
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

Irwan Maulana Hardi¹, Yadi Heryadi² & Wawan³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Wastukencana, Purwakarta

Corresponding author: ¹xirwanhardy@gmail.com, ²yafiyafi2014@gmail.com,

³wawan.st69@gmail.com

Abstrak. Pembangkit listrik tenaga uap terdapat ketel uap (*boiler*). Didalam pembangkit listrik tenaga panas, daya mekanik yang dihasilkan oleh mesin panas yang mengubah energi panas, sering kali dari pembakaran bahan bakar, menjadi energi putar. Sebagian besar pembangkit listrik panas menghasilkan uap, dan oleh karenanya sering juga disebut pembangkit listrik tenaga uap. Tujuan dari penelitian ini adalah mencari keefesiensian *boiler* apakah tekanan uap dan temperatur berpengaruh terhadap efesiensi boiler. Dari hasil Analisa perhitungan menggunakan metode langsung dan metode tidak langsung, nilai efesiensi *thermal* didapat nilai 54%, didapat nilai efesiensi *boiler* dengan metode langsung yang dihasilkan sebesar 62% dan nilai efesiensi *boiler* dengan metode tidak langsung yang dihasilkan sebesar 46,08%.

Kata kunci: *Boiler*, Efesiensi *Boiler*.

Abstract. Steam power plants have a steam boiler (*boiler*). In thermal power plants, mechanical power is generated by a heat engine that converts thermal energy, often from burning fuel, into rotary energy. Most thermal power plants produce steam, and are therefore often also called steam power plants. The purpose of this research is to find out the efficiency of the boiler, whether the steam pressure and temperature affect the efficiency of the boiler. From the results of the calculation analysis using the direct method and the indirect method, the value of thermal efficiency is 54%, the boiler efficiency value obtained by the direct method is 62% and the boiler efficiency value with the indirect method is 46.08%.

Keywords: *Boiler*, *Boiler Efficiency*

1 Pendahuluan

Pembangkit listrik tenaga uap terdapat ketel uap (*boiler*). Efisiensi ketel uap adalah perbandingan panas sebenarnya yang digunakan untuk memanaskan air dan pemebentukan uap terhadap panas hasil pembakaran bahan bakar. Faktor-faktor yang mempengaruhi nilai efisiensi *boiler* antara lain *steam flow*, tekanan, temperatur uap masuk *boiler*, serta tekanan dan temperatur uap keluar *boiler*. Dengan meminimalisir gangguan yang bisa kapanpun terjadi selama menjalankan produksi dengan meningkatkan efisiensi dari mesin yang menjadi bagian hal utama dalam produksi, yang pada akhirnya keunggulan kompetitif dan produksi perusahaan tersebut. Dari temperatur uap dan tekanan uap yang dihasilkan dapat digunakana memutar turbin untuk membangkitkan energi listrik melalui generator dan untuk produksi yang lain. Sistem pembangkit listrik tenaga uap terdiri dari beberapa peralatan utama diataranya *boiler*, kondenser, turbin, dan generator. Uap pada katel uap sangat mempengaruhi pasokan uap untuk turbin dan kelancaran proses produksi.

PT. Indo Bharat Rayon memiliki 3 unit boiler yaitu jenis Boiler Atmospheric Fluidized Bed Combustion, 75 t/h, 65 kg/cm², 485 °C.

Nilai dari efisiensi *Boiler Atmospheric Fluidized Bed Combustion* memiliki nilai 86,3%, akan tetapi seiring berjalannya waktu suatu boiler mengalami penurunan efisiensi. Dengan turunya efisiensi boiler akan memberi dampak terhadap penurunan efisiensi keseluruhan unit pembangkit yang tidak maksimal. Bagaimana penyebab turunya efisiensi pressure dan temperatur steam boiler di PT. Indo Bharat Rayon..

