

## PENGARUH KUALITAS BATUBARA TERHADAP EFISIENSI BOILER TIPE CFB UNIT 3 PLTU JERANJANG LOMBOK BARAT DENGAN METODE ASME PTC 4

**Rizki Pratama Sandi**

S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya  
Email: [rizki.18057@mhs.unesa.ac.id](mailto:rizki.18057@mhs.unesa.ac.id)

**Mohammad Effendy**

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya  
Email: [mohammadeffendy@unesa.ac.id](mailto:mohammadeffendy@unesa.ac.id)

### Abstrak

Kebutuhan pasokan listrik setiap tahunnya relatif naik, sedangkan batubara sebagai bahan bakar PLTU mengalami kenaikan harga dan tingginya permintaan ekspor menyebabkan batubara di Indonesia menggunakan kualitas rendah. Dengan memperhatikan segi faktor bahan bakar dan parameter operasi pada kinerja boiler agar efisien menggunakan metode ASME PTC 4. Penelitian ini menganalisa kualitas batubara berupa nilai HHV terhadap efisiensi boiler dan *mass flow rate* batubara serta distribusi *heat loss* pada boiler tipe CFB Unit 3 PLTU Jeranjang. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui pengaruh kualitas batubara berupa nilai HHV terhadap efisiensi boiler dan pengaruh kualitas batubara terhadap *mass flow rate* bahan bakar batubara. Batubara yang digunakan memiliki nilai HHV 4.125 kcal/kg, 4.154 kcal/kg, 4.247 kcal/kg, 4.103 kcal/kg, 3.880 kcal/kg. Pengambilan data menggunakan data operasi, spesifikasi boiler dan data kandungan batubara. Data hasil penelitian dianalisa secara deskriptif dan dihitung secara teoritis. Pada penelitian ini didapatkan pengaruh kualitas batubara berupa nilai HHV terhadap efisiensi boiler dengan hasil efisiensi terbesar yaitu 83,88% pada HHV 4.125 kcal/kg dan terendah sebesar 80,52% pada HHV 4.103 kcal/kg dengan kerugian panas terbesar karena gas buang kering, pembakaran H<sub>2</sub>, dan *moisture* bahan bakar. Dengan selisih *flow rate* batubara *input* dengan *heat input* terbesar yaitu 5.779 kg/h pada HHV 4.247 kcal/kg dan terkecil yaitu 577 kg/h pada HHV 4.125 kcal/kg dengan sebab tingginya *moisture* pada bahan bakar dan selisih batubara *input* dengan *heat input* karena tidak teridentifikasi karbon yang tinggi pada batubara tidak terbakar pada saat pengambilan sampel.

**Kata Kunci:** batubara, boiler, efisiensi, *flow rate*, *heat loss*.

### Abstract

*The need for electricity supply has relatively increased every year, while coal as a PLTU fuel has experienced price increases and high demand for exports has caused coal in Indonesia to use low quality. By paying attention to the aspects of fuel factors and operating parameters on boiler performance to be efficient using the ASME PTC 4 method. This study analyzes coal quality in the form of HHV values for boiler efficiency and coal mass flow rate and heat loss distribution in CFB Unit 3 PLTU Jeranjang type boilers. The purpose of this study was to determine the effect of coal quality in the form of HHV values on boiler efficiency and the effect of coal quality on the mass flow rate of coal fuel. The coal used has an HHV value of 4,125 kcal/kg, 4,154 kcal/kg, 4,247 kcal/kg, 4,103 kcal/kg, 3,880 kcal/kg. Data collection uses operating data, boiler specifications and coal content data. The research data were analyzed descriptively and theoretically calculated. In this study, the effect of coal quality in the form of HHV values on boiler efficiency with the highest efficiency results was 83.88% at HHV 4,125 kcal/kg and the lowest was 80.52% at HHV 4,103 kcal/kg with the greatest heat loss due to dry flue gas, combustion of H<sub>2</sub>, and fuel moisture. With the largest difference in flow rate of input coal and heat input, namely 5,779 kg/h at HHV 4,247 kcal/kg and the smallest, namely 577 kg/h at HHV 4,125 kcal/kg due to the high moisture in the fuel and the difference between input coal and heat input because it does not high carbon was identified in unburned coal during sampling.*

**Keywords:** coal, boiler, efficiency, *flow rate*, *heat loss*.

### PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) banyak digunakan karena biaya produksi yang murah dan menghasilkan daya yang cukup besar dengan kapasitas terpasang PLTU pada tahun 2019 sebesar 30.406,17 MW dengan presentase sebesar 43,64% dari total kapasitas pembangkit 69.678,85 MW. Kebutuhan pasokan listrik yang setiap tahunnya relatif naik, khususnya pada PLTU berfokus untuk memaksimalkan dan menjaga kualitas produksi keandalan listriknya dengan bahan bakar yang tersedia. Cadangan batubara Indonesia sebesar 60% dalam kategori kualitas rendah (dibawah 5100 cal/gram) yang akhirnya kurangnya

minat dunia sehingga jarang diekspor dan dimanfaatkan untuk pemenuhan kebutuhan lokal. (Nathanael, 2020). Batubara yang diekspor dari total produksi pada tahun 2021 sebanyak 435.217.208 ton dan untuk kebutuhan domestik sebesar 133.043.362 ton. (Kementerian ESDM, 2021)

