

## Analisis Perpindahan Panas dan Exergi pada Boiler Wanson I Tipe Fire Tube

Eflita Yohana<sup>a</sup> \*, MSK Tony Suryo<sup>a</sup>, Iqbal Ambari<sup>b</sup>, Randa Permana<sup>b</sup>, Novi Laura Indrayani<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Dosen Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>b</sup>Mahasiswa Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

<sup>c</sup>Dosen Teknik Mesin, Universitas Islam 45 Bekasi

Jl. Cut Meutia No. 83 Bekasi Timur

\*E-mail: efnan2003@gmail.com

### Abstract

*The boiler comprises a vessel that is sealed at its base end and is provided with a fire pipe and a water pipe as a medium of heat exchange from high to low and produces a pressurized vapor in the subsequent process to produce vapor with certain temperature and pressure. The vapor produced by the boiler on saturated vapor is used as a heating working fluid and the fractionation process. The purpose of this research is to know the energy efficiency of the boiler and the rate of heat transfer that occurs in the furnace of the boiler as well as to know the exergy efficiency and exergy loss from the wanson boiler 1 type fire tube. The method of this study is mathematical analysis using the general equations of heat transfer and exergy to calculate the efficiency and exergy loss. In the furnace there is radiation heat transfer of 1942.40 kWatt, conduction 1942,40 kWatt, convection 12448,41 kWatt while heat transfer that occurs in boiler fire pipe there is 160,58 kWatt radiation, 160,58 kWatt by conduction and 101.46kWatt. From this result known heat accumulation occurs in convection heat transfer process. While efficiency of boiler based on direct and indirect calculation is 70% and 82%. While the result of the exergic analysis resulted the combat exergy loss of 1148.1627 kJ / s, the efficiency of the combustor exergy of 22.88% the loss and efficiency of the heat exchanger is 672.126 kJ / s and 44.21% while the loss and efficiency of the whole boiler is 1820.286 kJ / s and 13.29%. It can be concluded that wanson 1 boiler is in good condition because it has high efficiency which is 70% and 82% which is calculated based on mathematical analysis directly and indirectly using heat balance but in boiler furnace there is heat accumulation of 59.12 kWatt. While the exergy analysis obtained efficiently from the boiler of 13.29%*

**Keywords:** Boiler; Heat Transfer; Exergi; Efficiency.

### Abstrak

Boiler terdiri dari vessel yang tertutup pada ujung pangkalnya dan dilengkapi dengan pipa api dan pipa air sebagai media pertukaran kalor dari tinggi ke rendah dan menghasilkan uap bertekanan pada proses selanjutnya untuk memproduksi uap dengan temperature dan tekanan tertentu. Uap yang dihasilkan oleh boiler pada uap *saturated* digunakan sebagai fluida kerja pemanas dan proses fraksinasi. Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui besar efisiensi energi dari boiler dan besar laju perpindahan panas yang terjadi pada furnace dari boiler serta mengetahui besar efisiensi exergi dan rugi exergi dari boiler wanson 1 *type fire tube*. Metode penelitian ini adalah analisa secara matematis menggunakan persamaan umum perpindahan panas dan exergi untuk menghitung besar efisiensi dan kerugian exergi. Pada furnace terjadi perpindahan panas secara radiasi sebesar 1942,40 kWatt, konduksi 1942,40 kWatt, konveksi 12448,41 kWatt sementara perpindahan panas yang terjadi pada pipa-pipa api boiler ada sebesar 160,58 kWatt secara radiasi, 160,58 kWatt secara konduksi dan 101.46kWatt. Dari hasil ini diketahui penumpukan kalor terjadi pada proses perpindahan panas secara konveksi. Sementara efisiensi dari boiler berdasarkan perhitungan langsung dan tidak langsung adalah sebesar 70% dan 82%. Sementara dari hasil analisis exergi dihasilkan rugi exergi kombusternya 1148.1627 kJ/s, efisiensi eksergi kombusternya 22.88% kerugian dan efisiensi dari heat exchanger adalah 672.126 kJ/s dan 44.21% sementara kerugian dan efisiensi dari boiler keseluruhan adalah 1820.286 kJ/s dan 13.29%. Dapat disimpulkan bahwa boiler wanson 1 dalam keadaan baik karena memiliki efisien yang masih tinggi yaitu sebesar 70% dan 82% yang dihitung berdasarkan analisa matematis secara langsung dan tidak langsung menggunakan neraca panas namun pada furnace boiler terjadi penumpukan kalor sebesar 59.12 kWatt. Sedangkan analisa exergi didapat efisien dari boiler sebesar 13.29%.