2 Kajian Pustaka

2.1 Steam Power Plant

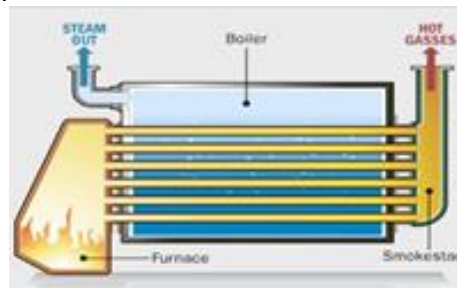
Didalam pembangkit listrik tenaga panas, daya mekanik yang dihasilkan oleh mesin panas yang mengubah energi panas, sering kali dari pembakaran bahan bakar, menjadi energi putar. Sebagian besar pembangkit listrik tenaga panas menghasilkan uap, dan oleh karenanya sering juga disebut pembangkit listrik tenaga uap.

2.2 Boiler

Boiler atau ketel uap dimana panas pembakaran dialirkan ke air sampai terbentuk uap.. Panas yang diterima seluruhnya digunakan untuk terjadi perubahan fase, pemanasan dapat dilanjutkan dari uap jenuh menjadi uap super panas. *Boiler* memiliki jenis-jenis yaitu:

2.2.1 Fire Tube Boiler

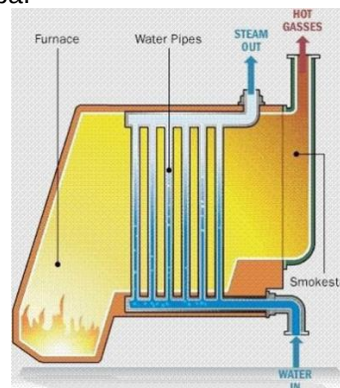
Pada boiler ini memiliki dua bagian didalamnya yaitu bagian tube yang merupakan tempat terjadinya pembakaran dan bagian barrel/tong yang berisi fluida. Tipe boiler pipa api ini memiliki karakteristik yaitu menghasilkan jumlah steam yang rendah serta kapasitas yang terbatas. Prinsip Kerjanya: Proses pengapian terjadi didalam pipa dan panas yang dihasilkan diantarkan langsung kedalam boiler yang berisi air.



Gambar 2. 1 Ilustrasi Fire Tube Boiler

2.2.2 Water Tube Boiler

Memiliki konstruksi yang hampir sama dengan jenis pipa api, jenis ini juga terdiri dari pipa dan barrel, yang membedakan hanya sisi pipa yang diisi oleh air sedangkan sisi barrel merupakan tempat terjadinya pembakaran. Karakteristik pada jenis ini ialah menghasilkan jumlah steam yang relatif banyak. Prinsip Kerja: Proses pengapian terjadi pada sisi luar pipa, sehingga panas akan terserap oleh air yang mengalir di dalam pipa.



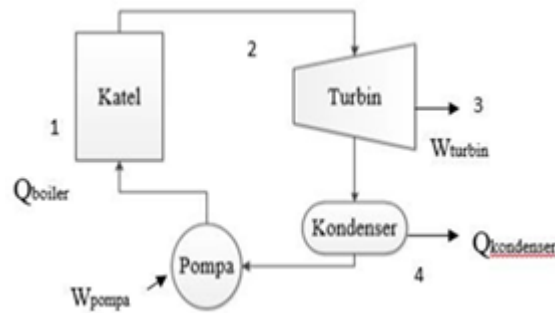
Gambar 2. 2 Ilustrasi Water Tube Boiler

2.3 Siklus Rankine

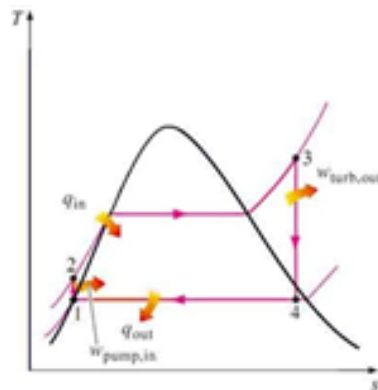
Efisiensi *boiler* atau kedayagunaan suatu mesin atau sistem konversi energi adalah ukuran kuantitas efektif (*effective quantity*) sistem yang merupakan rasio kuantitas keluaran terhadap kuantitas masukan. Dengan membandingkan kalor yang diterima air/uap terhadap kalor yang dilepaskan oleh bahan bakar.

