan mampu menyebabkan ketidakmenempelan fluida pada permukaan pipa api akibat pembentukan isolator termal [18,19]. Akan tetapi hal tersebut dapat diamati dan dikontrol dengan kondisi dinding boiler yang transparan.

Dengan demikian, kombinasi penggunaan material *stainless steel* yang tepat pada pipa api, pemilihan teknologi *twister*, dan pemantauan secara berkala melalui dinding boiler yang transparan menjadi langkah utama dalam menjaga keamanan dan efisiensi operasional simulator boiler. Berdasarkan beberapa aspek tersebut maka pada penelitian ini akan difokuskan untuk mempelajari karakteristik simulator boiler melalui proses analisa perhitungan dan analisa perbandingan setelah percobaan serta menentukan besar nilai pemindah panas yang efektif sebagai acuan untuk perencanaan boiler lain dengan kapasitas yang lebih besar.

## 2. Material dan Metode

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa langkah antara lain studi literatur desain boiler, perancangan simulator boiler, pemasangan simulator boiler, penentuan

luas perpindahan panas, pengujian boiler simulator, pengolahan data, hasil analisa dan diskusi, dan kesimpulan. Langkah-langkah tersebut dijabarkan pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir tahapan penelitian boiler pipa api

### 2.1 Studi Literatur Desain Boiler

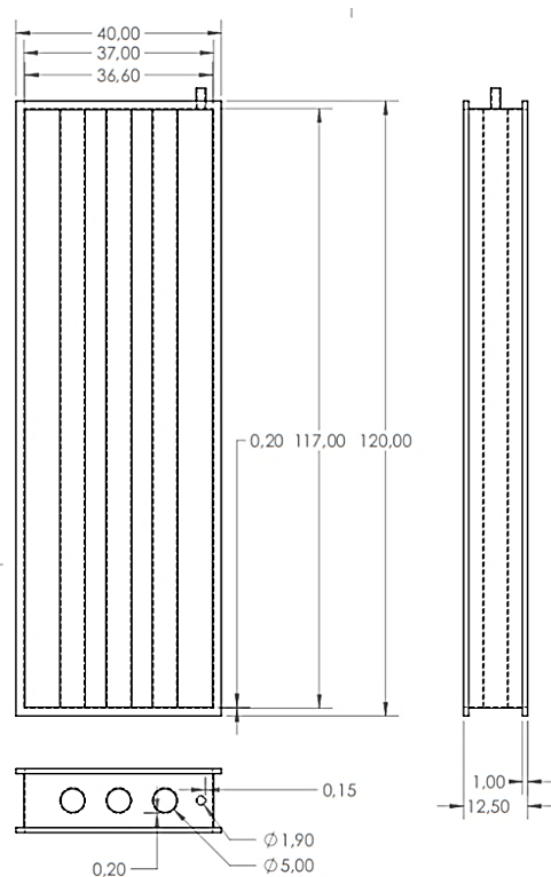
Kajian pustaka ini diperlukan sebagai bahan pokok dalam menganalisa besar nilai konduktivitas termal pada boiler. Kajian pustaka ini berisi tentang dasar teori serta referensi desain dari buku, artikel jurnal, maupun *proceeding* yang berlaku pada simulator boiler.

