

Analisis Pengaruh *Fouling* dan *Slagging* Terhadap Kinerja *Boiler Subcritical* pada PLTU Moramo

Fadhilla Inaswara¹⁾, Budiman Sudia²⁾, Raden Rinova Sisworo³⁾

¹⁾ Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo

^{2,3)} Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo

Jl. H.E.A Makadompit, Kampus Hijau Bumi Tridarma Andounohu, Kendari 93232

Email: fadhilla.inwar@gmail.com

Article Info

Available online July 10, 2021

Abstrak

Boiler yang menggunakan batu bara berkualitas rendah akan mengakibatkan peningkatan jumlah pembakaran batu bara dan tingginya pembentukan akumulasi deposit *ash* (*fouling* dan *slagging*). Penelitian untuk membuktikan adanya efek *fouling* dan *slagging* terhadap efisiensi boiler perlu dilakukan di PLTU Moramo untuk menyusun langkah perbaikan kinerja boiler. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi *fouling* dan *slagging* yang terjadi di boiler dan bagaimana pengaruhnya terhadap kinerja boiler. Dengan menggunakan prinsip kesetimbangan massa dan energi, perpindahan kalor di area *evaporator* dan *superheater* dijadikan dasar mengidentifikasi *slagging* dan *fouling*. Untuk efisiensi boiler dikalkulasikan menggunakan metode langsung. Peningkatan suhu *flue gas* yang dipengaruhi oleh penurunan laju perpindahan kalor mengindikasikan terbentuknya *slagging* dan *fouling*. Efisiensi boiler memiliki kaitan dengan indeks *slagging* dan kandungan sodium abu batu bara, semakin tinggi nilai indeks *slagging* dan semakin rendah kandungan sodium maka efisiensi boiler akan meningkat. Efisiensi rata-rata boiler yang terbaik adalah 89,853% saat menggunakan batu bara *supplier* Y dengan nilai indeks *slagging* 2370,2 dan kandungan sodium pada abu sebesar 0,48%.

Kata kunci: *Fouling*, *slagging*, perpindahan kalor, efisiensi, boiler

Abstract

Boilers that use low-quality coal result in an increase in the amount of coal burning and the high formation of accumulated ash deposits (fouling and slagging). It is necessary to conduct research the effect of fouling and slagging on boiler efficiency in steam power plant Moramo for the boiler performance improvement purpose. The objective of this research are identified fouling and slagging and how its affect boiler performance. By using the principle of mass and energy balance, heat transfer in the evaporator and superheater areas are used as the basis for identifying slagging and fouling. Boiler efficiency is calculated by a direct method. An increase in flue gas temperature which is affected by a degradation in the rate of heat transfer indicates the formation of slagging and fouling. Boiler efficiency is related to the slagging index and sodium content in the ash of coal, the result of higher slagging index and lower the sodium content will further increase boiler efficiency. The best average efficiency of boiler is 89.853% when coal from supplier Y used as fuel with slagging index value is 2370.2 and sodium content in ash is 0.48%..

Keyword: *Fouling*, *slagging*, heat transfer, efficiency, boiler

1. Pendahuluan

Sebanyak 50,88% pasokan listrik di Indonesia merupakan hasil dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap atau PLTU yang mana mayoritas merupakan

berbahan bakar batu bara [1]. Walaupun batu bara mempunyai peran penting dalam produksi energi listrik, banyak masalah yang ditimbulkan akibat komposisi batu bara yang kompleks. Salah satu masalah yang sering terjadi pada *boiler* akibat penggunaan kualitas batu bara yang rendah adalah mengakibatkan pembakaran jumlah batu bara meningkat dan tingginya akumulasi deposit *ash* (*fouling* dan *slagging*). Deposit *ash* banyak terjadi pada *furnace* dan *superheater* namun tidak menutup kemungkinan terjadi pada bagian *boiler* lainnya [2]. Pembentukan deposit *ash* pada permukaan pipa *boiler* menurunkan proses penyerapan panas oleh fluida kerja yang berakibat efisiensi menurun [3]. Penelitian untuk membuktikan adanya efek *fouling* dan *slagging* terhadap efisiensi *boiler* perlu dilakukan di PLTU Moramo untuk menyusun langkah perbaikan kinerja *boiler*. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi *fouling* dan *slagging* yang terjadi di *boiler* dan bagaimana pengaruhnya terhadap kinerja *boiler*.

Siklus Rankine

Siklus Rankine merupakan siklus ideal yang digunakan untuk memodelkan PLTU. Siklus ini bekerja dengan fluida kerja air. Semua komponen yang berhubungan dengan siklus Rankine (pompa, *boiler*, *turbine*, kondensator) dianalisa dengan proses *steady-flow* [4]. Proses di *Boiler* tidak melibatkan kerja / *work*, maka energi kinetik dan potensial dapat diabaikan. Perpindahan kalor dapat di evaluasi dengan properti fluida itu sendiri. Perpindahan kalor di *boiler* terjadi di tiga tempat, yaitu: *economizer*, *evaporator*, dan *superheater* [5].