Dengan sumber energi yang berasal dari batubara yang mengandung nilai kalori batubara sekitar 6.300 – 8.300 Btu/lb atau dalam kategori *low rank coal*. (ASTM, 2005). Dengan kualitas seperti parameter nilai kalori yang bervariasi menyebabkan energi yang dihasilkan oleh pembakaran batubara juga berbeda, sehingga kinerja pada boiler dipengaruhi oleh nilai kualitas batubara yang

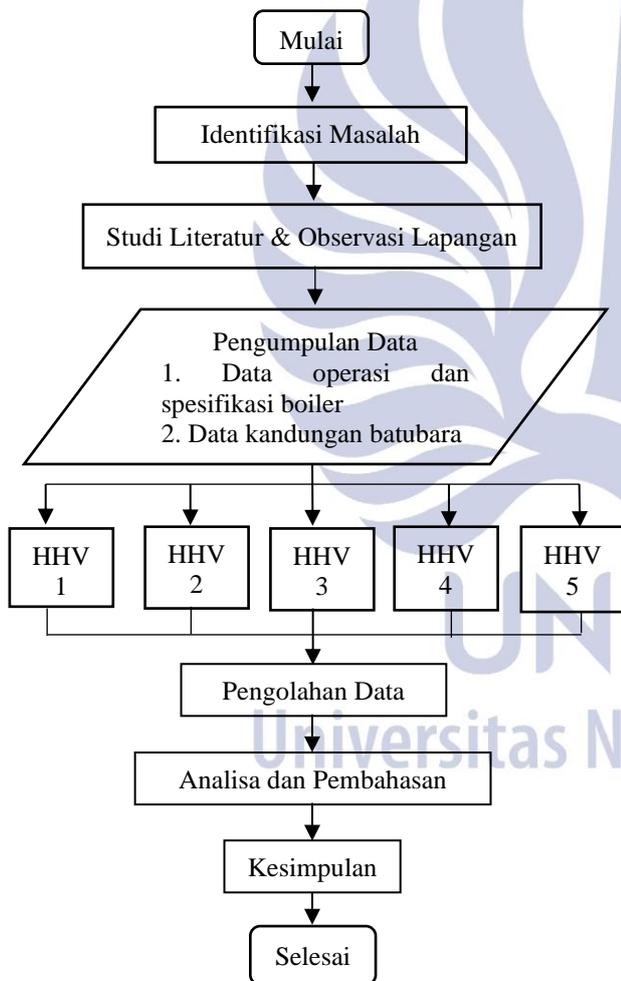
digunakan. Suatu pembangkit listrik tenaga uap diperlukan banyak faktor dan evaluasi untuk dapat meningkatkan performa dan kinerja agar tercapai. Salah satunya memperhatikan segi faktor bahan bakar dengan efisien menggunakan analisa energi dan *heat loss* metode ASME PTC 4.

**METODE PENELITIAN**

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah deskriptif kuantitatif dan deskriptif kualitatif. Penelitian ini mendeskripsikan pengaruh kualitas batubara terhadap kerugian panas, efisiensi boiler, dan *flow rate* bahan bakar. Termasuk dalam penelitian kuantitatif karena membutuhkan perhitungan pada variabel penelitian dengan menggunakan acuan ASME PTC 4 serta berusaha memberikan rekomendasi untuk mengoptimalkan kinerja boiler.

Tempat penelitian: PT Indonesia Power PLTU Jeranjang Unit 3

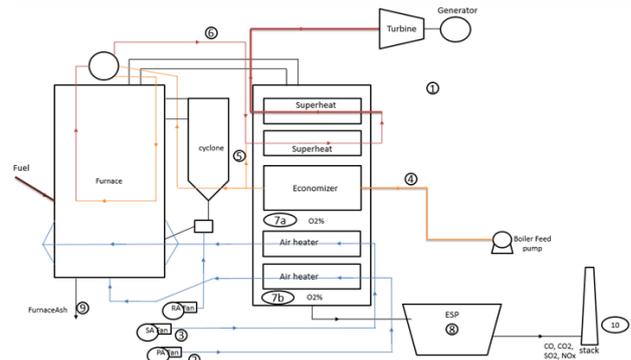
Objek Penelitian : Boiler PLTU Jeranjang Unit 3



Teknik Pengumpulan Data :

- Data spesifikasi dari boiler yang ada pada Unit 3 PLTU Jeranjang
- Mengumpulkan data parameter pada setiap jalur operasi yang digunakan untuk perhitungan efisiensi Boiler

- Mengumpulkan data kandungan bahan bakar berupa batubara



**Teknik Pengolahan Data**

Pengolahan data dilakukan setelah pengumpulan data parameter selesai dan dapat untuk menghitung efisiensi boiler.