**Kata kunci:** Boiler; Perpindahan Panas; Exergi; Efisiensi.

**1. Pendahuluan**

Boiler adalah bejana tertutup dimana panas pembakaran dialirkan ke air sampai terbentuk air panas atau steam. Air panas atau steam pada tekanan tertentu kemudian digunakan untuk mengalirkan panas ke suatu proses. Sistem boiler terdiri dari: sistem airumpan, sistem steam, dan sistem bahan bakar [1].

Sistem air umpan menyediakan air untuk boiler secara otomatis sesuai dengan kebutuhan steam. Sistem steam mengumpulkan dan mengontrol produksi steam dalam boiler. Pada keseluruhan sistem, tekanan steam diatur menggunakan kran dan dipantau dengan alat pemantau tekanan. Sistem bahan bakar adalah semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan. Peralatan yang diperlukan pada sistem bahan bakar tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan pada sistem [2].

Air yang disuplai ke boiler untuk diubah menjadi steam disebut air umpan. Dua sumber air umpan adalah : (1) Kondensat atau steam yang mengembun yang kembali dari proses dan (2) Air makeup (air baku yang sudah diolah) yang harus diumpankan dari luar ruang boiler dan plant proses. Untuk mendapatkan efisiensi boiler yang lebih tinggi, digunakan economizer untuk memanaskan awal air umpan menggunakan limbah panas pada gas buang sehingga didapatkan efisiensi yang maksimal [2].

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui besar efisiensi energi dari boiler dan besar laju perpindahan panas yang terjadi pada furnance dari boiler serta mengetahui besar efisiensi exergi dan rugi exergi dari boiler wanson 1 tipe fire tube.

**2. Material dan metode penelitian**

**2.1. Data penelitian**

Penelitian ini berfokus kepada analisis perpindahan panas dan analisis eksergi boiler Wanson I. Lokasi penelitian bertempat di PPSDM Migas Cepu, Jawa Tengah. Boiler Wanson I merupakan boiler jenis pipa api dengan tekanan dan kapasitas rendah, berjumlah 1 unit yang berkapasitas 6600 kg/jam dan jenisnya pipa api horizontal. Bahan bakar yang digunakan ada 3 jenis yaitu LPG, solar dan residu. LPG dan solar digunakan untuk penyalaan awal. Metode yang digunakan dalam melakukan analisis ini adalah dengan mengumpulkan data pengoperasian boiler Wanson 1 dan melakukan perhitungan matematis untuk mendapatkan hasil analisa.

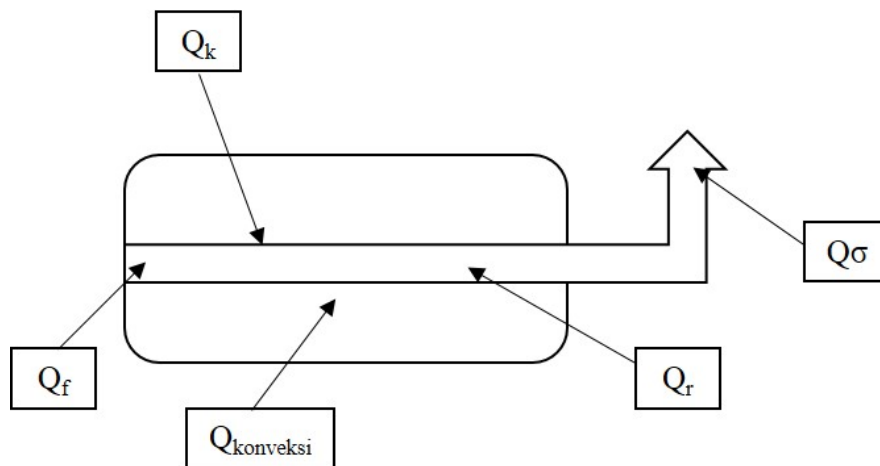
Untuk lebih jelas spesifikasi dari Boiler Wanson 1 tipe fire tube di PPSDM Migas Cepu berikut dijelaskan pada Tabel 1 dibawah ini.

