

Rancang Bangun *Vertical Firetube Boiler* Skala Kecil Dengan Menggunakan Kompor Lpg Sebagai Alat Edukasi

1st Lucky Husni Rabbani

Fakutas Teknik Elektro

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

ukijagoan@telkomuniversity.ac.id

2nd Tri Ayodha A

Fakutas Teknik Elektro

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

triyodha@telkomuniversity.ac.id

3rd Nurwulan F

Fakutas Teknik Elektro

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

nurwulanf@telkomuniversity.ac.id

Abstrak - Siklus Rankine merupakan prinsip dasar yang banyak diterapkan dalam Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dan dipelajari di berbagai mata kuliah S1 Teknik Fisika Telkom University. Namun, alat peraga edukasi yang membahas materi tersebut belum tersedia. Percobaan *boiler* skala kecil ini bertujuan untuk membantu menyediakan alat edukasi terkait siklus Rankine. Rancang bangun *boiler* ini melibatkan tiga tahap utama: desain, perancangan, dan pengujian. Desain dilakukan dengan mempertimbangkan aspek teknis berdasarkan standar ASME Section IV dengan memperhitungkan ketebalan plat *boiler*, *firetube*, dan *tubesheet*. Material yang digunakan adalah plat SS400 dan *seamless carbon steel* ASTM A106 Grade B. Proses pembuatan mencakup pemotongan dengan CNC *plasma cutting*, pembentukan dengan *roll bending*, serta pengelasan menggunakan metode *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW). Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi efisiensi *boiler* dengan *direct method* yang membandingkan energi kalor masukan dengan energi kalor keluaran. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan *superheater* berpengaruh terhadap kapasitas *boiler* dan produksi uap. Dengan variasi bukaan gas, efisiensi *boiler* yang diperoleh berkisar dalam rentang 46,67-55,48%. Rancang bangun *boiler* ini dikembangkan sebagai langkah awal dalam penyediaan alat edukasi siklus Rankine

Kata kunci: Siklus Rankine, *Boiler*, Kalor, Tekanan, Temperatur.

I. PENDAHULUAN

Siklus Rankine banyak diaplikasikan dalam kehidupan sehari-hari. Siklus Rankine diketahui sebagai siklus yang ideal untuk Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Pada prinsipnya, siklus ini melibatkan proses: kompresi isentropik pada pompa, penambahan kalor isobarik pada boiler, ekspansi isentropik pada turbin, dan pelepasan kalor isobarik pada kondensor[1].

PLTU sendiri merupakan pemasok listrik terbesar di Indonesia saat ini. Laporan Badan Pusat Statistik (BPS) memberitakan bahwa kapasitas terpasang Pembangkit Listrik Negara (PLN) pada 2022 adalah sebesar 73.343,76 Megawatt. PLTU sendiri

menyumbang sebanyak 37.203 Megawatt atau berarti sebanyak 50,72% kapasitas terpasang PLN [2].

Di samping itu, siklus Rankine merupakan prinsip dasar yang banyak dipelajari di perkuliahan, khususnya pada jurusan S1 Teknik Fisika Telkom University. Namun demikian, fasilitas berupa alat peraga edukasi terkait siklus Rankine belum tersedia. Maka dari itu, diperlukan proses yang dilakukan untuk menyediakan alat edukasi terkait siklus Rankine. Rancang bangun *boiler* ini ditunjukkan sebagai langkah awal untuk membantu menyediakan alat edukasi siklus Rankine.

Boiler adalah salah satu bagian siklus Rankine, selain pompa, turbin, dan kondensor [3]. *Boiler* adalah bejana tertutup yang berfungsi untuk mengkonversi energi yang berasal dari bahan bakar menjadi kalor melalui proses pembakaran dan menghasilkan uap pada tekanan di atas atmosfer melalui penyerapan kalor yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar [4]. Penggunaan kompor LPG konvensional dalam perancangan ini bertujuan untuk kemudahan dalam pengoperasian.

II. DASAR TEORI DAN METODOLOGI/PERANCANGAN

Berikut adalah dasar teori dan metodologi yang digunakan dalam perancangan *boiler* skala kecil ini.