Pada metode *heat loss* untuk dapat diketahui kehilangan energi panas sebagai indikator *heat loss*, yaitu sebagai berikut :

- Menghitung kerugian panas karena gas buang kering ( $Q_{pLDFg}$ )

$$Q_{pLDFg} = \frac{MqDFg \cdot HDFgLvCr}{HHVF} \cdot 100\%$$

- Menghitung kerugian panas karena moisture dari pembakaran H2 ( $Q_{pLH2F}$ )

$$Q_{pLH2F} = \frac{MqWH2F \cdot (HStLvCr - HWRe)}{HHVF} \cdot 100\%$$

- Menghitung kerugian panas karena moisture di bahan bakar ( $Q_{pLWF}$ )

$$Q_{pLWF} = \frac{MqWF \cdot (HStLvCr - HWRe)}{HHVF} \cdot 100\%$$

- Menghitung kerugian panas karena moisture di udara ( $Q_{pLWA}$ )

$$Q_{pLWA} = \frac{MFrWA \cdot MqDA \cdot HWvLvCr}{HHVF} \cdot 100\%$$

- Menghitung kerugian panas karena karbon tidak terbakar di bahan bakar ( $Q_{pLUbC}$ )

$$Q_{pLUbC} = MpUbc \frac{HHVCRs}{HHVF} \cdot 100\%$$

- Menghitung kerugian panas karena karbon monoksida di gas buang ( $Q_{pLCO}$ )

$$Q_{pLCO} = DVpCO \cdot MoDFg \cdot MwCO \cdot \frac{HHVCO}{HHVF} \cdot 100\%$$

- Menghitung kerugian panas karena panas sensibel ( $Q_{pLRs}$ )

$$Q_{pLRs} = \sum \frac{MqRs \cdot HRs}{HHVF} \cdot 100\%$$

- Menghitung kerugian panas karena pembentukan NOx ( $Q_{pLNOx}$ )

$$Q_{pLNOx} = DVpNOx \cdot MoDFg \cdot \frac{HrNOx}{HHVF} \cdot 100\%$$

- Menghitung kerugian panas karena radiasi dan konveksi ( $Q_{pLsrc}$ )

$$Q_{pLsrc} = 0,32\%$$

- Menghitung kerugian panas karena tambahan kelembapan ( $Q_{pLWAd}$ )

$$QrLWAd = \frac{\sum MrSt \cdot (HStLvCr - HWRe)}{Qrl}$$

- Perhitungan kerugian panas karena hidrogen tidak terbakar di residu ( $QpLH2Rs$ )

$$QpLH2Rs = \frac{MrRs \cdot MpH2Rs \cdot HHVH2}{MrF \cdot HHVF} \cdot 100\%$$

- Menghitung kerugian panas karena pulverizer ( $QpLPr$ )

$$QpLPr = MqPr \cdot (HHVPr + HPr) \cdot 100\%$$

- Perhitungan kerugian panas karena hidrokarbon tidak terbakar di gas buang ( $QpLUBHc$ )

$$QpLUBHc = DVpHc \cdot MoDFg \cdot MwHc \cdot \frac{HHVHc}{HHVF} \cdot 100\%$$

- Perhitungan kerugian panas karena infiltrasi udara ( $QpLALg$ )

$$QpLALg = MqALg \cdot (HALvCr - HALgEn) \cdot 100\%$$

- Perhitungan kerugian panas karena kalsinasi dan dehidrasi ( $QrLClh$ )

$$QrLClh = \sum MrSbk \cdot MFrClhk \cdot Hrk$$

- Perhitungan kerugian panas karena air dalam sorbent ( $QrLWSb$ )

$$QrLWSb = MrWSb \cdot (HStLvCr - HWRe) \cdot 100\%$$

Dari rumus perhitungan *heat loss* diatas, terdapat 10 *heat loss* yang dapat dihitung dengan kelengkapan parameternya, antara lain :

- Menghitung kerugian panas karena gas buang kering ( $QpLDFg$ )
- Menghitung kerugian panas karena moisture dari pembakaran H<sub>2</sub> ( $QpLH2F$ )
- Menghitung kerugian panas karena moisture di bahan bakar ( $QpLWF$ )
- Menghitung kerugian panas karena moisture di udara ( $QpLWA$ )
- Menghitung kerugian panas karena karbon tidak terbakar di bahan bakar ( $QpLUBC$ )
- Menghitung kerugian panas karena karbon monoksida di gas buang ( $QpLCO$ )
- Menghitung kerugian panas karena panas sensibel ( $QpLRS$ )
- Menghitung kerugian panas karena pembentukan NO<sub>x</sub> ( $QpLNOx$ )
- Menghitung kerugian panas karena radiasi dan konveksi ( $QrLSrc$ )
- Menghitung kerugian panas karena tambahan kelembapan ( $QrLWAd$ )

#### Teknik Analisis Data

Pada penelitian ini pengambilan data menggunakan data operasional pada komponen yang dilakukan secara langsung dan tidak langsung, dihitung secara teoritis menggunakan ASME PTC 4. Adapun teknik analisa yang dilakukan adalah sebagai berikut :

- Analisa perbandingan efisiensi boiler dengan variasi kualitas batubara.