Sebagai standar untuk pembangkit daya yang menggunakan uap (*steam*). Siklus Rankine yang digunakan dalam instalasi pembangkit daya jauh lebih rumit dari pada siklus Rankine ideal asli yang sederhana. Siklus ini merupakan siklus yang paling banyak digunakan untuk pembangkit daya

listrik sekarang ini. Oleh karena itu siklus rankine merupakan siklus uap cair maka paling baik siklus itu digambarkan dengan digram P-v dan T-s dengan garis yang menunjukkan uap jenuh dan cair jenuh, fluida kerjanya dalam air (H₂O).



Gambar 2. 3 Siklus Rankine



Gambar 2. 4 Diagram Alir Siklus Rankine

Kadar uap dalam campuran ini disebut faktor kebasahan atau sering disingkat dengan huruf X, besar faktor kebasahan dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$x = \frac{s_4 - h_{f4}}{s_{g4} - s_{f4}} \quad (1)$$

X : Faktor kebasahan (%) menyatakan persentase uap

$h_{g(h)}$: Entalpi uap pada temperatur fluida tertentu (kJ/kg)

h_f : Entalpi cair (kJ/kg)

h_{fg} : Entalpi perubahan dari cair ke gas (kJ/kg)

$S_{g(t)}$: Entropi uap pada temperatur fluida tertentu (kJ/kg.K)

S_f : Entropi cair (kJ/kg.K)

S_{fg} : Entropi perubahan dari cair k gas (kJ/kg.K)

Gas non ideal:

$$\text{Kerja Pompa} = W_p = v (P_1 - P_2) = h_2 - h_1 \quad (2)$$

Dimana:

V = Volume jenis cairan pada tekanan dan temperatur aliran fluida masuk ke pompa

P_2 = Tekanan insetropic aliran air saat keluar pompa (besarnya sama dengan tekanan aliran air saat keluar pompa)

P_1 = Tekanan air saat masuk ke pompa

Kerja *Boiler*: $Q_{in} = h_3 - h_2$ (3)

h_3 = Enthalpy uap air saat keluar dari boiler

h_2 = Enthalpy aliran air saat masuk ke *boiler*

Kerja turbin; $W_T = h_3 - h_4$ (4)

h_3 = Enthalpy uap air saat masuk ke dalam turbin

h_4 = Enthalpy aliran air saat keluar dari turbin

Kerja Kondensor: $Q_{out} = h_4 - h_1$ (5)

h_4 = Enthalpy uap air saat masuk ke dalam kondensor

h_1 = Enthalpy aliran air saat keluar dari kondensor

Efisiensi thermal siklus Rankine gas ideal sederhana: Energi masuk = Energi Keluar

$Q_{Boiler} + W_{Pompa} = W_{Turbin} + Q_{Kondensor}$

$$\eta_{thermal} = \frac{W_{pompa} - W_{turbin}}{Q_{boiler}} \times 100\% \quad (6)$$

2.4 Efisiensi *Boiler*

Efisiensi *Boiler* didefinisikan sebagai persen energi panas yang masuk yang digunakan secara efektif pada uap yang dihasilkan. Terhadap dua metode pengkajian efisiensi *boiler* yaitu:

2.4.1 Metode Langsung

Energi yang didapat dari air dan uap di bandingkan dengan energi yang terkandung dalam bahan katel uap.

$$\text{Efisiensi Boiler } (\eta) = \frac{\text{panas keluar}}{\text{panas masuk}} \times 100\%$$
$$(\eta) = \frac{W_s \times h_{\text{main steam}} - h_{\text{Feedwater}}}{W_f + GCV} \quad (7)$$

Dimana:

W_s : Kapasitas *steam* (kg/h)

$h_{\text{main steam}}$: Entalpi uap *boiler* (kcal/kg)

$h_{\text{feedwater}}$: Entalpi air umpan (kcal/kg)

W_f : Konsumsi bahan bakar (kg/h)

GCV : Nilai kalor pembakaran (kcal/kg)

2.4.2 Metode Tidak Langsung

Efisiensi merupakan perbedaan antara kehilangan dan energi yang masuk.