**Tabel 1.** Spesifikasi Boiler Wanson I

No.	Karakteristik	Spesifikasi
1.	Tipe	Boiler fire tube
2.	Tekanan operasi	2 kg/cm <sup>2</sup>
3.	Tekanan maksimal	9 kg/cm <sup>2</sup>
4.	Kapasitas maksimum	6,6 ton/jam
5.	Temperatur maksimal	190°C

Untuk menyederhanakan dalam perhitungan, model dibuat dalam 3 sketsa dengan asumsi sebagai berikut.

- a. Energi kinetik dan energi potensial didalam sistem diabaikan.
- b. Nilai laju aliran steam dan feedwater yang terbuang di sistem *blowdown* dianggap nol.
- c. Proses pembakaran di boiler dioperasikan secara adiabatik.
- d. *Flue gas* dan *heat product* dimodelkan sebagai gas ideal. Dengan temperatur lingkungan  $T_0$  ( $T_0 = 25^{\circ}\text{C}$ ).



**Gambar 1.** Sketsa perpindahan panas boiler.

Berikut data bahan bakar dari lab kilang PPSDM Migas Cepu pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Data Bahan Bakar

No.	Karakteristik	Spesifikasi
1.	Bahan bakar	Boiler fire tube
2.	Nilai kalor	2 kg/cm <sup>2</sup>
3.	Temperatur nyala	9 kg/cm <sup>2</sup>
4.	Berat bahan bakar	6,6 ton/jam
5.	Total pemakaian bahan bakar	173,787 liter/jam

Produksi Uap yang dihasilkan boiler ditampilkan pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Produksi Uap

No.	Karakteristik	Nilai
1.	Massa uap	0.55 kg/s
2.	Tekanan operasi	3 kg/cm <sup>2</sup>
3.	Suhu uap	130 °C
4.	Entalpi lanjutan	2719 kJ/kg
5.	Entalpi air umpan	2790 kJ/kg

**2.2. Persamaan yang digunakan**

Berdasarkan asumsi-asumsi di atas maka persamaan yang digunakan adalah sebagaimana tertera dibawah ini.

Panas masuk:

$$Q = \dot{m} \times \text{LHV} \text{ (nilai kalor dari residu)} \tag{1}$$

Panas sensible bahan bakar :

$$Q_g = (1-W) \times c_{p_f} \times T_f \times \dot{m} \tag{2}$$

Panas yang dipindahkan dari gas menyala ke dinding dalam lorong api

$$Q_r = Q_f - Q_g \tag{3}$$

Laju perpindahan kalor radiasi dari nyala api ke dinding dalam lorong api :

$$Q = \sigma \epsilon A T^4 \tag{4}$$

Laju perpindahan kalor konduksi pada lorong api :

$$Q_k = \frac{2\pi kL(T_{wi} - T_{wo})}{\ln(r_o - r_i)} \tag{5}$$

perpindahan kalor didih kolam :

$$Q_d = h A (T_{wo} - T_j) \tag{6}$$

dimana,  $h = h_1 \left[ \frac{p}{p_1} \right]^{0.4}$  (7)

Besar kalor yang dihasilkan oleh air umpan saat mejadi uap air :

$$Q_{uap} = m_{air} c_p \Delta T \tag{8}$$



**Gambar 2.** Sketsa aliran eksergi combustor [4].

$$\dot{X}_{in} - \dot{X}_{out} - \dot{X}_{destroyed} = \frac{dX_{system}}{dt} = 0 ==> \text{steady}$$

$$(m_f \epsilon_f + m_a) - m_p \epsilon_p - I_C = 0$$

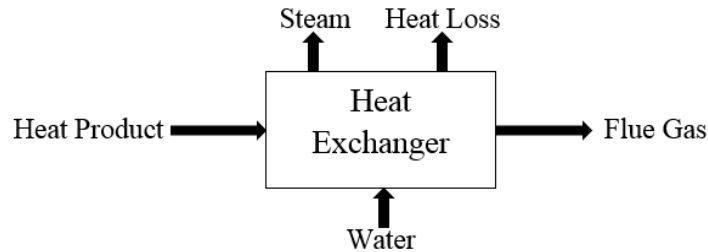
$$I_C = \dot{m}_f \epsilon_f + \dot{m}_a \epsilon_a - \dot{m}_p \epsilon_p$$

Kerugian eksergi pada combustor :

$$I_C = \dot{m}_f(h_f - T_0 s_f) + \dot{m}_a(h_a - T_0 s_a) - \dot{m}_p(h_p - T_0 s_p) \quad (9)$$

Efisiensi eksergi pada combustor :

$$\psi_C = \frac{\dot{m}_p s_p}{\dot{m}_f s_f} = \frac{\dot{m}_p (h_p - T_0 s_p)}{\dot{m}_f (h_f - T_0 s_f)} \quad (10)$$



Gambar 3. Sketsa eksergi heat exchanger [4].