- Analisa pengaruh kualitas batubara terhadap *mass flow rate* batubara.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Penelitian

Tabel 1. Data Hasil *Heat Loss*

Kategori <i>Heat Loss</i>		HHV				
		1	2	3	4	5
Gas buang kering	%	6,00	6,58	6,35	7,59	6,46
Moisture dari pembakaran H <sub>2</sub>	%	4,19	4,75	4,61	4,50	4,20
Moisture di bahan bakar	%	4,91	5,45	4,97	5,66	6,10
Moisture di udara	%	0,81	0,97	0,94	1,08	0,66
Karbon tidak terbakar di residu	%	0,02	0,007	0,012	0,009	0,012
Hidrogen tidak terbakar di residu	%	-	-	-	-	-
Karbon monoksida di gas buang	%	0,08	0,08	0,02	0,30	0,24
Pulverizer rejects	%	-	-	-	-	-
Hidrokarbon tidak terbakar di gas buang	%	-	-	-	-	-
Panas sensibel di residu	%	0,01	0,006	0,01	0,007	0,009
Infiltrasi udara	%	-	-	-	-	-
Formasi NO <sub>x</sub>	%	2×10 <sup>-9</sup>	2×10 <sup>-9</sup>	1,7×10 <sup>-9</sup>	2,6×10 <sup>-9</sup>	2×10 <sup>-9</sup>
Radiasi dan konveksi	%	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
Kelembapan tambahan	%	0,83	0,006	0,009	0,001	0,001
Kalsinasi dan dehidrasi pada penyerap	%	-	-	-	-	-
Air di penyerap	%	-	-	-	-	-

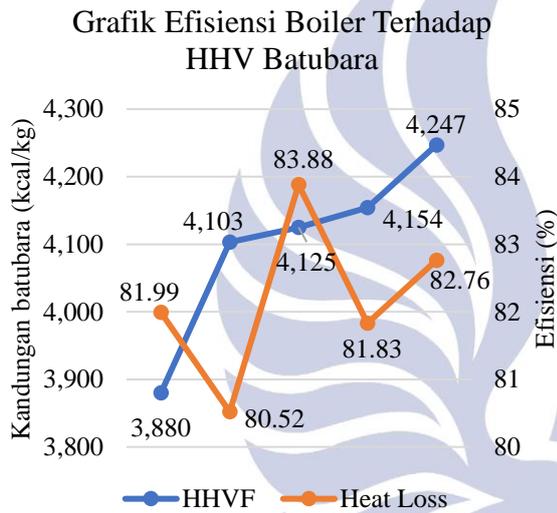
**Tabel 2.** Data *Flow Rate Fuel*

Parameter	Satuan	Flow batubara berdasarkan parameter	Flow batubara berdasarkan <i>heat input</i>
HHV 1	kg/h	24.910	22.213
HHV 2	kg/h	28.397	21.821
HHV 3	kg/h	26.262	20.483
HHV 4	kg/h	27.226	25.376
HHV 5	kg/h	27.898	24.351

**Pembahasan**

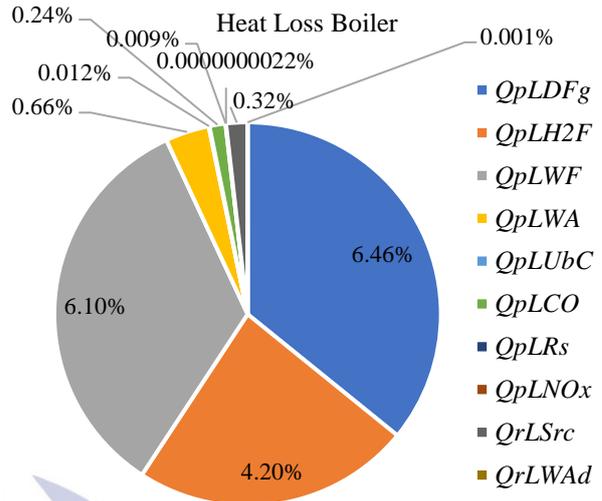
**A. Analisa Heat Loss**

Analisa *heat loss* atau kerugian panas ini didapatkan dari perhitungan menggunakan parameter operasi dan nilai dari kandungan bahan bakar batubara untuk digunakan memperhitungkan kerugian panas yang keluar atau tidak dapat dimanfaatkan sehingga mempengaruhi efisiensi pada kinerja boiler.



**Gambar 1.** Efisiensi Boiler Metode *Heat Loss*

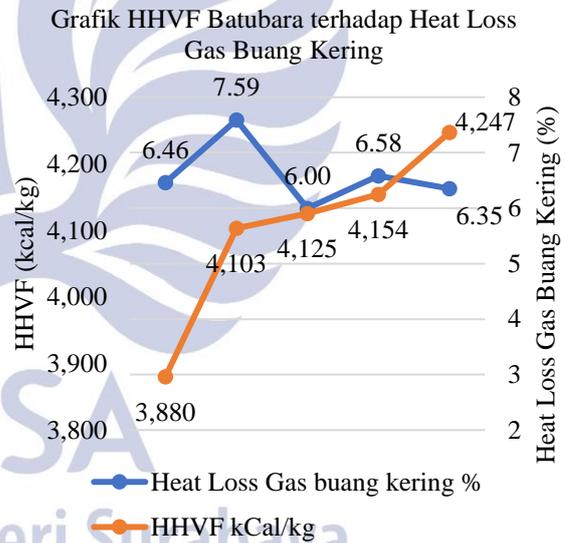
Berdasarkan Gambar 1. diketahui bahwa nilai efisiensi boiler tertinggi pada nilai yaitu 4.125 kcal/kg dengan efisiensi sebesar 83,88% dan nilai efisiensi terendah pada nilai yaitu 4.103 kcal/kg dengan efisiensi sebesar 80,52%. Dari grafik efisiensi boiler dengan metode kerugian panas tersebut dapat diketahui bahwa nilai kalori batubara bukan faktor utama pada perhitungan kerugian panas yang mempengaruhi nilai efisiensi boiler.