Kesetimbangan Massa dan Energi Boiler pada Proses Steady-Flow

Steady adalah keadaan apabila tidak ada perubahan terhadap waktu pada lokasi tertentu selama proses berlangsung. Energi yang terkandung suatu sistem yang dalam keadaan *steady-flow* selalu konstan, perubahan total energinya adalah nol. Oleh karenanya total energi yang masuk akan sama dengan jumlah energi yang keluar. Begitu pula dengan laju aliran massa suatu fluida yang masuk dan keluar sistem akan tetap konstan selama sistem kondisi *steady-flow*. Untuk perubahan energi kinetik dan potensialnya dapat diabaikan, dan tidak ada kerja yang dilakukan, maka persamaan energi untuk sistem dengan keadaan *steady-flow* adalah [4]:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta h = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

Dimana :

\dot{Q} = laju perpindahan panas yang masuk atau keluar sistem, kJ/s

\dot{m} = laju aliran massa fluida kerja yang masuk atau keluar sistem, kg/s

Δh = perubahan *enthalpy*, kJ/kg

c_p = *specific heat* fluida kerja, J/kg·K

ΔT = perubahan suhu fluida kerja, °C

Perpindahan Kalor

Heat/kalor didefinisikan sebagai bentuk energi yang berpindah antara dua sistem (atau antara sistem dengan lingkungannya) karena adanya perbedaan suhu. Arah perpindahan kalor selalu berpindah dari media dengan suhu yang lebih panas ke media yang bersuhu lebih dingin [4].

Efisiensi Boiler

Metode langsung atau *input-output* merupakan metode perhitungan efisiensi *boiler* yang membandingkan antara energi *output* yang dihasilkan *boiler* dengan energi *input* dari pembakaran bahan bakar. *Output* dari *boiler* adalah panas yang di tambahkan ke dalam fluida kerja selama di dalam *boiler*. Sedangkan *input* ke *boiler* adalah energi panas yang di berikan ke *boiler* dengan pembakaran batu bara. Untuk persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut [6].

$$\eta = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \frac{\dot{Q}_{\text{net}}}{\dot{Q}_{\text{bb}}} \quad (2)$$

Dimana :

\dot{Q}_{bb} = kalor hasil pembakaran batu bara, kJ/s

\dot{Q}_{net} = kalor yang dihasilkan *boiler*, kJ/s

η = efisiensi *boiler*, %

Karakteristik Ash

Berdasarkan komposisi kimianya *ash* dibagi menjadi dua katagori, yaitu *Lignitic* dan *Bituminous ash*. Abu batu bara dikatakan *Lignitic ash* jika mempunyai kadar *Iron* dalam Fe_2O_3 lebih sedikit dari penjumlahan *Calcium* dalam CaO dan *Magnesia* dalam MgO ($\text{Fe}_2\text{O}_3 < \text{CaO} + \text{MgO}$). Sedangkan untuk *bituminous ash* kadar Fe_2O_3 lebih besar dari penjumlahan CaO dan MgO ($\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{CaO} + \text{MgO}$) [7].

Indeks Slagging – Lignitic Ash (R_s^*)

Slagging terjadi karena beberapa faktor seperti kandungan komposisi kimia dan *properties ash*, dan suhu *furnace* [8].

Parameter untuk penilaian *slagging* pada tipe *lignitic ash* adalah suhu leburnya saja. Untuk perhitungannya sebagai berikut [9].

$$R_s^* = \frac{HT+4(IT)}{5} \quad (3)$$

Dimana :

R_s^* = Indeks *Slagging*

HT = *Hemispherical Temperature*, °F

IT = *Initial Deformation Temperature*, °F

Klasifikasi potensi *slagging* jenis *lignitic* adalah sebagai berikut [10].

$2450 < R_s^*$ = rendah / *low*

$2250 < R_s^* < 2450$ = menengah / *medium*

$2100 < R_s^* < 2250$ = tinggi / *high*

$R_s^* < 2100$ = sangat tinggi / *sever*

Indeks *Fouling* – *Lignitic Ash*

Fouling adalah fenomena menempel dan menumpuknya abu batu bara yang melebur pada pipa *boiler*. Hal ini dapat memberikan efek yang besar pada *boiler*, seperti menghambat perpindahan kalor yang menyebabkan penurunan efisiensi *boiler*, tersumbatnya aliran *flue gas*, serta kerusakan pipa akibat terlepasnya clinker yang dapat menimpa pipa *boiler* [11]. Untuk penilaian indeks *fouling* jenis *lignitic ash* berdasarkan kandungan sodium di dalam *ash*. Karakteristiknya sebagai berikut [10].