### 2.2 Perancangan Simulator Boiler

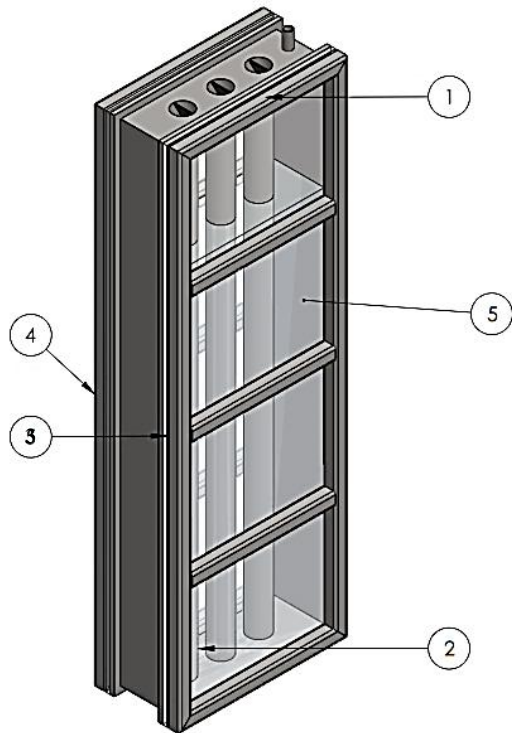
Berdasarkan studi literatur dan referensi yang telah dipelajari, maka spesifikasi simulator boiler dapat ditentukan. Berikut dimensi keseluruhan dari simulator boiler, antara lain:

Tabel 1. Detail dimensi boiler

No.	Data	Nilai
1	Panjang boiler	370 mm
2	Tebal boiler	125 mm
3	Tinggi boiler	1,200 mm
4	Diameter pipa api	50.8 mm
5	Tinggi pipa api	1,220 mm
6	Banyak pipa api	3 batang
7	Ketinggian air	1,010 mm



Gambar 2. Dimensi boiler simulator



Gambar 3. 3D desain boiler

Tabel 2. Deskripsi bagian boiler

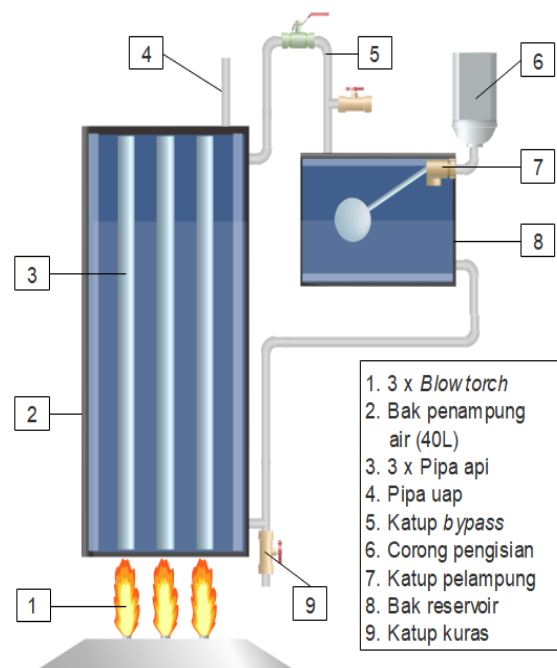
No.	Bagian	Deskripsi	Nilai
1	Plat pemanas	Iron, Blackened surface	3 lembar
2	Tube	SS304	3 batang
3	Cover Depan/ Belakang	Akrilik	2 lembar
4	Bracket	SS304	2 buah
5	Fluida	Air	40 liter

### 2.3 Pemasangan Rangkaian Simulator Boiler

Pemasangan rangkaian simulator boiler dapat dilakukan berdasarkan gambar di bawah ini yang merupakan skema rangkaian beserta detail komponennya sesuai alat simulator boiler yang akan diuji.

Adapun instalasi simulator boiler pada penelitian ini terdiri dari 3 buah *blow torch* sebagai titik sumber nyala api, tanki/ bak penampung fluida (air), 3 buah pipa api sebagai media pemanas antara api dan fluida pada boiler yang terbuat dari stainless steel 304, pipa uap sebagai media keluaran daripada uap yang dihasilkan dari proses pemanasan, katup *by pass* fluida, corong

pengisian sebagai jalur masuk fluida kerja, katup pelampung, bak reservoir dan katup kuras.