A. Ketebalan Plat *Boiler*

Kebutuhan ketebalan plat *boiler* yang digunakan dirumuskan menggunakan American Society of Mechanical Engineers (ASME) Section IV. Perhitungan ini digunakan untuk menghitung kebutuhan ketebalan plat supaya *boiler* yang dirancang dapat menahan tekanan perancangan yang diinginkan. Hal ini dilakukan untuk memastikan *boiler* aman saat dioperasikan.

1. Selimut *boiler*

Untuk mengetahui ketebalan minimum yang dibutuhkan selimut *boiler* supaya dapat menahan tekanan perancangan, digunakan persamaan di bawah berdasarkan persamaan ASME Section IV HG-301.1[5][6][7].

$$t = \frac{PR}{SE-0,6P} \quad (1)$$

Keterangan:

t = Tebal dinding yang dibutuhkan (inci)

P = Tekanan perancangan tidak kurang dari 30 psi (2 bar)

S = *Maximum Allowable Stress* (psi)

R = Jari-jari dalam tabung (inci)

E = Efisiensi sambungan pengelasan (0,85)

2. Firetube

Ketebalan mininaml *firetube* dibutuhkan *firetube* supaya dapat menahan tekanan perancangan, digunakan prosedur pencarian berdasarkan ASME Section IV HG-312.2 yang meliputi rumus-rumus di bawah [5][6][7].

$$\frac{L}{Do} \quad (2)$$

$$\frac{Do}{t} \quad (3)$$

$$Pa = \frac{B}{Do/t} \quad (4)$$

$$Pa > P \quad (5)$$

Keterangan:

Pa = Tekanan (psi)

B = Faktor B (dapat dilihat pada tabel)

L = Panjang *firetube* (inci)

Do = Diameter luar *firetube* (inci)

3. Tubesheet

Digunakan perhitungan berdasarkan ASME Section IV HG-346.1 yang meliputi rumus di bawah [5][6][7].

$$t = \sqrt{\left(\frac{P}{CS}\right) \left(p^2 - \frac{\pi D^2}{4}\right)} \quad (6)$$

Keterangan:

t = Tebal pelat yang dibutuhkan (inci)

p = Maksimal jarak antar pipa api pengelasan

$C = 2,7$ Faktor untuk pipa api pengelasan ketebalan kurang dari 11 mm (7/16 inci)

$C = 2,8$ Faktor untuk pipa api pengelasan ketebalan lebih dari 11 mm (7/16 inci)

S = *Maximum Allowable Stress* (psi)

P = Tekanan perancangan (psi)

D = Diameter luar pipa *firetube* (inci)

B. Efisiensi Boiler

Efisiensi *boiler* dihitung menggunakan *direct method*, yaitu melalui hasil persentase kalor yang diterima *boiler* dengan kalor masukan dari hasil pembakaran tungku. Berikut adalah persamaan efisiensi *boiler* [5][6][7].

$$\eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \times 100\% \quad (7)$$

$$\eta = \frac{\dot{m}_{air} (h_2 - h_1)}{(\dot{m}_{LPG} \times LHV)} \times 100\%$$

Keterangan:

G = kapasitas *boiler* (kg/jam)

h_2 = entalpi keluaran pipa superheater (J/kg)

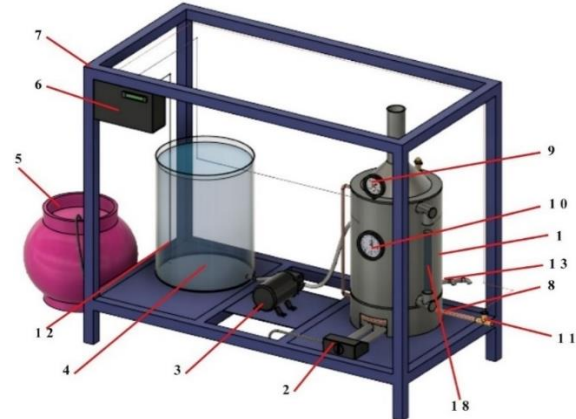
h_1 = entalpi masukan dari tangki pengisian (J/kg)

III. PEMBAHASAN

Rancang bangun *boiler* ini memiliki tiga proses: desain, perancangan, dan pengujian. Berikut adalah pembahasan mengenai tiap proses yang dilakukan.