**Gambar 2.** Contoh *Heat Loss Boiler* HHV 5

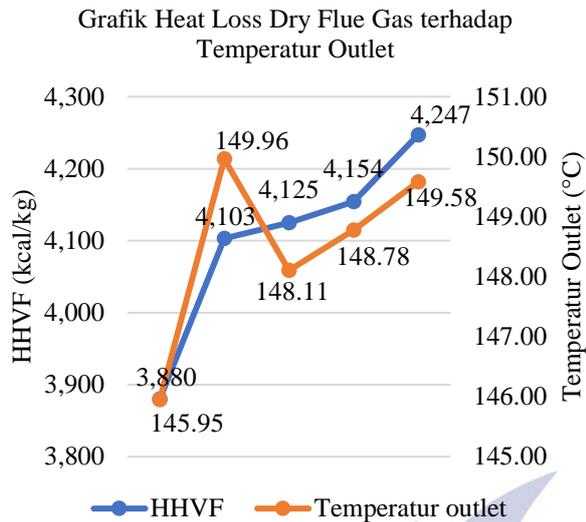
Berdasarkan gambar 2. terdapat tiga *heat loss* yang terbesar yaitu karena gas buang kering, *moisture* dari pembakaran H<sub>2</sub>, dan *moisture* dari bahan bakar. Tiga *heat loss* tersebut lebih lanjut yang mempengaruhi efisiensi boiler dari perhitungan kerugian panas, yaitu :

- Analisa kerugian panas karena gas buang kering



**Gambar 3.** Grafik HHVF batubara terhadap *Heat Loss Gas Buang Kering*

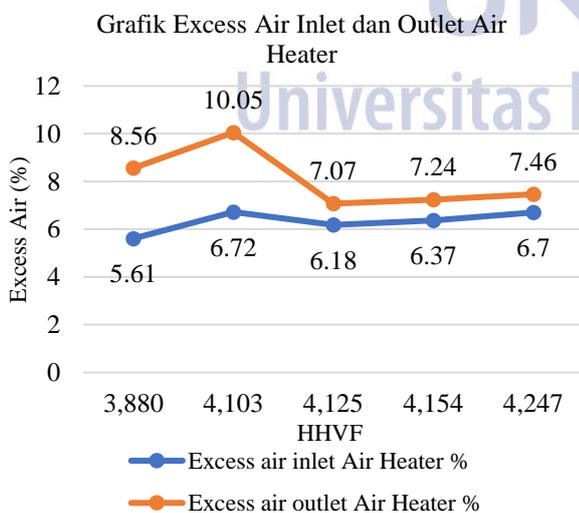
Berdasarkan gambar 3. kerugian panas karena gas buang kering terbesar terdapat pada nilai HHV 4.103 kcal/kg dengan kerugian panas sebesar 7,59% dan nilai terendah pada HHV 4.125 kcal/kg dengan kerugian panas sebesar 6,00%. Dari grafik diatas dapat diketahui nilai HHV batubara bukan menjadi faktor utama dari kerugian panas karena gas buang kering.



**Gambar 4.** Grafik Heat Loss Dry Flue Gas terhadap temperatur outlet

Berdasarkan gambar 4. menunjukkan grafik parameter temperatur outlet gas buang yang menentukan panas dari nilai temperatur tersebut sehingga semakin panas temperatur outlet gas buang semakin tinggi kerugian panasnya, sehingga menjadi faktor penyebab kerugian panas gas buang kering. Dengan temperatur outlet gas buang pada nilai tertinggi yaitu 149,96°C dengan HHV 4.103 kcal/kg dan yang terendah yaitu 145,95°C pada HHV 3.880 kcal/kg.

Dari gambar 3. dan gambar 4. adanya perbedaan hubungan yang terjadi seperti nilai HHV 3.880 kcal/kg pada gambar 3. terjadi kerugian panas cukup tinggi 6,46% sedangkan pada gambar 4. menunjukkan temperatur outlet gas buang paling rendah namun pada HHV 4.103 kcal/kg dengan nilai temperatur tertinggi yaitu 149,96°C dengan nilai kerugian panas tertinggi yaitu 7,59%. Sehingga dilakukannya analisa pada excess air untuk menjadikan faktor penyebab kerugian panas tersebut.



**Gambar 1.** Grafik excess air inlet dan outlet air heater

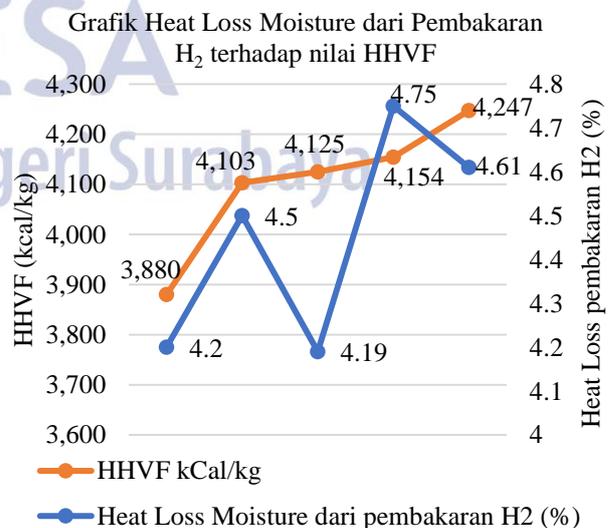
Berdasarkan gambar 5. terdapat grafik yang menunjukkan excess air untuk inlet dan outlet pada air heater yang dilakukan analisa perbandingan selisih antara nilai inlet dan outlet untuk mengetahui indikasi kebocoran pada air heater. Dari grafik tersebut selisih excess air inlet dengan outlet tertinggi yaitu pada nilai HHV 4.103 kcal/kg dengan selisih 3,33% dan selisih terendah pada HHV 4,247 kcal/kg dengan selisih 0,76%.