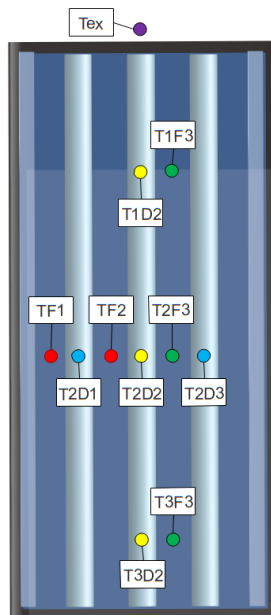


Gambar 4. Instalasi Alat Eksperimental

### 2.4 Penentuan Luas Perpindahan Panas

Proses penentuan luas perpindahan panas pada boiler menjadi penting untuk menentukan jumlah air yang akan mengisi bak penampung. Berdasarkan dimensi dari boiler didapatkan volume penuh penampungan air sebanyak 49 liter, dikarenakan konfigurasi dari alat eksperimen ini adalah boiler pipa api vertikal maka diperlukan ruang tempat untuk menampung uap dari hasil perebusan, sehingga volume penuh dari boiler dikurangi sampai kapasitas penampungan dari boiler mencapai 40 liter. Setelah didapatkan besar kapasitas penampungan air, selanjutnya adalah penempatan letak sensor suhu berupa termokopel tipe K yang berfungsi untuk mengetahui temperatur di masing-masing titik potensial untuk memotir kinerja daripada simulator boiler tersebut. Termokopel tipe K tersebut nantinya akan terhubung dengan *data logger thermometer* sebagai alat pencatat temperatur otomatis yang dapat dapat menyimpan data rekaman temperatur pada saat pengujian tengah berlangsung. Adapun

letak titik sensor suhu dan perangkat *data logger thermometer* tersebut ditunjukkan pada gambar 5 dan 6 berikut ini.



Gambar 5. Titik letak termokopel



Gambar 6. Data logger thermometer

## 2.5 Pengujian Simulator Boiler

Proses pengujian simulator boiler memerlukan beberapa parameter sebagai acuan untuk pengolahan data. Berikut beberapa parameter yang dihasilkan setelah dilakukan pengujian, antara lain temperatur (T), waktu (t), dan massa bahan bakar ( $m_{bb}$ ). Untuk parameter suhu dibagi menjadi dua bagian yaitu bagian yang terletak antara dua pipa dan yang terletak atau menempel di

dinding luar pipa api dengan pemetaan TF untuk temperatur fluida dan TD untuk temperatur dinding. Sedangkan untuk bagian waktu juga dibagi menjadi dua bagian, yang pertama adalah bagian pengukuran suhu berdasarkan waktu, kedua adalah bagian jumlah air umpan yang masuk ke dalam reservoir berdasarkan waktu habisnya. Terakhir adalah menimbang berat dari tabung gas LPG setiap kelipatan lima menit, hal ini diperlukan untuk mengetahui jumlah konsumsi bahan bakar saat perebusan pada boiler.



Gambar 7. Penghimpunan data suhu berdasarkan waktu

## 2.6 Pengolahan Data

Setelah proses pengujian simulator boiler maka akan didapatkan beberapa data yang akan menjadi data acuan untuk dapat memproses data selanjutnya.

Menentukan massa kapasitas uap yang dihasilkan oleh boiler per satuan waktu (kg/jam).

$$C_{\text{Steam}} = \frac{\left( \frac{1 \text{ liter air}}{n_2} + \dots + \frac{1 \text{ liter air}}{n_n} \right)}{n} \quad (1)$$

Produktivitas uap adalah kapasitas uap per konsumsi bahan bakar (kg uap/ kg LPG).

$$Q_{\text{Steam}} = \frac{C_{\text{Steam}}}{K_{bb}} \quad (2)$$

$$Q_{\text{Steam}} = \frac{C_{\text{Steam}}}{\Delta_w \times \Delta_n \times 5 \text{ min}} \quad (3)$$

Besar aliran energi yang berpindah di setiap satu meter persegi dalam kurun waktu 1 jam ( $\text{kJ/m}^2/\text{jam}$ ).

$$q = \frac{C_{\text{Steam}} \times Lh}{A} \quad (4)$$

Produktifitas Uap Persatuan Luas Pemindah Panas adalah massa kapasitas uap per luas area ( $\text{kg/jam/m}^2$ ).

$$CA_{\text{Steam}} = \frac{C_{\text{Steam}}}{A} \quad (5)$$

Menentukan besar energi yang dihasilkan satu kilogram bahan bakar gas LPG ( $\text{kJ/kg LPG}$ ).