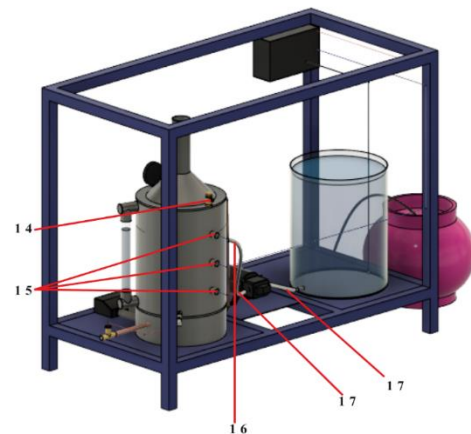
A. Desain

Desain sistem secara keseluruhan memiliki spesifikasi sebagai berikut.



GAMBAR 3.1

Desain keseluruhan sistem tampak depan samping



GAMBAR 3.2

Desain keseluruhan sistem tampak belakang

Gambar 3.1 dan 3.2 menunjukkan desain keseluruhan sistem *boiler* yang akan dibuat. Terdapat beberapa komponen sebagai berikut.

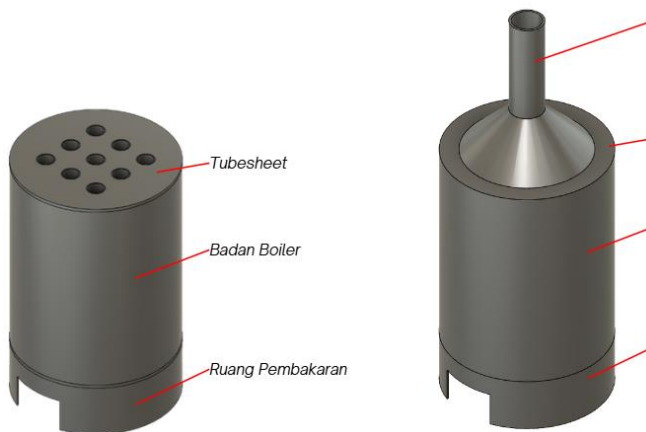
- | | |
|------------------------------------|--|
| 1) Vertical <i>firetube boiler</i> | 11) Sensor suhu MAX6675+Thermometer type K |
| 2) Kompor | 12) Sensor suhu DS18B20 |
| 3) Pompa | 13) Kran pembuangan air <i>boiler</i> |
| 4) Tangki air | 14) <i>Safety valve</i> |
| 5) Gas LPG 3 kg | 15) Sensor level air |
| 6) Kotak Sistem kontrol | 16) <i>Check valve</i> |
| 7) Rangka utama | 17) Selang tahan panas |
| 8) Pipa <i>superheater</i> | 18) Gelas penduga |
| 9) <i>Pressure gauge</i> | |
| 10) Termometer <i>boiler</i> | |

Komponen *boiler* yang dirancang berjenis *vertical firetube*. Spesifikasi *boiler* yang dirancang adalah sebagai berikut.

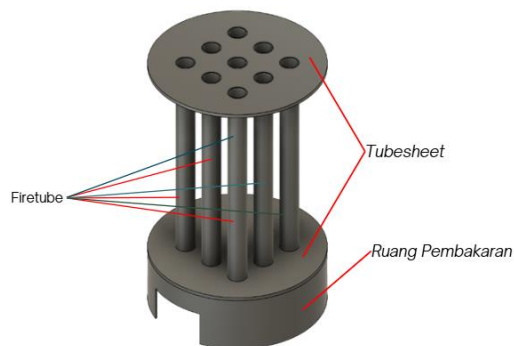
Tabel 3.1 Spesifikasi boiler

Jenis	<i>Vertical Firetube Boiler</i>
Material	<i>Mild Steel JIS SS400</i>
Tinggi	310 mm
Jari-jari	130 mm
Diameter	260 mm
Ketebalan	5 mm
Kapasitas Volume air	7,95 liter
Tekanan Desain	5 Bar

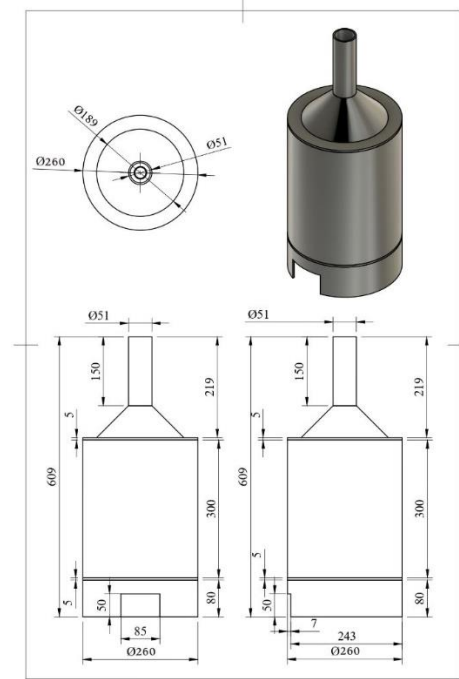
Berikut adalah gambar desain boiler yang dirancang.