Kerugian eksergi pada heat exchanger :

$$I_H = \dot{m}_H(h_p - T_0 s_p) - (\dot{m}_g(h_g - T_0 s_g) + \dot{m}_c(h_1 - T_0 s_1) - (\dot{m}_s(h_s - T_0 s_s)) \quad (11)$$

Efisiensi eksergi pada heat exchanger :

$$\psi_H = \frac{\dot{m}_c (s_s - s_1)}{\dot{m}_h (s_p - s_g)} \quad (12)$$

Total kerugian eksergi pada boiler :

$$I_B = I_C + I_H \quad (13)$$

Total efisiensi eksergi pada boiler :

$$\psi_B = \frac{\dot{m}_c (s_s - s_1)}{\dot{m}_f s_f} \quad (14)$$

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Analisa perhitungan perpindahan panas pada lorong api dan pipa api boiler Wanson 1

Besar *heat transfer* yang akan dihasilkan pada lorong api dan pipa api boiler Wanson 1 terdapat pada Tabel 4.

Tabel 4. Perpindahan panas pada lorong api dan pipa api boiler Wanson 1

No.	Karakteristik	Nilai
1.	Perpindahan panas dari bahan bakar ( $Q_f$ )	7002200 kJ/h
2.	Panas gas asap dari bahan bakar residu ( $Q_g$ )	9525.25 kJ/h
3.	Perpindahan panas secara radiasi ( $Q_r$ )	1942,40 x 10 <sup>3</sup> Watt

Dengan diketahui laju radiasi ini kita dapat menentukan suhu dinding bagian dalam dari lorong api. Dimana temperatur nyala api pembakaran menghasilkan suhu mencapai 975 °C.

#### 3.1.1 Perpindahan Panas Radiasi, Konduksi, dan Konveksi

Perpindahan panas secara radiasi pada boiler Wanson 1 terjadi pada pipa api dari nyala api pada burner dengan analisa dengan persamaan (4). Pada dinding luar kedalam dari furnace terjadi perpindahan panas secara konduksi antara dinding dalam dan luar dari lorong api dimana kita asumsikan bahwa  $Q_{radiasi} = Q_{konduksi} = Q_{konveksi}$  agar tidak terjadi penumpukan kalor pada lorong dan pipa api [5].

Berdasarkan persamaan (5) dan mengasumsikan bahwa antara dinding luar dan dalam dari lorong tidak terjadi penumpukan kalor temperatur dinding bagian luar dari lorong api (*furnance*) sehingga diasumsikan  $Q_{radiasi} = Q_{konduksi}$ . Berdasarkan persamaan (5) didapat temperature dinding bagian luar dari lorong api (*furnance*) adalah sebesar 204,53 °C hal ini telah memenuhi ketentuan *Property of saturated table* yang menjelaskan bahwa pada saat tekanan 2 bar

temperatur saturasinya adalah sebesar 120.2 °C ,sementara hasil yang didapat dari analisa perpindahan panas secara konduksi dari dinding luar adalah 204,53 °C hal ini sudah memenuhi untuk mengubah liquid menjadi *saturated vapor*.

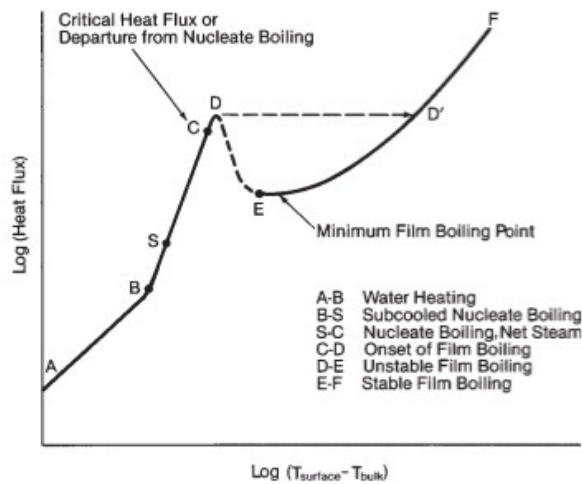
Perpindahan panas terjadi secara konveksi antara dinding luar lorong api dengan air umpan boiler. Dapat dicari dengan menggunakan persamaan (7) dan (6). Karakteristik perpindahan panas secara radiasi, konduksi, dan konveksi terdapat pada Tabel 5.