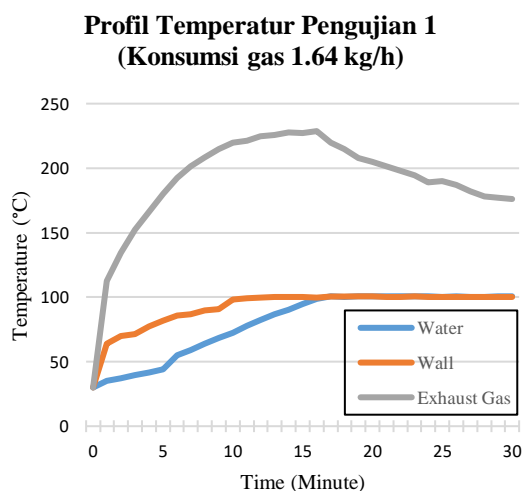
$$E_{\text{bb}} = \Delta_h \times Q_{\text{Steam}} \quad (6)$$

Sehingga pada akhirnya dapat ditentukan besar efisiensi konversi energi yang terjadi pada boiler (%).

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{bb}}}{\text{HHV}} \quad (7)$$

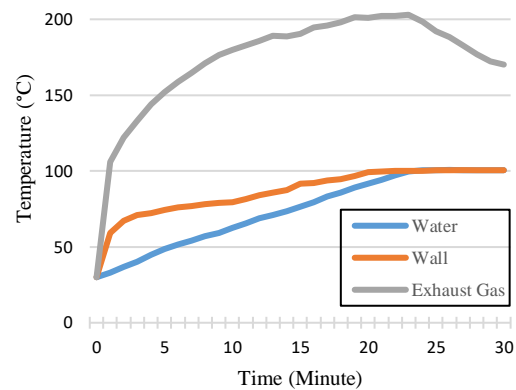
### 3. Hasil dan Pembahasan

Dalam perhitungan analisis data ini juga telah dihimpun beberapa data pengujian, berikut merupakan data dari pengujian 1 dan pengujian 2.



Gambar 8. Profil suhu pengujian 1

Profil Temperatur Pengujian 2 (Konsumsi gas 1.28 kg/h)



Gambar 9. Profil suhu pengujian 2

Tabel 3. Variabel konsumsi tiap 1 liter air umpan boiler per satuan waktu

Banyak data	Pengujian 1	Pengujian 2
1*	8.25 min	8.45 min
2	1.12 min	3.51 min
3	1.13 min	3.36 min
4	2.06 min	3.52 min
5	3.45 min	3.58 min
6	5.58 min	4.13 min
7	7.15 min	4.50 min
8	3.59 min	4.10 min
9	3.01 min	4.41 min
10	4.36 min	4.12 min

\*Tidak digunakan dikarenakan belum stabil

Tabel 4. Variabel konsumsi bahan bakar

Banyak data	Waktu	Pengujian 1	Pengujian 2
1*	0* min	17.64 kg	8.56 kg
2	5 min	17.41 kg	8.51 kg
3	10 min	17.21 kg	8.41 kg
4	15 min	16.97 kg	8.25 kg
5	20 min	16.89 kg	8.14 kg
6	25 min	16.71 kg	8.06 kg
7	30 min	16.71 kg	7.93 kg
8	35 min	16.61 kg	7.83 kg
9	40 min	16.53 kg	7.73 kg
10	45 min	16.50 kg	7.64 kg
11	50 min	16.35 kg	7.53 kg