GAMBAR 3.3
Bagian luar boiler



GAMBAR 3.4
Bagian dalam boiler



GAMBAR 3.5
Desain teknik boiler

1. Selimut boiler

Selimut boiler dibangun supaya dapat menahan tekanan desain sebesar 5 bar. Bahan yang digunakan pada komponen ini adalah plat mild steel JIS SS400 dengan tebal 5 mm. Berikut adalah spesifikasi bahan yang digunakan.

$$S = 11.600 \text{ psi [5][8][9]}$$

$$t = 0,2 \text{ inci (5 mm)}$$

$$R = 5,11 \text{ inci (130 mm)}$$

$$P = 72,5 \text{ psi (5 bar)}$$

$$E = 85\%[5]$$

Berikut adalah perhitungan berdasarkan persamaan (1).

$$t = \frac{PR}{SE - 0,6P} = \frac{72,5 \text{ psi} \times 5,11 \text{ inci}}{11.600 \text{ psi} \times 0,85 - 0,6 \times 72,5 \text{ psi}}$$

$$t = 0,037 \text{ inci} = 0,93 \text{ mm}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, ketebalan selimut boiler minimum yang dibutuhkan adalah 0,93 mm. Dengan demikian, penggunaan mild steel JIS SS400 dengan tebal 5 mm dinyatakan aman.

2. Firetube

Bahan yang digunakan pada komponen ini ialah *seamless carbon steel* ASTM A106 Grade B. Berikut adalah spesifikasi firetube yang digunakan.

$$Do = 1,06 \text{ inci (27 mm)}$$

$$t = 0,19 \text{ inci (3 mm)}$$

$$D = 1,06 \text{ inci (27 mm)}$$

$$L = 12,2 \text{ inci (310 mm)}$$

$$P = 72,5 \text{ lb/in}^2 \text{ (5 bar)}$$

$$T = \text{Temperatur Perancangan} = 300 \text{ F (150}^\circ\text{C)}$$

Berikut adalah perhitungan untuk mencari ketebalan minimum firetube.

Menentukan L/Do dan Do/t

$$\frac{L}{Do} = \frac{12,2 \text{ inci}}{1,06 \text{ inci}} = 11,48$$

Diasumsikan $\frac{Do}{t} = 50$

Berdasarkan ASME Section II Part D Table G dan Table CS-2, dapat diperoleh nilai Faktor A dan Faktor B pada tabel di bawah [5][6][7].

Tabel 3.2

Nilai Faktor A dan Faktor B untuk $\frac{Do}{t} = 50$

Do/t	L/Do	Faktor A	Temperatur (F)	Faktor A	Faktor B (lb/in ²)
50	10	4,58E-04	300	1,76E-05	250
50	11,48	4,51E-04	300	4,51E-04	6511,76
50	12	4,49E-04	300	7,83E-04	11300

Faktor B pada tabel 3.2 digunakan untuk mencari nilai Pa yang perlu memenuhi syarat $Pa > P$. Berdasarkan persamaan (4), nilai Pa dihitung seperti sebagai berikut.

$$Pa = \frac{B}{Do/t}$$

$$Pa = \frac{6511,76 \text{ lb/inci}^2}{50}$$

$$Pa = 130,24 \text{ lb/inci}^2$$

$$Pa > P$$

$$130,24 \text{ lb/inci}^2 > 43 \text{ lb/inci}^2$$

Syarat $Pa > P$ terpenuhi, maka $\frac{Do}{t} = 50$ dapat digunakan. Akan tetapi, untuk mencari nilai Pa yang lebih mendekati nilai P, dilakukan pencarian kembali dengan nilai $\frac{Do}{t}$ yang berbeda.