Langkah 1 Menghitung Kebutuhan Udara Teoritis dan Massa Udara Aktual yang disediakan:

- Kebutuhan udara teoritis
$$\frac{[(11,6 \times C) + \{34,8 \times (H_2 - O_2 / 8)\} + (4,35 \times S)]}{100 \text{ kg/kg bahan bakar}} \quad (8)$$
- Persen kelebihan udara yang dipasok/ *Excess Air* (EA)
$$\frac{O_2\%}{(21 - O_2\%)} \times 100\% \quad (9)$$
- Masaa udara sebenarnya yang dipasok/kg bahan bakar (ASS) EA
$$\left(1 + \frac{EA}{100}\right) \times \text{udara teoritis} \quad (10)$$

Langkah 2 Menghitung Persentase Kehilangan Panas:

Persentase kehilangan panas karena gas buang kering (L1)

$$\frac{m \times C_p \times (T_f - T_a) \times 100}{GCV} \quad (11)$$

Di mana,

M = massa gas buang kering dalam kg / kg bahan bakar

C_p = Panas spesifik gas buang (0,23 kCal / kg°C)

T_f = Suhu gas buang

T_a = Suhu udara sekitar

GCV = GCV bahan bakar

Persentase kehilangan panas karena penguapan air yang terbentuk karena H₂ dalam bahan bakar (L2)

$$\frac{9 \times H_2 \times (584 + C_p \times (T_f - T_a)) \times 100}{GCV} \quad (12)$$

Di mana,

H₂ = kg H₂ dalam 1 kg bahan bakar

C_p = Panas spesifik uap super panas (0,45 kCal / kg°C)

T_f = Suhu gas buang

T_a = Suhu udara sekitar

GCV = GCV bahan bakar

Persentase kehilangan panas karena penguapan yang ada dalam bahan bakar (L3)

$$\frac{M \times (584 + C_p \times (T_f - T_a)) \times 100}{GCV} \quad (13)$$

Di mana:

M = kg uap air dalam 1kg bahan bakar, C_p - Panas spesifik uap super panas (0,45 kCal / kg) ° C 584 adalah panas laten yang sesuai dengan tekanan parsial uap air.

T_f = Suhu gas buang

T_a = Suhu udara sekitar

GCV = GCV bahan bakar

Persentase kehilangan panas karena kelembaban ada di udara (L4)

$$\frac{AAS \times \text{Faktor Kelembaban} \times C_p \times (T_f - T_a) \times 100}{GCV} \quad (14)$$

Dimana,

AAS = Pasokan udara aktual

T_f = Suhu gas buang

T_a = Suhu udara sekitar

GCV = GCV bahan bakar

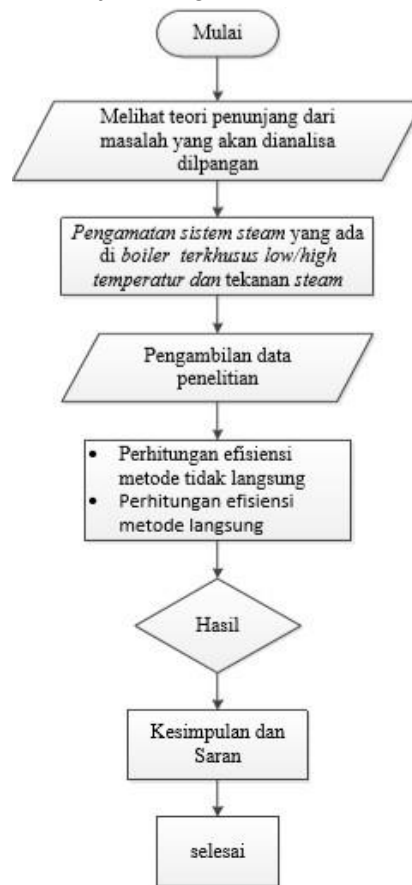
Persentase kehilangan panas karena radiasi (L5)