12	55 min	16.25 kg	7.41 kg
13	60 min	16.13 kg	7.31 kg
14	65 min	15.86 kg	7.22 kg
15	70 min		7.10 kg
Konsumsi bahan bakar rata-rata		1.64 kg/jam	1.28 kg/jam

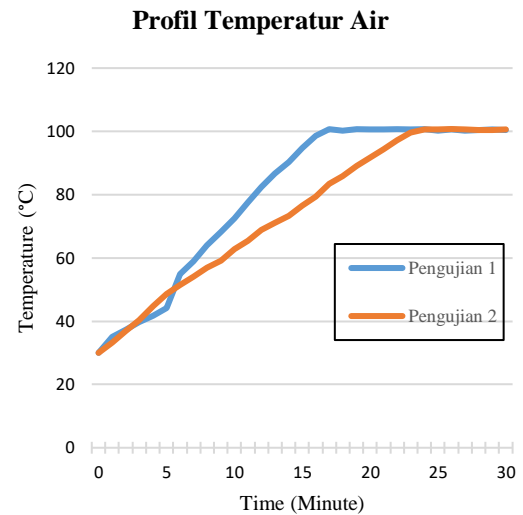
\*Berat awal sebelum pengujian

Berdasarkan grafik temperatur, tabel data konsumsi air dan tabel data konsumsi bahan bakar yang diperoleh selama proses pengujian 1 dan pengujian 2, maka dapat diperoleh informasi mengenai produktifitas uap ( $Q_{\text{steam}}$ ), produktifitas uap per satuan luas pemindah panas ( $CA_{\text{steam}}$ ), laju aliran perpindahan panas ( $q$ ), perhitungan energi penguapan per kilogram bahan bakar ( $E_{\text{bb}}$ ), dan efisiensi konversi energi ( $\epsilon$ ) pada simulator boiler yang disajikan pada tabel 5 berikut ini.

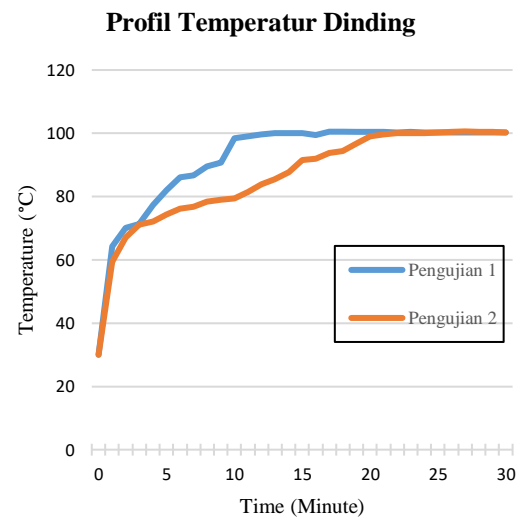
Tabel 5. Hasil pengujian variasi uap

No.	Data	Uap 1	Uap 2
1	Konsumsi bahan bakar rata-rata	1.64 kg/jam	1.28 kg/jam
2	Kapasitas uap	23.78 kg/jam	15.49 kg/jam
3	Produktivitas uap	15.35 kg uap/ kg LPG	11.89 kg uap/ kg LPG
4	Produktivitas uap per satuan luas pemindah panas	49.19 kg/jam/m <sup>2</sup>	32.04 kg/jam/m <sup>2</sup>
5	Laju perpindahan panas	166,575.33 kJ/m <sup>2</sup> /jam	108,479.76 kJ/m <sup>2</sup> /jam
6	Energi penguapan per kg LPG	34,608.35 kJ/kg LPG	28,821.66 kJ/kg LPG
7	Efisiensi konversi energi	73.50 %	56.96 %