Ketika $CaO + MgO + Fe_2O_3 > 20\%$ berat dari *coal ash*, maka:

$Na_2O < 3,0$ = rendah hingga menengah

$3,0 < Na_2O < 6,0$ = tinggi

$Na_2O > 6,0$ = sangat tinggi

Ketika $CaO + MgO + Fe_2O_3 < 20\%$ berat dari *coal ash* maka:

$Na_2O < 1,2$ = rendah hingga menengah

$1,2 < Na_2O < 3,0$ = tinggi

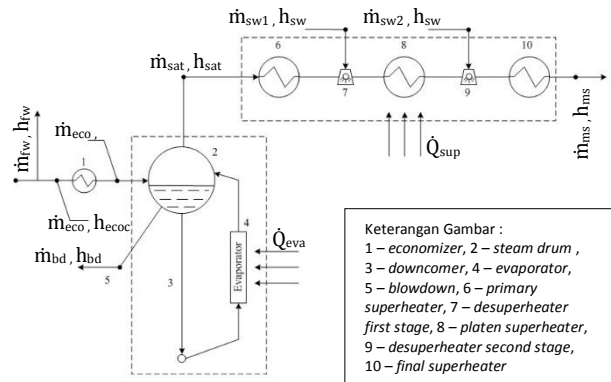
$Na_2O > 3,0$ = sangat tinggi

2. Metode Penelitian

Prinsip Kerja *Boiler* pada PLTU Moramo

Proses kerja *boiler* adalah dari *feedwater* akan mengalami pemanasan lanjut saat melewati *lower* dan *upper economizer* dengan memanfaatkan *flue gas*. Setelah melewati *economizer*, *feedwater* menuju *steam drum*. Di dalam *steam drum* level air dijaga 50% dari diameternya. Kondisi air dalam *steam drum* berupa cair jenuh / *liquid vapor*. Dari *steam drum*, air akan mengalir turun melalui *downcomer* hingga ke *bottom header* yang tersambung dengan pipa-pipa *waterwall* (*evaporator*). Air pada *waterwall* akan mengalami

pemanasan akibat pembakaran hingga menjadi uap jenuh sehingga akan terjadi sirkulasi natural fluida dari *steam drum-downcomer-waterwall*, hingga kembali lagi ke *steam drum*. Uap jenuh yang masuk kembali ke *steam drum* akan di pisahkan di dalam *steam drum*. Uap yang lewat dari *steam drum* akan dipanaskan lebih lanjut menuju *primary superheater*, *platen superheater*, dan *final superheater* hingga menjadi uap kering/*superheated steam* dan dialirkan menuju *turbine*. Untuk mengontrol suhu uap, terdapat dua tingkat *desuperheater/water spray* yaitu diantara *primary superheater-platen superheater* dan *platen superheater-final superheater*. Berdasarkan observasi dilapangan dapat digambarkan diagram kesetimbangan massa dan energi *boiler* pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram kesetimbangan massa dan energi boiler

Formulasi Kesetimbangan Massa dan Energi

Sehingga berdasarkan Gambar 1 dan persamaan 1 dapat dibuat persamaan untuk kesetimbangan energi dan massa di *evaporator* dan *superheater* sebagai berikut.

$$\dot{Q}_{masuk} = \dot{Q}_{keluar} \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{eva} + \dot{Q}_{eco} = \dot{Q}_{sat} + \dot{Q}_{bd} \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{eva} = \dot{Q}_{sat} + \dot{Q}_{bd} - \dot{Q}_{eco} \quad (6)$$

$$\dot{Q}_{eva} = \dot{m}_{sat} \cdot h_{sat} + \dot{m}_{bd} \cdot h_{bd} - \dot{m}_{eco} \cdot h_{eco} \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{sup} + \dot{Q}_{sat} + \dot{Q}_{sw} = \dot{Q}_{ms} \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{sup} = \dot{Q}_{ms} - \dot{Q}_{sat} - \dot{Q}_{sw} \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{sup} = \dot{m}_{ms} \cdot h_{ms} - [(\dot{m}_{ms} - \dot{m}_{sw1} - \dot{m}_{sw2}) \cdot h_{sat}] - [(\dot{m}_{sw1} + \dot{m}_{sw2}) \cdot h_{sw}] \quad (10)$$

Dimana :

\dot{Q}_{eva} = kalor yang diserap oleh *evaporator* dari pembakaran batubara, kJ/s