Diasumsikan $\frac{Do}{t} = 60$

Berdasarkan ASME Section II Part D Table G dan Table CS-2, dapat diperoleh nilai Faktor A dan Faktor B pada tabel di bawah [6][7].

Tabel 3.3 Nilai Faktor A dan Faktor B untuk $\frac{Do}{t} = 60$

Do/t	L/Do	Faktor A	Temperatur (F)	Faktor A	Faktor B
60	10	3,22E-04	300	1,76E-05	
60	11,48	3,18E-04	300	3,18E-04	
60	14	3,10E-04	300	7,83E-04	

Berdasarkan nilai yang diperoleh pada tabel 3.3, nilai Pa dihitung menggunakan persamaan (19).

$$Pa = \frac{B}{Do/t}$$

$$Pa = \frac{4580,43 \text{ lb/inci}^2}{50}$$

$$Pa = 76,34 \text{ lb/inci}^2$$

$$Pa > P$$

$$76,34 \text{ lb/inci}^2 > 43 \text{ lb/inci}^2$$

Syarat $Pa > P$ terpenuhi, maka $\frac{Do}{t} = 60$ dapat digunakan. Akan tetapi, untuk memastikan apakah masih terdapat nilai Pa diperoleh yang lebih mendekati nilai P, dilakukan pencarian kembali dengan nilai $\frac{Do}{t}$ yang berbeda.

Diasumsikan $\frac{Do}{t} = 80$

Berdasarkan ASME Section II Part D Table G dan Table CS-2, dapat diperoleh nilai Faktor A dan Faktor B pada tabel di bawah [6][7][10]

T

Do/t	L/Do	Faktor A	Temperatur (F)	Faktor A	Faktor B (lb/in ²)
80	10	1,86E-04	b 300	1,76E-05	250
80	11,48	1,82E-04	e 300	1,82E-04	2627,7
80	14	1,76E-04	l 300	7,83E-04	11300

Berdasarkan nilai yang diperoleh pada tabel 3.4, nilai Pa dihitung menggunakan persamaan (4).

$$Pa = \frac{B}{Do/t}$$

$$Pa = \frac{2627,7 \text{ lb/inci}^2}{80}$$

$$Pa = 32,85 \text{ lb/inci}^2$$

$$32,85 \text{ lb/inci}^2 < 43 \text{ lb/inci}^2$$

Syarat $Pa > P$ tidak terpenuhi, maka $\frac{Do}{t} = 80$ tidak dapat digunakan. Dengan kata lain, $\frac{Do}{t} = 60$ digunakan karena nilai Pa-nya yang paling mendekati nilai P.

$$t = \frac{Do}{\frac{Pa}{P} \cdot 60}$$

$$t = \frac{1,06 \text{ inci}}{60} = 0,017 \text{ inci} = 0,45 \text{ mm}$$

Berdasarkan uraian di atas, untuk menahan tekanan sebesar 5 bar, kebutuhan ketebalan minimum *firetube* adalah sebesar 0,45 mm. Dengan demikian, penggunaan *seamless carbon steel* ASTM A106 Grade B dengan ketebalan sebesar 3 mm dapat digunakan dalam perancangan ini.

3. Tubesheet

Bahan *tubesheet* yang digunakan sama dengan yang digunakan pada selimut *boiler*, yaitu *mild steel* JIS SS400 dengan tebal 5 mm. Berikut adalah spesifikasi *tubesheet* yang digunakan pada perancangan.

S = 11.600 psi [8][5][9]

C = 2,7 (ketebalan kurang dari 11 mm) [5][6]

p = 1,96 inci (50 mm)

P = 72,5 psi (5 bar)

D = 1,06 inci (27mm)

t = 0,393 inci (10 mm)

Berikut adalah perhitungan berdasarkan persamaan (6).

$$t = \sqrt{\left(\frac{P}{CS}\right) \left(p^2 - \frac{\pi D^2}{4}\right)}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{72,5 \text{ psi}}{2,7 \times 11.600 \text{ psi}}\right) \left((1,96 \text{ inci})^2 - \frac{\pi (1,06 \text{ inci})^2}{4}\right)}$$

$$t = 0,08 \text{ inci} = 2,11 \text{ mm}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, ketebalan *tubesheet* minimum yang dibutuhkan dengan bahan yang digunakan adalah 2,11 mm. Dengan demikian, pemilihan bahan ini dinyatakan aman.