Langkah 3 hitung efisiensi *boiler* tidak langsung

$$\text{Efisiensi Boiler } (\eta) = 100 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5) \quad (15)$$

3 Metode

Dalam melakukan penelitian skripsi ini metode yang digunakan ada beberapa metode pengumpulan data untuk memperoleh data yang lengkap dan objektif. Dalam penelitian ini dimulai dari beberapa tahapan-tahapan diantaranya sebagai berikut:



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

1. Mengawali mulai penelitian dengan perencanaan-perencanaan dimulai dari jadwal penelitian.
2. Mencari data-data yang berkaitan dengan boiler. metode ini digunakan untuk memperoleh landasan teoritis dari beberapa referensi perusahaan dilengkapi dengan referensi lainnya yang sangat berhubungan dengan penelitian ini.
3. Meninjau secara langsung ke lapangan melihat objek yang diteliti secara langsung.
4. Melakukan diskusi atau tanya jawab secara langsung dengan pembimbing di perusahaan maupun tenaga kerja yang sedang bertugas.
5. Pengambilan data actual.
6. Selesai, yaitu merupakan tahapan akhir dari pengumpulan data-data serta menyusun laporan.

4 Hasil dan Pembahasan

4.1 Actual Data

Actual data yang diambil dalam penelitian ini adalah data pada control room di power plant

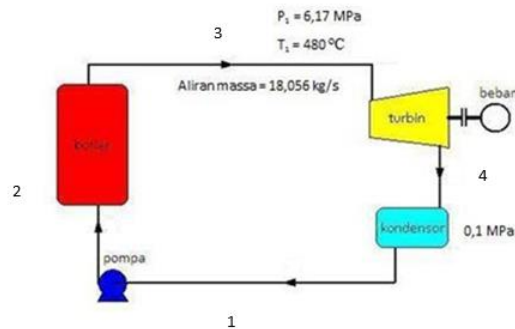
Tabel 4. 1 Actual Data

Data	Unit	Nilai
Load	MW	7,91
Main Steam Pressure	Kg/cm ²	62,9

Main Steam Temperatur	°C	484
Total Main Steam Flow	t/h	55,95
Steam Blowdown	t/h	5
Feed Water temperatur Before Eco	°C	93,28
Feed Water Press At HPH	Kg/cm ²	196,12
Coal Analysis		
Total Coal Consumption	t/h	6,77
Proximate Analysis		
Coal Fix Carbon	%	33,79
Coal Volatile Matter	%	35,37
Coal Total Moisture	%	24,53
Coal Ash	%	6,26
GCV	Kcal/kg	4928
Ultimate Analysis		
Nitrogen	%	0,94
Moisture	%	26,98
Sulphur	%	0,3
Ash	%	5,28
Oxygen	%	6,75
Carbon	%	56,21
Nitrogen	%	0,94
Hydrogen	%	3,54
Flue Gas Temperature	°C	134,04
Ambein Temperatur	°C	30
Excess Oxygen	%	7,36
STG1 COND Vaccum	mmwc	680
STG#1 main stean to turbin flow	t/h	65

4.2 Perhitungan

4.2.1 Efisiensi Thermal



$$\eta_{\text{thermal}} = \frac{W_{\text{pompa}} - W_{\text{turbin}}}{Q_{\text{boiler}}} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{thermal}} = \frac{883,491 \text{ kw} - 61,307 \text{ kw}}{2831,89 \text{ kw}} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{thermal}} = 0,29 \text{ kw} = 29\%$$

dari hasil perhitungan didapat nilai 29 % dari daya yang di berikan ke dalam boiler yang dapat diubah menjadi energi mekanis.