\dot{Q}_{eco} = kalor *feedwater* yang akan masuk ke dalam *boiler*, kJ/s

- \dot{Q}_{sat} = kalor *saturated steam*, kJ/s
- \dot{Q}_{bd} = kalor *blowdown* yang terbuang keluar boiler, kJ/s
- \dot{Q}_{sup} = kalor yang diserap oleh *superheater* dari *flue gas*, kJ/s
- \dot{Q}_{sw} = kalor *spray water* yang masuk ke dalam boiler, kJ/s
- \dot{Q}_{sat} = kalor *saturated steam*, kJ/s
- \dot{Q}_{ms} = kalor *superheated steam* yang dihasilkan boiler, kJ/s
- \dot{m}_{ms} = laju aliran massa *main steam*, kg/s
- \dot{m}_{sw1} = laju aliran massa *spray water* tingkat satu, kg/s
- \dot{m}_{sw2} = laju aliran massa *spray water* tingkat dua, kg/s
- \dot{m}_{fw} = laju aliran massa *feedwater*, kg/s
- \dot{m}_{eco} = laju aliran massa *inlet economizer*, kg/s
- \dot{m}_{sat} = laju aliran massa *saturated steam*, kg/s
- \dot{m}_{bd} = laju aliran massa *blowdown*, kg/s
- h_{sat} = nilai *enthalpy saturated steam*, kJ/kg
- h_{bd} = nilai *enthalpy blowdown*, kJ/kg
- h_{ecoh} = nilai *enthalpy feedwater* keluaran *economizer*, kJ/kg
- h_{sw} = nilai *enthalpy spray water*, kJ/kg
- h_{ms} = nilai *enthalpy superheated steam* yang dihasilkan boiler, kJ/kg

Perpindahan Kalor pada Waterwall

Dengan data yang terdapat pada tabel 1 maka dapat dicari perpindahan kalor pada *evaporator* yang jabarkan sebagai berikut.

$$\dot{Q}_{eva} = \dot{m}_{sat} \cdot h_{sat} + \dot{m}_{bd} \cdot h_{bd} - \dot{m}_{eco} \cdot h_{ecoh}$$

$$\dot{Q}_{eva} = [(60,384 - 1,896 - 0,274) \cdot 2.732,381] + [(63,693 - 60,384) \cdot 1.391,063] - [(63,693 - 1,896 - 0,274) \cdot 1.231,096]$$

$$\dot{Q}_{eva} = 87.925,728 \text{ kJ/s}$$

Tabel 1. Data operasional boiler

Parameter	Sim-bol	Satuan	Sampel Data 1
Batu bara			
Laju aliran massa	\dot{m}_{bb}	kg/s	9,949
Nilai kalor	HHV_b	kJ/kg	17.166,952
Data Suhu Flue gas			
Keluar <i>furnace chamber</i>	T_{FEGT}	°C	1.002,528
Keluar <i>superheater</i>	T_{SEGT}	°C	609,825
Data Fluida Kerja (Air dan Uap)			
Laju aliran massa <i>feedwater</i>	\dot{m}_{fw}	kg/s	63,693
Suhu <i>feedwater</i>	T_{fw}	°C	221,456
Tekanan <i>feedwater</i>	P_{fw}	MPa	13,559

<i>Enthalpy feedwater</i>	h_{fw}	kJ/kg	953,613
Laju aliran massa <i>economizer</i>	\dot{m}_{eco}	kg/s	61.523
Suhu <i>inlet economizer</i>	T_{ecoc}	°C	220,593
Suhu <i>outlet economizer</i>	T_{ecoh}	°C	279,249
Tekanan <i>economizer</i>	P_{eco}	MPa	9,869
<i>Enthalpy inlet economizer</i>	h_{ecoc}	kJ/kg	948,535
<i>Enthalpy outlet economizer</i>	h_{ecoh}	kJ/kg	1.231,096
Laju Aliran Massa <i>Spray Water 1st stage</i>	\dot{m}_{sw1}	kg/s	1,896
Laju Aliran Massa <i>Spray Water 2nd stage</i>	\dot{m}_{sw2}	kg/s	0,274
Tekanan <i>spray water</i>	P_{sw}	MPa	13,487
Suhu <i>spray water</i>	T_{sw}	°C	221,456
<i>Enthalpy spray water</i>	h_{sw}	kJ/kg	953,590
Tekanan <i>steam drum</i>	P_{sd}	MPa	9,615
Suhu <i>steam drum</i>	T_{sd}	°C	307,107
Laju aliran massa <i>saturated steam</i>	\dot{m}_{sat}	kg/s	58.214
Laju aliran massa <i>blowdown</i>	\dot{m}_{bd}	kg/s	3.309
<i>Enthalpy saturated steam</i>	h_{sat}	kJ/kg	2.732,381
<i>Enthalpy blowdown</i>	h_{bd}	kJ/kg	1.391,063
Laju aliran massa <i>main steam</i>	\dot{m}_{ms}	kg/s	60,384
Tekanan keluar <i>final SH</i>	P_{ms}	MPa	8,708
Suhu keluar <i>final sh</i>	T_{ms}	°C	530,197
<i>Enthalpy main steam</i>	h_{ms}	kJ/kg	3.466,061

Untuk menentukan perpindahan kalor dan kinerja boiler dibutuhkan data-data parameter selama boiler beroperasi. Data-data dapat dilihat pada Tabel 1.