Dengan gambar 3. yang menunjukkan kerugian panas, menunjukkan adanya faktor temperatur gas buang dan excess air pada kerugian panas gas buang kering. Dengan selisih excess air yang tinggi seperti pada HHV 3.880 kcal/kg dan 4.103 kcal/kg menyebabkan adanya perubahan temperatur gas buang yang kurang akurat karena terindikasi mengalami kebocoran sehingga udara lingkungan masuk dan menghilangkan energi panas lebih banyak. Berbeda dengan seperti HHV 4.247 kcal/kg yang memiliki temperatur gas buang tergolong cukup tinggi namun kerugian panasnya tidak sebesar HHV 4.103 kcal/kg karena selisih excess air paling rendah.

Kerugian panas ini dapat terjadi karena kalor yang terbawa bersama dengan gas buang kering meninggalkan ruang bakar dan air heater. Dengan mengacu pada temperatur gas buang yang tinggi menyebabkan kerugian panas kalor juga tinggi. Besarnya kerugian panas gas buang kering dipengaruhi oleh banyaknya jumlah suplai udara pada boiler yang menyebabkan rendah atau tingginya temperatur gas buang.

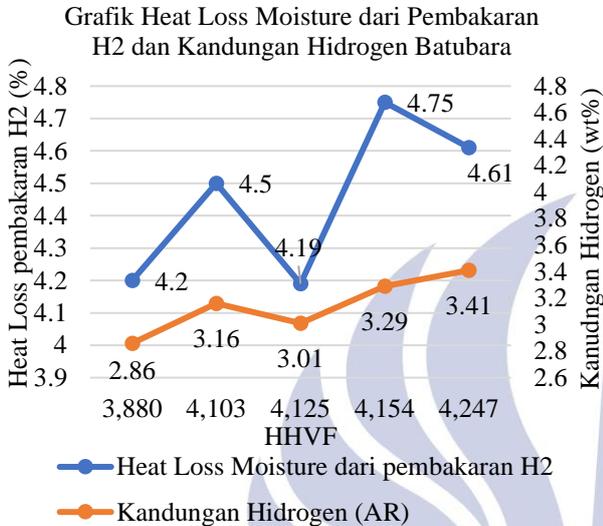
- Analisa kerugian panas karena moisture dari pembakaran H<sub>2</sub>

Kerugian panas ini dapat terjadi karena kandungan hidrogen yang menghambat proses nyala api pada saat pembakaran bahan bakar sehingga mengurangi efisiensi boiler. Semakin besar nilai kandungan hidrogen dalam bahan bakar batubara, semakin besar kerugian panas karena moisture dari pembakaran H<sub>2</sub>.



**Gambar 2.** Grafik Heat loss moisture dari pembakaran H<sub>2</sub> terhadap nilai HHV batubara

Berdasarkan gambar 6. mengenai grafik kerugian panas karena *moisture* dari pembakaran H<sub>2</sub> dengan nilai HHV dapat diketahui bahwa kerugian panas terkecil pada HHV 3.880 kcal/kg dengan nilai 4,2% dan kerugian panas tertinggi pada HHV 4.154 kcal/kg dengan nilai 4,75% yang diikuti pada HHV 4.247 kcal/kg dengan nilai 4,61%. Nilai HHV dengan *heat loss* yang tidak sama, diperlukan analisa pada kandungan H<sub>2</sub> pada batubara untuk dibandingkan.

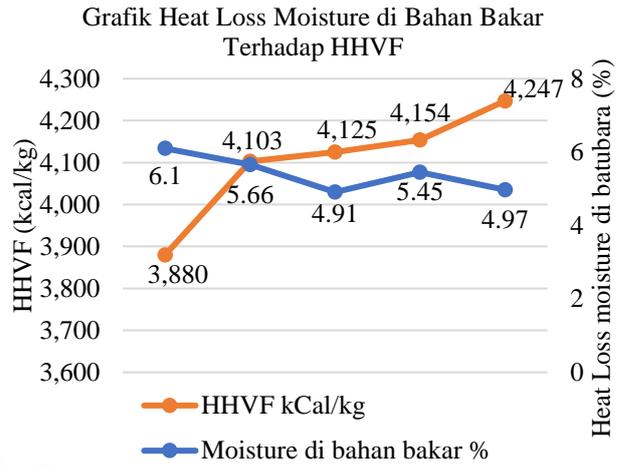


**Gambar 3.** Grafik *Heat Loss Moisture* dari Pembakaran H<sub>2</sub> dan Kandungan Hidrogen Batubara

Berdasarkan gambar 7. grafik kerugian panas karena *moisture* dari pembakaran H<sub>2</sub> didapatkan hasil tertinggi yaitu 4,75% dari bahan bakar batubara dengan nilai kalori 4.154 kcal/kg dan kandungan hidrogen pada bahan bakar sebesar 3,29 wt%. Kerugian panas terendah yaitu pada 4,19% dengan nilai kalori batubara 4.125 kcal/kg dengan kandungan hidrogen sebesar 3,01 wt%.