4.2.2 Metode Langsung

Properties:

$$W_s = 55950 \text{ kg/h}$$

$$h_{\text{main}} = 664,5 \text{ kcal/kg}$$

steam

$$h_{\text{feedwater}} = 293,5 \text{ kcal/kg}$$

$$W_f = 6770 \text{ kg/h}$$

$$\text{GCV} = 4928 \text{ kcal/kg}$$

$$\text{Efisiensi Boiler } (\eta)_A = \frac{5595 \times (664,5 - 293,5)}{6670 \times 4928} \times 100\% = 62\%$$

4.2.3 Metode Tidak Langsung

Data aktual yang diperoleh, untuk menghitung kehilangan panas yang terjadi berikut tahapan perhitungannya :

Langkah 1 Menghitung Kebutuhan Udara Teoritis dan Massa Udara Aktual yang disediakan :

- Menghitung kebutuhan udara teoritis

$$\frac{[(11,6 \times C) + \{34,8 \times (H_2 - \frac{O_2}{8})\} + (4,35 \times S)]}{100 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \text{ bahan bakar}} = \frac{[(11,6 \times 56,21) + \{34,8 \times (3,54 - \frac{6,75}{8})\} + (4,35 \times 0,3)]}{100 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \text{ bahan bakar}} = \frac{652,036 + 93,8295 + 1,305}{100 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \text{ bahan bakar}} = 7,47 \text{ kg/kg}$$

bahan bakar

- Menghitung persen kelebihan udara yang di pasok (EA)

$$\frac{0,2\% \times 100}{(21 - 0,2\%)} = \frac{7,36\% \times 100}{(21 - 7,36\%)} = 53,95\%$$

- Masaa udara sebenarnya yang dipasok/kg bahan bakar (ASS)

$$= \left(1 + \frac{EA}{100}\right) \times \text{udara teoritis} = \left(1 + \frac{53,95}{100}\right) \times 7,47 = 11,7 \text{ kg}$$

Langkah 2 Menghitung Persentase Kehilangan Panas :

Persentase kehilangan panas karena gas buang kering (L1)

$$= \frac{m \times C_p \times (T_f - T_a)}{\text{GCV}} \times 100 \quad m = 11,7 + 6,75 \text{ m} = 18,45$$

$$= \frac{18,45 \times 0,23 \times (134,04 - 30)}{4928} \times 100 = 8,9\%$$

Persentase kehilangan panas karena penguapan air yang terbentuk karena H₂ dalam bahan bakar (L₂)

$$= \frac{9 \times H_2 \times (584 + C_p \times (T_f - T_a))}{GCV} \times 100$$

$$= \frac{9 \times H_2 \times (584 + 0,45 \times (134,04 - 30))}{4928} \times 100 = 41\%$$

Persentase kehilangan panas karena penguapan yang ada dalam bahan bakar (L₃)

$$= \frac{M \times (584 + C_p \times (T_f - T_a))}{GCV} \times 100$$

$$= \frac{0,2698 \times (584 + 0,45 \times (134,04 - 30))}{4928} \times 100$$

$$= 3,4\%$$

Persentase kehilangan panas karena kelembaban ada di udara (L₄)

$$= \frac{ASS + Faktor\ kelembaban + C_p \times (T_f - T_a)}{GCV} \times 100$$

$$= \frac{11,50 \times 0,02 \times 0,45 \times (134,04 - 30)}{GCV} \times 100 = 0,22\%$$