Perpindahan Kalor pada Superheater

Dengan data yang terdapat pada tabel 1 maka dapat dicari perpindahan kalor pada *superheater* yang jabarkan sebagai berikut.

$$\dot{Q}_{sup} = \dot{m}_{ms} \cdot h_{ms} - [(\dot{m}_{ms} - \dot{m}_{sw1} - \dot{m}_{sw2}) \cdot h_{sat}] - [(\dot{m}_{sw1} + \dot{m}_{sw2}) \cdot h_{sw}]$$

$$\dot{Q}_{sup} = [60,384 \cdot 3.466,061 - (60,384 - 1,896 - 0,274) \cdot 2.732,381] - (1,896 + 0,274) \cdot 953,590]$$

$$\dot{Q}_{sup} = 48.162,890 \text{ kJ/s}$$

Efisiensi Boiler

Dengan data yang terdapat pada tabel 1 maka dapat dicari efisiensi boiler yang jabarkan sebagai berikut.

$$\eta = \frac{(\dot{m}_{ms} \cdot h_{ms}) + (\dot{m}_{bd} \cdot h_{bd}) - (\dot{m}_{eco} \cdot h_{ecoc}) - [(\dot{m}_{sw1} + \dot{m}_{sw2}) \cdot h_{sw}]}{\dot{m}_{bb} \cdot HHV_{bb}}$$

$$= \frac{(60,384 \cdot 3466,061) + (3,309 \cdot 1391,063) - (61,523 \cdot 948,535) - (1,896 + 0,274) \cdot 953,590}{9,949 \cdot (17.166,952)}$$

$$\text{Efisiensi} = 89,858 \%$$

Jenis Abu

Penentuan jenis abu/ash perlu dilakukan untuk menentukan apakah abu termasuk dalam lignitic atau bituminous.

Indeks Slagging – Lignitic Ash (R_s^*)

Tabel 2, merupakan data batu bara dan abu hasil pembakaran batu bara yang diperlukan untuk mengetahui indeks slagging dan fouling. Dengan persamaan 3, indeks slagging batu bara didapatkan nilainya sebagai berikut.

$$R_s^* = \frac{[(\frac{9}{5} \times 1.290^\circ\text{C}) + 32] + 4 [(\frac{9}{5} \times 1.280^\circ\text{C}) + 32]}{5}$$

$$= 2.339,6$$

Sehingga pembentukan slagging dikategorikan dalam menengah.

Indeks Fouling – Lignitic Ash

Karena kandungan $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 20\%$ berat dari coal ash, dan $\text{Na}_2\text{O} < 3,0$ maka kategori potensi terbentuk fouling termasuk rendah hingga menengah. Untuk menentukan jenis abu hasil pembakaran batu bara, dan indeks slagging maupun fouling dibutuhkan data-data seperti pada tabel 2.

Tabel 2. Data hasil analisis batu bara dan ash

Parameter	Simbol	Satuan	Supplier X
Ash Content	Ash	massa, %	2,96
Higher heating value	HHVF	kcal/kg	4.103
Silica	SiO_2	massa, %	26,51
Alumina	Al_2O_3	massa, %	11,04
Iron	Fe_2O_3	massa, %	10,38
Calcium	CaO	massa, %	28,71
Magnesium	MgO	massa, %	9,42
Kalium Oxide	K_2O	massa, %	1,87
Sodium	Na_2O	massa, %	0,62
Titanium	TiO_2	massa, %	0,93
Phosphorus	P_2O_5	massa, %	0,04
Sulfit	SO_3	massa, %	9,71
Initial Deformation	IT	$^\circ\text{C}$	1.280

Softening / spherical	ST	$^\circ\text{C}$	1.285
Hemispherical	HT	$^\circ\text{C}$	1.290
Flow / fluid	FT	$^\circ\text{C}$	1.300

3. Hasil dan Pembahasan

Jenis Abu, dan Nilai Indeks Slagging dan Fouling

Baik pada supplier X, Y, maupun supplier Z nilai Fe_2O_3 lebih kecil dari penjumlahan antara CaO dan MgO maka ketiga supplier tersebut dikategorikan dalam jenis lignitic ash. Ketiga supplier batu bara masuk dalam kategori pembentukan slagging menengah. Batu bara supplier Y merupakan memiliki nilai yang paling tinggi dibandingkan dengan batu bara supplier lainnya. Adapun potensi terbentuknya fouling dari ketiga supplier termasuk dalam kategori rendah hingga menengah. Kandungan sodium yang paling rendah dimiliki oleh supplier Y. Semakin tinggi nilai kandungan sodium maka potensi terjadinya fouling akan meningkat [2].