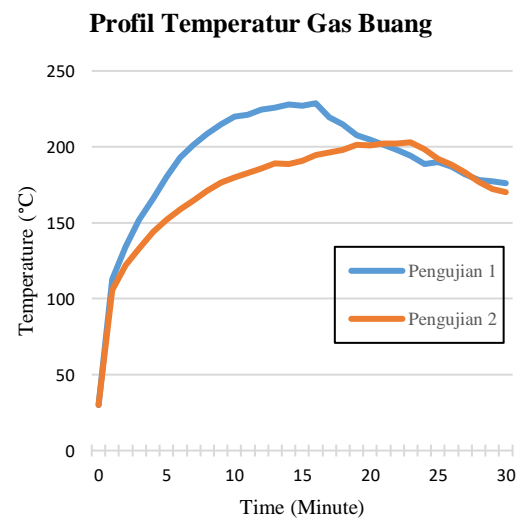
Berikut merupakan grafik masing-masing profil suhu antara pengujian 1 dengan pengujian 2 yang ditunjukkan pada gambar 10, 11, dan 12 berikut.



Gambar 10. Grafik suhu air



Gambar 11. Grafik suhu dinding pemanas/pipa api



Gambar 12. Grafik suhu pada gas buang

Berdasarkan data yang diperoleh, efisiensi konversi energi menunjukkan bahwa pengujian 1 memiliki tingkat efisiensi yang lebih tinggi yaitu sebesar 73.50% dibandingkan dengan pengujian 2 sebesar 56.96%. Hal ini terjadi akibat dari perbedaan tingkat efektivitas laju perpindahan panas dan produktivitas uap pada tiap pengujian dengan konsumsi bahan bakar yang berbeda. Efektivitas laju perpindahan panas yang terjadi dapat diamati dari grafik temperatur yang ditunjukkan pada gambar 10, 11, dan 12. Grafik tersebut menunjukkan bahwa pencapaian kenaikan temperatur pada pengujian 1 di setiap titik lebih cepat dibandingkan pengujian 2, sehingga pada pengujian 1 porsi kehilangan panas di dinding lebih rendah. Temperatur dinding luar simulator boiler untuk setiap pengujian adalah sama, akan tetapi yang membedakan ialah laju masukan panas yang berbeda dari tiap pengujian. Walaupun temperatur gas buang lebih tinggi pada pengujian 1, akan tetapi kehilangan panas pada gas buang tersebut jauh lebih kecil daripada kehilangan panas yang terjadi pada dinding boiler.

Akhirnya, berdasarkan langkah pengujian dan data yang telah dikumpulkan serta dianalisis, dapat diketahui bahwa untuk mengetahui luas perpindahan panas pada perancangan boiler dengan kapasitas produksi uap sebesar 100 kg/jam yang didasarkan pada hasil pengujian dengan tingkat efisiensi tertinggi ialah sebagai berikut:

Tabel 6. Hasil perhitungan kebutuhan boiler 100 kg/jam

No.	Data	Nilai
1	Luas pemindahan panas	1.64 m <sup>2</sup>
2	Kebutuhan pipa api	11 batang
3	Suplai bahan bakar	6.52 kg LPG/jam

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian simulator boiler yang telah dilakukan, telah diperoleh beberapa hasil dari tiap pengujian. Adapun pada pengujian 1 diperoleh konsumsi bahan bakar LPG sebesar 1.64 kg/jam dan

pengujian 2 sebesar 1.28 kg/jam. Produktifitas uap persatuan luas pemindah panas pada masing-masing pengujian sebesar 49.19 kg/jam/m<sup>2</sup> dan 32.04 kg/jam/m. Produktifitas uap persatuan konsumsi bahan bakar tiap pengujian sebesar 15.35 kg uap/kg LPG dan 11.89 kg uap/kg LPG. Efisiensi konversi energi tiap pengujian sebesar 73.5 % dan 57 %. Sehingga didapatkan karakteristik pada simulator boiler ini dimana pengoperasian boiler ini direkomendasikan pada penggunaan api besar. Hal ini dikarenakan produktivitas uap dan efisiensi konversi energi yang didapatkan jauh lebih besar.