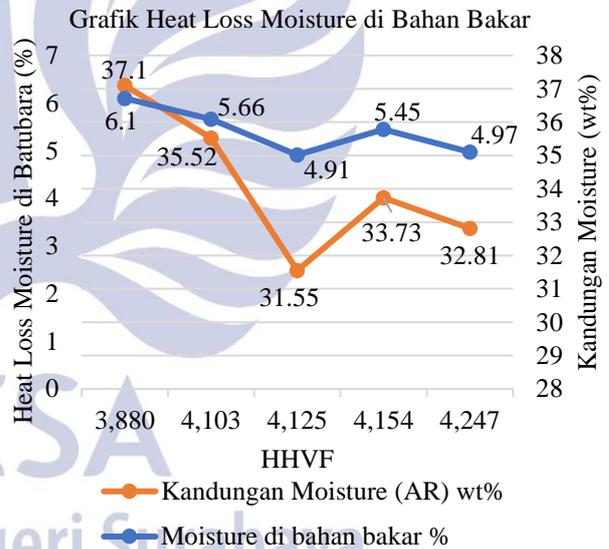
- Analisa kerugian panas karena *moisture* di bahan bakar

Kerugian panas ini terjadi karena *moisture* atau kandungan air yang terdapat pada bahan bakar. Kadar bahan bakar batubara yang terdapat kandungan air lebih besar menyebabkan terjadinya kerugian panas yang lebih besar karena air menyerap kalor untuk menaikkan titik didih bahan bakar batubara saat terjadinya pembakaran.



**Gambar 4.** Grafik *heat loss moisture* di bahan bakar terhadap HHV batubara

Berdasarkan gambar 8. bahwa grafik kerugian panas karena *moisture* di bahan bakar terhadap HHV dengan kerugian panas terbesar pada HHV 3.880 kcal/kg dengan nilai 6,1% dan kerugian panas terkecil pada HHV 4.125 kcal/kg dengan nilai 4,91%. Sehingga dapat dilakukan analisa lebih lanjut dengan parameter lainnya yaitu kandungan *moisture* pada bahan bakar.



**Gambar 5.** Grafik *Heat Loss Moisture* di Bahan Bakar

Berdasarkan gambar 4.9 data analisa kerugian panas karena *moisture* di bahan bakar didapatkan hasil kerugian panas terbesar yaitu 6,10% dari bahan bakar batubara dengan nilai kalori terkecil yaitu 3.880 kcal/kg yang memiliki kandungan *moisture* tertinggi daripada batubara yang lain sebesar 37,10 wt%. Dan kerugian panas terendah yaitu 4,91% dari nilai kalori batubara sebesar 4,125 kcal/kg dengan kandungan *moisture* terendah yaitu 31,55 wt%.

## PENUTUP

### Simpulan

- Kualitas batubara mempengaruhi terhadap efisiensi boiler. Hasil analisa perbandingan efisiensi boiler dengan variasi kualitas batubara berupa nilai HHV batubara terbesar dari HHV 4.125 kcal/kg dengan nilai 83,88% dan nilai efisiensi terendah didapatkan dari HHV 4.103 kcal/kg dengan nilai 80,52%. Dengan faktor kerugian panas terbesar karena gas buang kering, *moisture* dari pembakaran H<sub>2</sub>, dan *moisture* dari bahan bakar. Kerugian panas karena gas buang kering terbesar yaitu 7,59% dari HHV 4.103 kcal/kg dengan nilai tertinggi pada temperatur gas buang 149,96°C dan selisih *excess air* 3,33% . Untuk yang terendah sebesar 6,00% dari HHV 4.125 kcal/kg dengan nilai temperatur gas buang 148,11°C dan selisih *excess air* 0,89%. Kerugian panas karena *moisture* di bahan bakar terbesar yaitu 6,10% karena kandungan *moisture* pada bahan bakar tertinggi dengan nilai 37,1 wt% dari HHV 3.880 kcal/kg dan terendah yaitu 4,91% pada HHV 4.125 kcal/kg dengan nilai 31,55 wt%. Kerugian panas karena *moisture* dari pembakaran H<sub>2</sub> terbesar 4,75% dari HHV 4.154 kcal/kg dengan kandungan H<sub>2</sub> di bahan bakar 3,29 wt% dan yang terendah yaitu 4,19% dari HHV 4.125 kcal/kg dengan kandungan H<sub>2</sub> di bahan bakar 3,01 wt%.
- Kualitas batubara mempengaruhi terhadap jumlah *flow rate* bahan bakar batubara. Hasil analisa pengaruh kualitas batubara berupa nilai HHV batubara terhadap *mass flow rate* batubara dengan perbedaan terbesar pada nilai HHV 4.247 kcal/kg dengan selisih 5.779 kg/h dan perbedaan terkecil pada nilai HHV 4.125 kcal/kg dengan selisih 577 kg/h. Kandungan *moisture* pada batubara tertinggi pada HHV 3.880 kcal/kg dengan nilai 37,10 wt% yang *flow rate* batubara tergolong tinggi dan yang terkecil yaitu pada HHV 4.125 kcal/kg dengan nilai 31,55 wt% dengan *flow rate* batubara terendah. Dikarenakan adanya perbedaan kandungan batubara khususnya kandungan *moisture* pada batubara yang membutuhkan proses pemanasan batubara agar dapat terbakar sempurna dan juga selisih perbedaan *flow rate input* batubara dengan *flow rate* batubara *heat input* yang dapat mempengaruhi jumlah kebutuhan bahan bakar batubara untuk menjaga parameter operasi yang ditetapkan pada boiler.