Tabel 3. Kategori terbentuknya slagging dan fouling di boiler dengan penggunaan supplier batu bara X, Y, Z

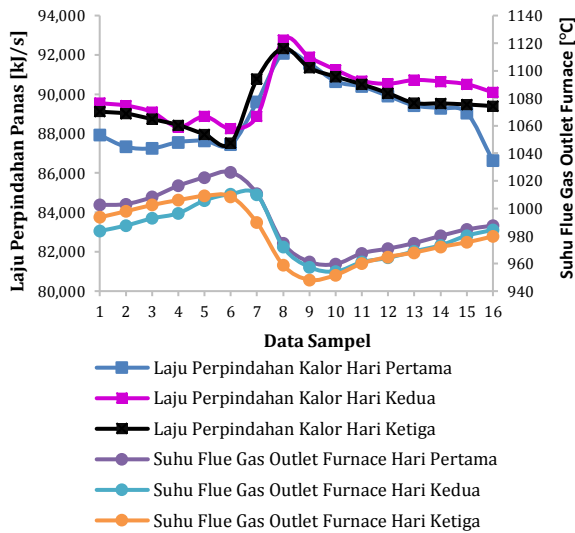
Supplier Batu Bara	Nilai R_s^*	Nilai Na_2O	Kategori Potensi Slagging	Kategori Potensi Fouling
X	2.339,6	0,62%	Menengah	Rendah – menengah
Y	2.370,2	0,48%	Menengah	Rendah – menengah
Z	2.348,6	0,65%	Menengah	Rendah – menengah

Nilai indeks slagging dan kandungan sodium ditunjukkan pada tabel 3.

Perpindahan Kalor pada Waterwall

Setelah proses soot blower berlangsung laju perpindahan kalor akan meningkat karena slagging yang menempel pada dinding boiler terlepas dan kalor yang diserap oleh pipa-pipa di area evaporator meningkat. Pada Hari Pertama perpindahan kalor meningkat dari titik terendah yaitu 87.439,868 kJ/s menuju 92.088,170 kJ/s; pada Hari Kedua meningkat dari 88.250,100 kJ/s menuju 92.754,243 kJ/s; dan Hari Ketiga meningkat dari 87.519,825 kJ/s menuju 92.337,227 kJ/s. Sejalan dengan itu maka suhu flue gas akan turun secara signifikan. Pada Hari Pertama suhu flue gas menurun dari titik tertingginya yaitu 1.026,344 $^\circ\text{C}$ menuju 959,638 $^\circ\text{C}$; lalu pada Hari Kedua menurun dari 1.010,411 $^\circ\text{C}$ menuju 954,208 $^\circ\text{C}$; dan pada Hari Ketiga menurun dari 1.008,625 $^\circ\text{C}$ menuju 948,168 $^\circ\text{C}$.

Peningkatan suhu *flue gas* sejalan dengan peningkatan ketebalan *ash deposit* pada permukaan pipa yang berakibat pada turunnya perpindahan kalor antara *flue gas* dan fluida kerja boiler [3]. Hari Kedua laju perpindahan kalor merupakan yang paling tinggi dengan nilai rata-rata 90.093,776 kJ/s. Dikarenakan menggunakan batu bara *supplier* Y yang memiliki suhu peluburan abu yang paling tinggi sehingga potensi pembentukan *slagging* lebih rendah di dibandingkan dengan Hari Pertama dan Ketiga.



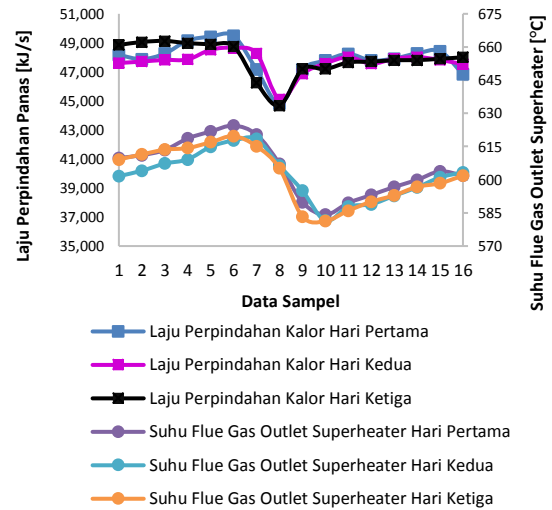
Gambar 2. Grafik laju perpindahan kalor pada *waterwall* dan suhu *flue gas* keluaran *furnace*

Perbandingan laju perpindahan kalor *evaporator* dan suhu *flue gas* keluaran *furnace* baik sebelum maupun sesudah pengoperasian *soot blower* terlihat pada Gambar 2.