Jika parameter yang telah dihasilkan dari simulator boiler ini dapat digunakan untuk perencanaan boiler berkapasitas 100 kg/jam maka dibutuhkan luas pemindah panas seluas 2.03 m atau jika dihitung jumlah pipa api yang dibutuhkan sebanyak 11 buah batang dengan panjang masing masing pipa 1.2 m. Sedangkan suplai bahan bakar yang dibutuhkan untuk boiler rancangan kapasitas 100 kg/jam ini diperlukan 6.52 kg LPG/jam.

#### Referensi

- [1] G. L. . Tomei, 2015. Steam : its generation and use, 43<sup>rd</sup> Ed., Babcock & Wilcox Company, North Carolina.
- [2] J. Liang, et al., 2023 A survey on intelligent optimization approaches to boiler combustion optimization. CAAI Artificial Intelligence Research 2.
- [3] E. Saloux, et al., 2023. Operation optimization of multi-boiler district heating systems using artificial intelligence-based model predictive control: Field demonstrations. Energy, 285.
- [4] U. Ibrahim, et al., 2019. Optimisation of fuel in fire tube saturated steam boiler. International Journal of Experimental Design and Process Optimisation 6.2, 189-200.
- [5] F. El Tawil, J. Khalil, and S. Shaaban. 2019. Failure mode and effect analysis of fire tube boilers under

- specific operative conditions. *Engineering Research Journal (Shoubra)* 42.1, 23-29.
- [6] Saputro, D. et al., 2021. Steam boiler technology for making soybean porridge without smell of wood burning smoke o tofu production. *Rekayasa: Jurnal Penerapan Teknologi dan Pembelajaran* 19.1, 20-27.
- [7] Susilawati, and Sahara, S., 2020. The design of mini boiler using liquefied petroleum gas (LPG) for tofu home industry. *International Journal of Psychosocial Rehabilitation* 24.
- [8] A. K. Maulana, A. Setiawan, and Wardika. 2017. Test performance of miniatur boiler for drying kerupuk with various pressure and various direction of air circuits. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin* 6.2.
- [9] F. J. Gutiérrez Ortiz, 2011. Modeling of fire-tube boilers. *Applied Thermal Engineering* 31, 3463–3478.
- [10] D. H. Tambunan, et al., 2023. Unjuk kerja kapasitas ketel uap mini menggunakan bahan bakar gas. *Sinergi Polmed: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin* 4.1, 45-59.
- [11] Akusu O. M. and Akinfaloye O. A., 2021. Design and construction of a portable boiler. *Scholars Journal of Engineering and Technology* 9, 87–92.
- [12] M. V. Fadli, and A. R. Fahrudin, 2021. The effect of mini boiler fire pipe diameter variations on steam power and efficiency. *Procedia of Engineering and Life Science* 1.1.
- [13] E. Oktaviani *et al.*, 2021. Rancang bangun boiler vertikal destilasi minyak serai wangi dengan kapasitas uap 100 kg/jam. *Inovtek-Seri Mesin* 1.2.
- [14] H. Kuncoro, Y. F. Rao, and K. Fukuda,. 1995. An experimental study on the mechanism of geysering in a closed two-phase thermosyphon. *International Journal of Multiphase Flow* 21.6, 1243-1252.
- [15] V. R. Giri, A. Kumar Jha, and T. Ratna Bajracharya,. 2019. Numerical and experimental analysis of efficiency enhancement in fire tube boiler using turbulators. *Proceedings of IOE Graduate Conference*.
- [16] A. E. Karima Amori and Rashid K Insayif,. 2011. Investigation of twisted tape turbulator for fire tube boiler. *Journal of Engineering* 17.4.
- [17] A. S. Alsagri,. 2020. Impact of twisting tapes with various pitch lengths on the exergy and entropy performances of line heaters. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 42.9, 485.
- [18] S. Rashidi, F. Hormozi, and M. M. Sarafraz,. 2021. Fundamental and subphenomena of boiling heat transfer. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 143.3, 1815–1832.
- [19] P. Prabhakaran, et al., 2019. Leidenfrost Pattern Formation and Boiling. *Journal of Statistical Physics* 175, 3–4.