**Tabel 5.** Perpindahan panas secara radiasi, konduksi, dan konveksi pada Boiler Wanson 1

No.	Karakteristik	Suhu dinding (Tw)	Nilai
1.	Perpindahan Panas Radiasi	343°C	160,58 x 10 <sup>3</sup> Watt
2.	Perpindahan Panas Konduksi	204.53°C	160,58 x 10 <sup>3</sup> Watt
3.	Perpindahan Panas Konveksi	203°C	1014 ,63 x 10 <sup>3</sup> Watt

### 3.2 Analisa Perpindahan Panas pada Air menjadi Uap

Kurva perpindahan panas pada proses perubahan air menjadi uap pada boiler dapat dijelaskan pada Gambar 4 berikut ini.



**Gambar 4.** Kurva perpindahan panas pada boiler [6].

Setelah mengalami pemanasan oleh pipa api tadi suhu air akan menjadi 133.6 °C sehingga akan mulai terbentuk uap air *saturated* maka didapat energi panas yang terbentuk pada uap *saturated* berdasarkan persamaan (8) didapatkan kalor yang dihasilkan oleh air umpan saat mejadi uap air sebesar 2022368,417 kWatt. Sementara itu didapat besar panas laten dari air sebesar 10184888,492 kWatt

Setelah terbentuk uap *saturated* makan akan masuk ke superheater untuk di rubah menjadi uap kering yang siap digunakan untuk proses kolom pada furnance di kilang, besar perpindahan panasnya adalah 2229663.996 kWatt dengan kondisi tekanan 3 bar. Oleh sebab itu didapat panas yang hilang dari bahan bakar sebesar 1709679,095kwatt.

### 3.3 Kerugian Eksergi pada Boiler Wanson 1

#### 3.3.1 Kerugian Eksergi pada *Combustor*

Perhitungan kerugian eksergi pada *combustor* dihitung menggunakan persamaan (9). Diasumsikan pengoperasian *combustor* dalam keadaan *steady* sehingga tidak ada perubahan eksergi dalam berjalannya waktu. Perubahan laju aliran massa dan kontrol volume energi pada *combustor* dianggap nol. Kemudian juga diasumsikan gaya kinetik dan potensial pada *combustor* diabaikan.

Berdasarkan pada Tabel 6 laju alir massa bahan bakar adalah 0.04 kg/s, asumsi suhu 975K menghasilkan perbandingan entalpi 39227 kJ/kg dan entropi 1.56 kJ/kgK berdasarkan perbandingan data dengan Tabel 4.

**Tabel 6.** Data untuk laju alir massa, suhu, entalpi, dan entropi berbasis DOSH (DOSHS, 2009, REFPROP 7) [4].

No.	Substances	Mass flow rate kg/s	Temperature °C	Enthalphy kj/kg	Entropy kj/kg°C
1.	Air	4.125	126.85	400.98	1.9919
2.	Fuel	0.275	1243.99	50,050.00	2.0
3.	Hot products	4.40	250	3504.00	7.0716
4.	Water	4.22	100	419.15	1.307
5.	Steam	4.22	185.334	2782.73	6.546
6.	Flue gas	4.40	212.57	361.44	1.9

Nilai laju alir massa udara berdasarkan Tabel (2) 4.58 kg/s dengan suhu 343<sup>0</sup>C mendapatkan nilai entalpi sebesar 623.854 kJ/kg dan entropi 1.56 kJ/kg.K. Nilai laju alir massa *hot product* pada Tabel (3) adalah sebesar 0.55 kg/s. *Hot product* memiliki suhu operasi 139<sup>0</sup>C sehingga mendapatkan nilai entalpi 2737.045 kJ/kg dan nilai entropi sebesar 7.0199 kJ/kg.K. Maka berdasarkan persamaan (9) nilai kerugian eksergi pada *combustor* sebesar 1148.1627 kJ/s.

### 3.3.2 Kerugian Eksergi pada *Heat Exchanger*

Perhitungan kerugian eksergi pada *heat exchanger* seperti pada dasar teori persamaan (11). Dengan menggunakan asumsi yang sama dengan perhitungan kerugian eksergi pada *combustor*, maka perhitungan kerugian eksergi pada *heat exchanger* adalah 672.126 kJ/s.