Perpindahan Kalor pada *Superheater*

Penurunan laju perpindahan kalor secara drastis baik pada Hari Pertama, Kedua dan Ketiga menunjukkan penyerapan kalor di *evaporator* lebih optimal dalam keadaan setelah *soot blower* sehingga energi kalor yg dihasilkan pembakaran batu bara di *furnace* yang sebagian diserap oleh *evaporator* menjadi lebih banyak. Namun seiring beroperasinya *evaporator* akan terhalang *slag* dan penyerapan kalor di *evaporator* berkurang mengakibatkan energi kalor lebih banyak yang mengarah ke area *superheater* dan bertahap suhu *flue gas* akan meningkat. Namun pada data ke-8 hingga ke-10 menunjukkan ada peningkatan signifikan pada laju perpindahan kalor. Pada Hari pertama laju perpindahan kalornya meningkat dari 44.808,895 kJ/s menjadi 47.786,851 kJ/s dengan penurunan suhu *flue gas* dari 607,193 °C menuju

584,196 °C. Lalu pada Hari Kedua laju perpindahan kalornya meningkat dari 45.116,593 kJ/s menjadi 47.575,295 kJ/s dengan penurunan suhu *flue gas* dari 606,355 °C menuju 581,491 °C. Dan pada Hari Ketiga laju perpindahan kalornya meningkat dari 44.675,328 kJ/s menjadi 47.188,307 kJ/s dengan penurunan suhu *flue gas* dari 605,18 °C menuju 581,27 °C. Hal ini mengindikasikan bahwa selama waktu ini *superheater* menyerap kalor secara optimal.



Gambar 3. Grafik laju perpindahan kalor pada *superheater* dan suhu *flue gas* keluaran *superheater*

Efisiensi Boiler

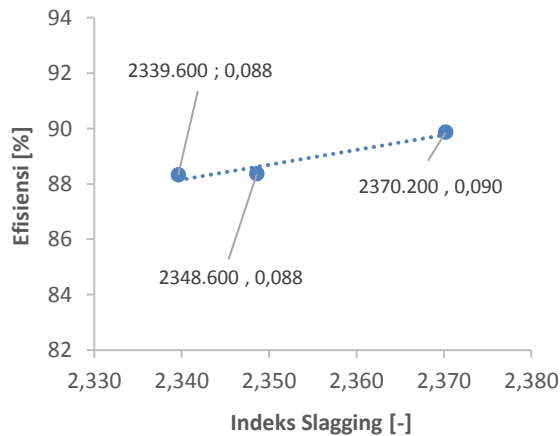
Efisiensi rata-rata selama *boiler* beroperasi yang paling tinggi adalah pada Hari kedua ketika memiliki nilai indeks *slagging* tertinggi dengan nilai 2.370,2 dan kandungan sodium terendah dengan nilai 0,48%. Hal ini terjadi dikarenakan pada Hari kedua potensi *slagging* dan *fouling* merupakan paling rendah dibandingkan Hari Pertama dan ketiga.

Tabel 2. Hasil perhitungan nilai indeks *slagging*, kandungan sodium pada *ash* dan efisiensi rata-rata boiler

Batu bara	Nilai Rs*	Nilai Na ₂ O	Efisiensi Rata-rata
X	2.339,6	0,62%	88,320%
Y	2.370,2	0,48%	89,853%
Z	2.348,6	0,65%	88,349%

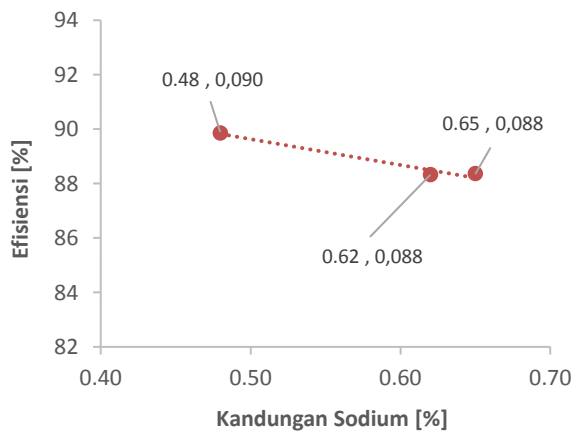
Data hasil perhitungan nilai indeks *slagging*, kandungan sodium pada *ash* dan efisiensi rata-rata boiler dapat dilihat perbandingannya pada Tabel 2. Pada Gambar 4, menunjukkan bahwa tingginya

potensi risiko *slagging* berakibat pada penurunan efisiensi rata-rata *boiler* yang beroperasi kontinu.