### Saran

- Penyimpanan batubara dengan optimal dengan menyiram saat kering hingga cukup lembab dan tidak terlalu basah dan jika perlu diberikan termometer pada setiap titik batubara untuk menghindari basahnya batubara dan menyebabkan kandungan *moisture* batubara terlalu tinggi.

- Penggantian peralatan pengoperasian seperti *dampers* dan *mass flow rate* batubara secara otomatis agar dapat menyesuaikan parameter operasi yang dibutuhkan dengan cepat untuk tetap optimal dan menghindari kelebihan bahan bakar yang memasuki boiler.
- Perlu dilakukan perbaikan pada jalur *outlet air heater* dikarenakan dengan indikasi naiknya jumlah *excess air* karena kebocoran udara lingkungan masuk yang mengakibatkan kerugian panas tidak optimal diperhitungkan.

## DAFTAR PUSTAKA

- American Society of Mechanical Engineers. (1998). *Fired Steam Generators, Performance Test Code 4-1998 [Revision of ASME PTC 4.1-1964(R1991)]*.
- ASTM International. (2005). ASTM D388-05 Standard Classification of Coals by Rank. *ASTM International, 05(2005)*, 1–7.
- Cheng, Y., Liu, Q., & Ren, T. (2021). *Coal Mechanics*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-3895-4>
- Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan. (2020). *Statistik Ketenagalistrikan Tahun 2019*. 33.
- Edress, N. A. A., & Khaled, K. A. M. (2018). Coalification and fuel analysis of the Lower Carboniferous Thora coal seam in the Bedaa- Gebel Hazbar- Gebel Nukhul district, Sinai, Egypt. *Journal of African Earth Sciences, 144*, 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.04.006>
- Kementerian ESDM. (2021). *Handbook Of Energy & Economic Statistics Of Indonesia 2021*. Kementerian ESDM.
- Komarudin et al. (2020). Analisis Kenaikan Plant Heat Rate PLTU Sebelum Kondisi Testing Komisioning (Studi Kasus : XX). *Bina Teknika, 16(1)*, 25–33. <https://doi.org/10.54378/bt.v16i1.1740>
- Nathanael, G. K. (2020). Kerjasama Luar Negeri Indonesia dan China: Studi Kasus Ekspor Batubara. *Jurnal Mandala Jurnal Ilmu Hubungan Internasional, 203–219*. <https://doi.org/10.33822/mjihi.v3i2.2320>
- Pasymi. (2008). *Batubara (JILID-1)*. Bung Hatta University Press.
- Putra, B. R., Mangala, L. K., & Gunawan, Y. (2021). Analisis Pengaruh Nilai Kalor Batubara Dan Excess Air Terhadap Efisiensi Boiler. *Enthalpy, 6(1)*, 12–17.
- Rahmania, W. S., Prasetya, H. E. G., & Sholihah, F. H. (2020). Maintenance Analysis of Boiler Feed Pump Turbine Using Failure Mode Effect Analysis (FMEA) Methods. *IEEE, 54–59*.
- Sagaf, M., & Alim, S. (2018). Analisa Faktor-Faktor Penyebab Perubahan Efisiensi Boiler Jenis Pulverized Coal Fired Forced Circulation Sub-Critical Pressure

Menggunakan Metode Tak Langsung. *Teknoin*, 24(2), 147–158.

Sidiq, A. N., & Anwar, M. (2021). Perbandingan Efisiensi Turbin Uap Kondisi Aktual Berbasis Data Komisioning Sesuai Standard ASME PTC 6. *KILAT*, 10(1), 190–199.  
<https://doi.org/10.33322/kilat.v10i1.1178>

Sugiharto, A. (2020). Perhitungan Efisiensi Boiler Dengan Metode Secara Langsung pada Boiler Pipa Api. *Swara Patra*, 10(2), 51–57. <https://doi.org/10.37525/sp/2020-2/260>

Sugiyono. (2013). *Metode Penelitian Kuantitatif Kualitatif Dan R&D*. Alfabeta.

Suwito, Sarwono, E., Gunarto, & Julianto, E. (2017). Analisa Kinerja Boiler Pada Kondisi Moisture Dan Kalori Batubara Abnormal Terhadap Pengaruh Plant Heat Rate BTG PT. Indonesia Chemical Alumina Tayan. *Suara Teknik : Jurnal Ilmiah*, 8(1), 43–48.

Tanuma, T. (2017). Introduction to steam turbines for power plants. In *Advances in Steam Turbines for Modern Power Plants* (pp. 3–9). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100314-5.00001-4>

Tontu, M. (2020). *Performance Analysis of a Large-Scale Steam Condenser Used in a Steam Power Plant*. 4(2), 72–77.