B. Perancangan

Komponen *boiler* dirancang dari dua bahan, yaitu plat SS400 dan pipa *seamless carbon steel* ASTM A106 Grade B. Plat SS400 digunakan untuk bahan pembuatan selimut dan *tubesheet boiler*. Sementara pipa ASTM A106 Grade B digunakan sebagai *firetube*. Berikut adalah proses yang dilakukan dalam pembuatan *boiler*.

1. Cutting

Plat SS400 dipotong menggunakan mesin CNC *plasma cutting*. CNC *plasma cutting* merupakan teknik pemotongan material menggunakan teknologi plasma yang dikontrol melalui sistem CNC [11]. Pemotongan mengikuti desain yang sebelumnya telah ditetapkan.

2. Roll Bending

Plat SS400 yang telah dipotong untuk bahan pembuatan dinding *boiler* selanjutnya dilakukan proses roll bending. Proses *roll bending* merupakan suatu proses untuk membentuk suatu material lembaran plat menjadi bentuk silindris [12].

3. Welding

Dilakukan pengelasan menggunakan las *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) terhadap plat dan pipa. Pengelasan pada bagian dinding dan *tubesheet* dilakukan pada lapisan bagian luar dan dalam. Sementara pada pipa ke *tubesheet*, pengelasan dilakukan pada bagian luarnya.



GAMBAR 3.6
boiler setelah pengelasan

4. Instalasi Komponen Pendukung

Setelah *boiler* terbentuk, dilakukan pemasangan komponen pendukung, yaitu *safety valve*, inlet, outlet, termometer, gelas penduga dan *pressure gauge*. Komponen tersebut dihubungkan menggunakan drat besi yang dilas ke bagian *boiler*.

C. Pengujian

Berikut adalah pembahasan mengenai pengujian yang dilakukan.

1. Skema Pengujian

Metode yang digunakan pada pengujian *boiler* ini menggunakan *direct method* sesuai perasmaan. *Direct method* merupakan metode yang digunakan untuk mencari nilai efisiensi *boiler* dengan cara membandingkan kalor keluaran yang dihasilkan dari uap dengan kalor masukan yang digunakan dari bahan bakar sesuai dengan persamaan (1) [13]. Nilai efisiensi dan parameter lainnya, yaitu perubahan massa uap dan bahan bakar yang dihitung merupakan hasil rata-rata

dari efisiensi *boiler* dalam interval waktu 10 menit setelah *steady state*. Maka, efisiensi tidak dihitung berdasarkan nilai pada titik waktu tertentu, tetapi berdasarkan data yang dikumpulkan pada rentang waktu 10 menit. Misalnya, ada kondisi yang *steady state* di menit ke-10, maka efisiensi yang dihitung adalah dari menit ke-10 hingga ke-20, kemudian dari menit ke-20 hingga ke-30, dan seterusnya. Kondisi *steady state* yang dimaksud ialah ketika temperatur air di dalam *boiler* stabil. Begitu juga dengan parameter lainnya seperti laju aliran massa uap, laju aliran massa bahan bakar, dan perubahan entalpi.

Pengambilan data dilakukan hingga diperoleh sebanyak 10 data sejak *boiler* dalam kondisi *steady state* atau hingga ketinggian air di gelas penduga tidak lagi terbaca. Oleh karena itu, waktu operasi pada saat melakukan pengujian *boiler* bergantung pada tampilan gelas penduga. Dengan demikian, waktu tiap kondisi pengujian bervariasi. Ini juga berpengaruh terhadap banyaknya data yang akan diperoleh. Pengujian dilakukan berdasarkan bukaan kompor gas. Terdapat tiga variasi bukaan gas yang mewakili bukaan penuh, sedang, dan kecil. Selain itu, pengujian juga dilakukan berdasarkan penggunaan komponen *superheater*. Perlu digarisbawahi, bahwa pengujian ini dilakukan secara *batch*. Artinya selama proses pengujian berlangsung, tidak ada penambahan massa air yang masuk ke dalam *boiler*.