Persentase kehilangan panas karena radiasi (L₅) 0,4%

Faktor Kehilangan Panas	% Kehilangan Panas
Persentase kehilangan panas karena gas buang kering (L ₁)	8,9
Persentase kehilangan panas karena penguapan air yang terbentuk karena H ₂ dalam bahan bakar (L ₂)	41
Persentase kehilangan panas karena penguapan yang ada dalam bahan bakar (L ₃)	3,4
Persentase kehilangan panas karena kelembaban ada di udara (L ₄)	0,22
Persentase kehilangan panas karena radiasi (L ₅)	0,4
Total Kehilangan Panas	53,92

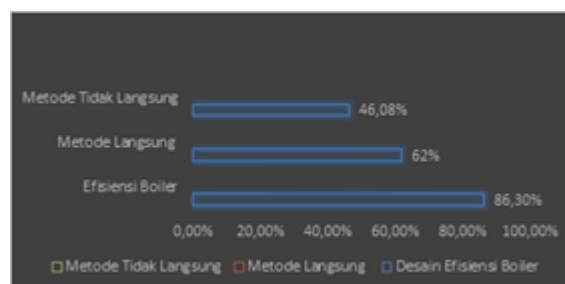
Langkah 3 Menghitung Efisiensi *Boiler* Tidak Langsung

$$\text{Efisiensi } \textit{Boiler} (\eta) = 100 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5)$$

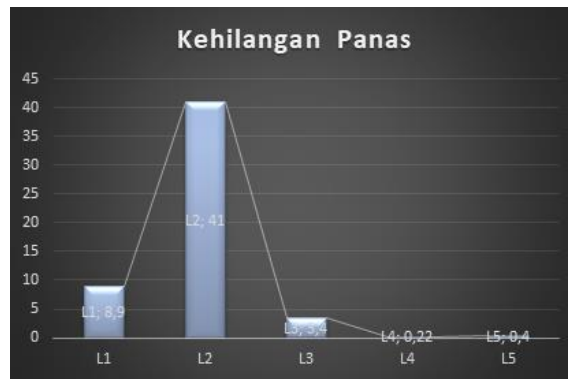
$$= 100 - 53,92 = 46,08\%$$

4.3 Pembahasan dan Analisa

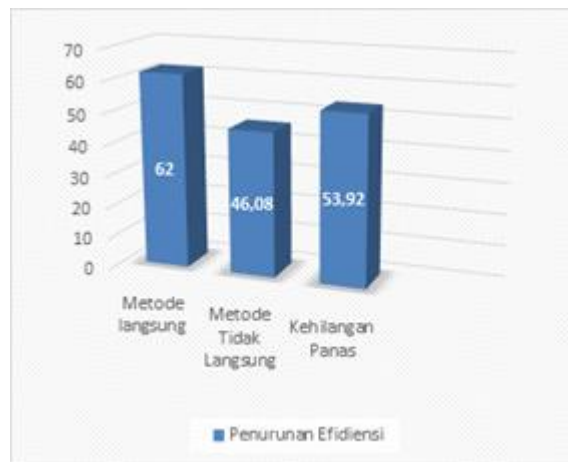
Diatas efisiensi dengan menggunakan metode langsung didapat nilai efisiensi 62%. Berdasarkan metode tidak langsung didapat nilai efisiensi 46,08% dan faktor kehilangan panas bernilai 53,92. Kemudian efisiensi *thermal* didapat nilai 29%. Pada dasarnya efisiensi *boiler* merupakan parameter performa kerja *boiler*, setiap pembangkit listrik tenaga uap banyak yang mempengaruhi efisiensi *boiler*. Gambar 4.1 didapat nilai grafik efisiensi *boiler* dengan data efisiensi *boiler* sesuai spesifikasi 86,30% dari metode langsung 62% dan metode tidak langsung 46,08%.



Gambar 4. 1 Efisiensi *Boiler*



Gambar 4. 2 Grafik Faktor Kehilangan Panas



Gambar 4. 3 Grafik Penurunan Efisiensi

Di **Gambar 4.3** penurunan efisiensi karena kehilangan panas didapat dari metode langsung 62% dan total kehilangan panas sebanyak 53,92%.