### 3.3.3 Total Kerugian Eksergi pada Boiler

Total kerugian Eksergi pada *combustor* dan *heat exchanger* seperti pada persamaan (13) sebesar 1820.286 kJ/s.

## 3.4 Efisiensi Eksergi pada Boiler

### 3.4.1 Efisiensi Eksergi pada Combustor

Nilai efisiensi *combustor* didapatkan dengan membandingkan nilai laju alir massa *hot product*, entalpi *hot product*, dan entropi *hot product* dengan nilai laju alir massa bahan bakar, entalpi bahan bakar, dan nilai entropi bahan bakar. Efisiensi eksergi pada *combustor* didapatkan dengan persamaan (10) sebesar 22.88%.

### 3.4.2 Efisiensi Eksergi pada *Heat Exchanger*

Perhitungan efisiensi eksergi pada *heat exchanger* berdasarkan persamaan (12) adalah sebesar 44.21%

### 3.4.2 Efisiensi Eksergi pada Boiler

Efisiensi eksergi secara keseluruhan pada boiler Wanson dapat dihitung sebagai berikut sesuai dengan persamaan (14) sebesar 13.29%.

## 4. Kesimpulan

Dari hasil analisis besar perpindahan panas di lorong api kita dapat mengetahui daerah yang terjadi penumpukan kalor dan besar kalor yang terbuang dari proses perpindahan panas yang disebabkan oleh faktor-faktor penghambat seperti terbentuknya kerak pada dinding dinding luar dari pipa api boiler wanson. Dengan mengetahui hal tersebut kita dapat melakukan langkah maintenance secara preventive agar boiler bisa bekerja secara maksimal. Dari hasil perhitungan neraca panas dapat mengetahui apakah efisien kerja boiler tersebut dalam keadaan normal atau telah berada dibawah standard efisiensi yang baik. Efisiensi boiler yang baik menurut beberapa literature adalah sebesar 70 %.

Analisis Eksergi digunakan untuk mengetahui nilai eksergi yang terbuang pada setiap proses perubahan panas atau energi disetiap komponennya sehingga kita bisa memfokuskan usaha atau kebijakan untuk meningkatkan efisiensi pada boiler. Kemudian pada analisis eksergi bisa membandingkan suatu komponen atau sistem untuk membantu memberi informasi pembuatan desain atau sistem yang tepat untuk suatu pengolahan. Hasil analisa kerugian eksergi pada *combustor* didapatkan sebesar 1148.16 kJ/kg dengan efisiensi eksergi 22.88%. Sedangkan untuk nilai kerugian eksergi pada *heat exchanger* adalah 672.126 kJ/s dengan efisiensi eksergi *heat exchanger* 44.21%.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada PPSDM Migas Cepu dan Departemen Teknik Mesin Universitas Diponegoro atas dukungan dan bimbingan dalam penyusunan penelitian ini.

## Daftar Pustaka

- [1] UNEP, 2008, Boiler & Pemanas Fluida Thermis: United Nation Environment Program.
- [2] Winarto, S., 2010, Penghematan Energi pada Sistem Boiler, Jurnal forum teknologi, Vol. 04, No. 2, Hal. 35.
- [3] Soomro, K.A., 2015, Central Power Generation CO. Ltd Genco-II, Guddu: Advance Operation Course.
- [4] Saidur, dkk., 2009, *Energy, Exergy and Economic Analysis of Industrial Boiler*, ELSEVIER.
- [5] Priangkoso, T., 2015, Analisa Perpindahan Kalor Pada Lorong Api Pada Lorong Ketel Uap, Momentum.
- [6] Moran, M.J., Shapiro, H.N., 2000, *Termodinamika Teknik. Edisi 4. Jilid 1&2*. Terjemahan oleh Yulianto Sulistyono Nugroho. 2004. Universitas Indonesia: Erlangga
- [7] Bejan, A., 1988, *Advanced Engineering Thermodynamics*. Wiley, New York: Wiley.
- [8] Adibhatla, S., Kaushik, S.C., 2014, Energy and exergy analysis of a supercritical thermal power plant at various load conditions under constant and pure sliding pressure operation, Applied Thermal Engineering 73, hal. 51-65.
- [9] Holman, J.P., Jasfi, E., 1988, *Perpindahan Kalor*, Erlangga, Jakarta.
- [10] Fox, R.W., Mc Donald, A.T., Pritchard, P.J., 2010, Introduction to Fluid Mechanics, 7th Edition. New York: John Wiley & Sons.