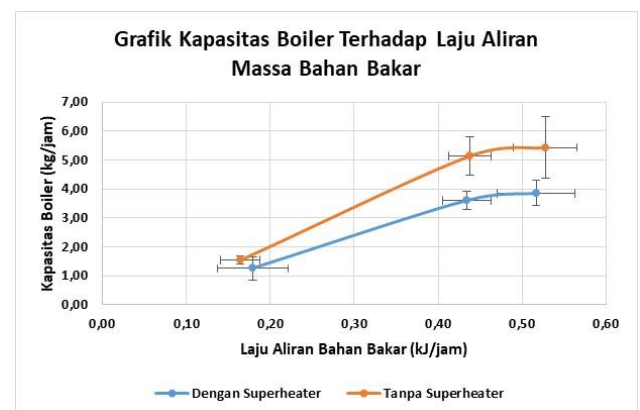
2. Hasil Pengujian

Berikut adalah parameter uji *boiler* yang diperoleh dari hasil pengujian.

Tabel 3.5 Parameter uji Boiler

Kondisi	Waktu Operasi Keseluruhan (menit)	Bukaan Gas	Δm (kg)	T_1 (°C)	P_1 (Bar)	T_2 (°C)	P_2 (Bar)	Δh (kJ/kg)	m air (kg/jam)	m LPG (kg/jam)	Efisiensi
Dengan Superheater	100	0"	10	115,0	1,69	573,46	1,69	3164,86	3,86	0,52	50,78%
Dengan Superheater	110	25"	10	115,0	1,69	544,16	1,69	3101,27	3,61	0,43	55,48%
Dengan Superheater	130	50"	10	100,0	1,01	529,46	1,01	3132,78	1,25	0,18	46,67%
Tanpa Superheater	50	0"	10	102,0	1,1	113,07	1,09	2274,54	5,44	0,53	50,65%
Tanpa Superheater	80	25"	10	102,1	1,1	116,72	1,10	2281,54	5,14	0,44	57,54%
Tanpa Superheater	130	50"	10	95,00	0,70	98,58	0,70	2278,92	1,54	0,16	46,48%

Kapasitas *boiler* sama dengan laju aliran massa uap yang dihasilkan. Berikut adalah grafik kapasitas *boiler* terhadap laju aliran massa bahan bakar.

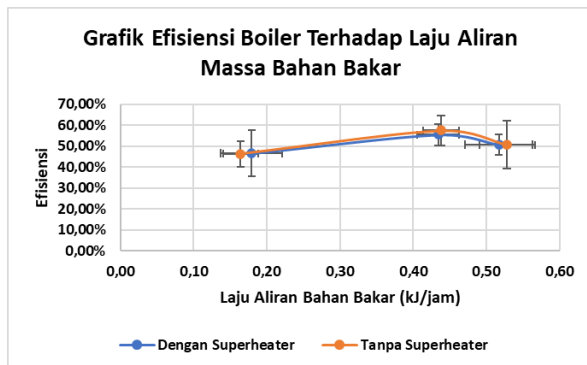


GAMBAR 3.7

Grafik Kapasitas Boiler terhadap Laju Aliran Massa Bahan Bakar

Berdasarkan grafik 3.7, *boiler* dengan *superheater* menghasilkan produksi uap yang lebih kecil

dibandingkan boiler tanpa *superheater*. Baik menggunakan *superheater* maupun tidak, keduanya memiliki nilai kapasitas tertinggi pada bukaan gas penuh atau 0°.



GAMBAR 3.8
Grafik Efisiensi Boiler

Berdasarkan tabel 3.5, dapat ditinjau bahwa penggunaan bukaan gas pada 25°, memiliki efisiensi tertinggi, yaitu sebesar 55,48% dengan kapasitas 0,43 kg/jam pada boiler dengan *superheater* dan sebesar 57,54% dengan kapasitas 0,44 kg/jam pada boiler tanpa menggunakan *superheater*. Berdasarkan nilai laju aliran massa bahan bakar, ditunjukkan bahwa bukaan gas 0° memiliki nilai terbesar, tetapi hal ini tidak membuatnya menghasilkan efisiensi boiler tertinggi 573,46°C.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan percobaan yang dilakukan, dapat ditarik kesimpulan bahwa bukaan kompor gas optimal untuk pengoperasian adalah bukaan gas sedang atau 25°. Boiler yang dirancang memiliki efisiensi sebesar 55,48% dengan kapasitas 0,43 kg/jam dengan menggunakan *superheater* pada bukaan gas 25°. Tekanan maksimum yang bekerja di dalam boiler adalah sebesar 1,69 bar. Selain itu, boiler yang dirancang dapat menghasilkan keluaran uap *superheated* dengan suhu tertinggi 573,46°C. Dengan hasil perancangan dan pengujian sistem ini dapat digunakan untuk keperluan edukasi.