Hasil Analisa efisiensi *boiler* jenis *Boiler Atmospheric Fluidized Bed Combustion* dipengaruhi factor. Factor *fouling* yaitu terjadinya kerak pada dinding-dinding ruang pembakaran. Factor *burner*, fungsi *burner* adalah untuk mencampur bahan bakar dan udara dengan proporsi yang sesuai untuk terjadinya penyalaan api dan untuk menjaga kondisi pembakaran yang terus menerus berjalan dengan baik, *burner* yang tidak di setting dengan baik akan mengakibatkan pencampuran udara dan bahan bakar tidak sesuai dan pada setiap laju pembebanan akan meningkatkan kebutuhan udara berlebih dan memboroskan bahan bakar, penggunaan bahan bakar yang komposisi bahan bakar, penggunaan bahan bakar yang komposisi yang tidak sesuai spesifikasi standar menyebabkan pembakaran tidak maksimal, setiap komposisi bahan bakar harus 100% komposisinya meliputi *coal fix carbon*, *coal volatile metter*, *coal total moisture*, *coal ash*.

5 Kesimpulan

Bedasarkan analisis diatas yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan beberapah hal, antara lain :

- Berdasarkan hasil perhitungan efisiensi dengan menggunakan metode langsung didapat nilai efisiensi 62%.
- Berdasarkan perhitungan metode tidak langsung (*indirect method*) atau (*heat loss method*) nilai efisiensi 46,08% .
- Dari perhitungan efisiensi *thermal* didapat nilai 29% dari daya yang diberikan kedalam *boiler* yang dapat diubah menjadi energi mekanis , sisanya hilang atau di buang ke udara melalui kondensor dan ada sebagian yang digunakan untuk menggerakkan pompa

-
- Faktor yang mempengaruhi efisiensi *boiler* jenis *Boiler Atmospheric Fluidized Bed Combustion* diantaranya adalah :
 - Faktor burner
 - Faktor komposisi bahan bakar
 - Faktor *Fouling*

Referensi

- Richo Erwansyah. (2018). Analisa Penurunan Efisiensi *Boiler* Akibat Kehilangan Panas. STT Wastukencana Purwakarta. Program Studi Teknik Mesin.
- Yolanda Pravitasari, Mariana B. Malinoa, dan Muhlasah Novitasari Marab. (2017). Analisa Efisiensi *Boiler* Menggunakan Metode Langsung. Universitas Tanjungpura. Jurusan fisika, Matematika, dan Ilmu Pengetahuan Alam.
- Heni Hendaryati. (2012). Analisis Efisiensi Termal Pada Ketel Uap di Pabrik Gula Kebonnagung Malang. Universitas Muhamdadiyah. Falkutas Teknik Jurusan Teknik Mesin.
- Singgih Hidayanto. (2016). Analisa Performa Water Tube *Boiler* Kapasitas 115 Ton/Jam Di PT. Pertamina Refinery Unit Balongan Indramayu. Universitas Negeri Semarang. Falkutas Teknik Jurusan Teknik Mesin.
- Ir. M.J Djokosetyardjo. (1993). Ketel Uap. Jakarta : PT. Pradnya Paramita.
- Michel A. Saad. (2000). Termodinamika. Jakarta : PT. Prenhallindo.
- Dr. Ir. Chandrasa Soekardi. (2015). Termodinamika Dasar Mesin Konversi Energi. Yogyakarta: Andi.
- Werlin.s.Nainggolan. (1987) Teori Soal Penyelesaian Termodinamika, Bandung: CV. Armico
- Pesulima Batubara. (2014). Analisis Efisiensi Water Tube *Boiler* Berbahan bakar Fiber dan Cangkang di Palm Oil Mill Deangan Kapasitas 45 Ton/Jam. Universitas Sumatera Utara Medan. Falkutas Teknik Jurusan Teknik Mesin.