REFERENSI

- [1] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 5th ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2006. Accessed: Mar. 26, 2024. [Online]. Available: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5464110/mod_book/chapter/23393/Thermodynamics%20an%20Engineering%20Approach.pdf
- [2] Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, "Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No. 15 Tahun 2019 Tentang Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal." Accessed: Mar. 25, 2024. [Online]. Available: https://ditppu.menlhk.go.id/portal/uploads/laporan/1593657762_PERMENLHK%20NO%2015%20TH%2019%20ttg%20BM%20Emisi%20Pembangkit%20Listrik%20Thermal.pdf
- [3] J. Balbus and K. Tunnell Handel, "The bottom of the barrel," 2009. [Online]. Available: www.edf.org/dirtybuildings.
- [4] E. B. Woodruff, H. B. Lammers, and Lammers. Thomas F., *Steam Plant Operation*, 10th ed. New York: McGraw Hill Education, 2017. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.accessengineeringlibrary.com/binary/mheaeworks/ef77e7968d7c60be/d15ccd70c575ba0ae219a6c4bf31d58f84197f8b8f7571ffca98ed76fa166a36/book-summary.pdf>
- [5] American Society of Mechanical Engineers, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code. IV*, 2007th ed. New York, 2007.
- [6] M. S. Putra, "RANCANG BANGUN DAN UJI UNJUK KERJA FIRETUBE BOILER BERKAPASITAS 60 KG/JAM UNTUK SKALA PROTOTIPE TEKANAN 3 BAR DENGAN EKONOMIZER," Universitas Diponegoro, Semarang, 2024. Accessed: Apr. 30, 2024. [Online]. Available: <https://eprints2.undip.ac.id/id/eprint/21289/>
- [7] E. Oktaviani and A. Gafur, "Rancang Bangun Boiler Vertikal Destilasi Minyak Serai Wangi dengan Kapasitas Uap 100 Kg/Jam," *Jurnal InovtekSeri Mesin*, vol. 1, no. 2, pp. 7–13, Jul. 2021, Accessed: May 20, 2024. [Online]. Available: <http://ejournal.polbeng.ac.id/index.php/ISM/article/download/2029/952>
- [8] Ltd Henan BEBON international international co., "SS400," Zhengzhou. Accessed: Jun. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.steel-plate-sheet.com/pdf/SS400.pdf>
- [9] Engineers Edge LLC, "Maximum Allowable Stress Values ASME Pressure Vessel Code." Accessed: Jun. 08, 2024. [Online]. Available: https://www.engineersedge.com/pressure/045vessel/maximum_allowable_stress_values_13906.htm
- [10] American Society of Mechanical Engineers (ASME), "ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II," 2010.
- [11] F. R. Ramadhan, M. D. Ramadhan, D. Muhammad, and Y. Indradewa, "Pengamatan dan Pengendalian Volume Air pada Tangki menggunakan Sensor Ultrasonik HC-SR04 dan Modul Arduino UNO," Jakarta, 2019. [Online]. Available: https://www.academia.edu/39723976/Pengamatan_dan_Pengendalian_Volume_Air_pada_Tangki_menggunakan_Sensor_Ultrasonik_HC_SR04_dan_Modul_Arduino_UNO
- [12] Y. Juliardi, "ANALISA KETEBALAN PLAT TERHADAP DAYA ROLLING PADA PROSES ELECTRIC SLIP ROLL ANALYSIS OF PLATE

THICKNESS ON ROLLING POWER IN ELECTRIC SLIP ROLL PROCESS," *DIMENSI*, vol. 6, no. 3, pp. 601–611, 2017.

- [13] S. P. Wicaksana, A. Rahmatulloh, and R. Subandi, "ANALISIS EFISIENSI BOILER FIRE-TUBE PADA PRODUKSI STPP DI PT PETROCENTRAL GRESIK MENGGUNAKAN METODE LANGSUNG DAN TIDAK LANGSUNG," *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 9, no. 3, pp. 258–265, Sep. 2023, doi: 10.33795/distilat.v9i3.3777.