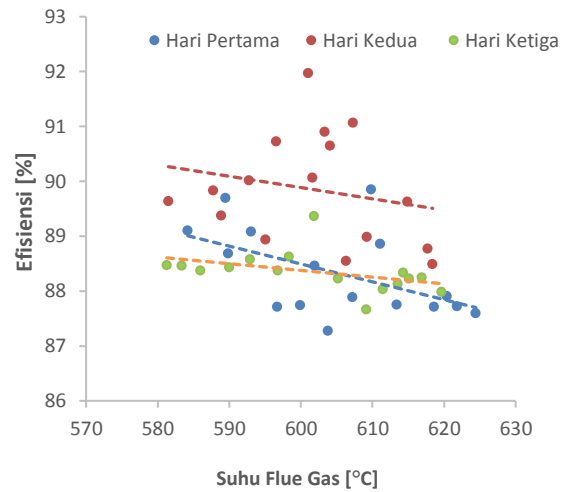
Gambar 4. Grafik hubungan efisiensi *boiler* dengan indeks *slagging*

Sedangkan Gambar 5, menunjukkan bahwa tingginya potensi risiko *fouling* berakibat pada penurunan efisiensi rata-rata *boiler* yang beroperasi kontinu.



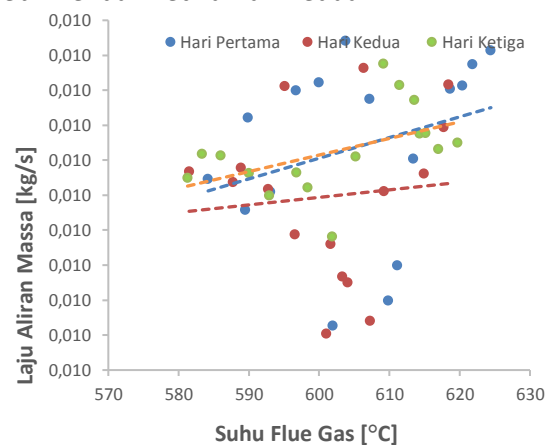
Gambar 5. Grafik hubungan efisiensi *boiler* dengan kandungan sodium

Keberadaan *slagging* dan *fouling* akan meningkatkan suhu *flue gas* yang menunjukkan bahwa perpindahan kalor dari pembakaran ataupun *flue gas* ke fluida kerja *boiler* telah terhambat dan tentunya akan mempengaruhi efisiensi *boiler*. Dengan adanya penurunan suhu *flue gas* menunjukkan bahwa kehilangan kalor yang terbawa oleh *flue gas* juga berkurang dan karenanya meningkatkan efisiensi *boiler* [12].



Gambar 6. Grafik hubungan efisiensi *boiler* dengan suhu *flue gas*

Gambar 6, menunjukkan bahwa ketika suhu *flue gas* rendah maka efisiensi akan cenderung lebih tinggi dan seiring kenaikan suhu *flue gas* maka *trend* efisiensi akan cenderung menurun. Konsumsi batu bara cenderung meningkat seiring dengan kenaikan *flue gas* yang disertai turunnya efisiensi. Hal ini terjadi karena laju perpindahan kalor dari *flue gas* ke fluida kerja *boiler* dibagian *evaporator* terhambat oleh *slagging* yang mengakibatkan produksi uap menurun. Untuk mengkompensasi hal tersebut maka pembakaran batu bara ditingkatkan yang bertujuan menambah produksi uap. Jika efisiensi Hari Pertama, Kedua, dan Ketiga dibandingkan yang paling tinggi adalah Hari Kedua, dan pada saat itu pula bahan bakar yang paling sedikit digunakan. Hal ini berhubungan dengan laju perpindahan kalor yang lebih baik di Hari Kedua yang menggunakan batu bara *supplier* Y. Gambar 7, menggambarkan laju aliran massa batu bara yang lebih tinggi saat suhu *flue gas* meningkat dan laju aliran massa batu bara yang lebih rendah ketika Hari Kedua.



Gambar 7. Grafik hubungan laju aliran massa batu bara terhadap suhu *flue gas*

4. Kesimpulan

Adanya peningkatan suhu *flue gas* yang dipengaruhi oleh penurunan laju perpindahan kalor mengindikasikan terbentuknya *slagging* dan *fouling*. Pada Hari Pertama total laju perpindahan kalornya menurun dari 138.440,017 kJ/s menjadi 133.462,224 kJ/s dengan peningkatan suhu *flue gas* secara bertahap dari 584,196 °C menjadi 601,916 °C. Lalu pada Hari Kedua total laju perpindahan kalornya berkurang dari 138.822,211 kJ/s menjadi 137.631,059 kJ/s dengan kenaikan suhu *flue gas* dari 581,491 °C menuju 603,311 °C. Dan pada Hari Ketiga total laju perpindahan kalornya turun dari 138.084,717 kJ/s menjadi 137.406,308 kJ/s disertai naiknya suhu *flue gas* dari 581,27 °C menuju 601,851°C. Efisiensi *boiler* memiliki kaitan dengan indeks *slagging* (Rs^*) dan kandungan sodium (Na_2O). Semakin tinggi nilai indeks *slagging* dan semakin rendah kandungan sodium maka efisiensi (kinerja) *boiler* akan meningkat. Hal ini dapat dilihat dari masing-masing *supplier* batu bara X dengan nilai Rs^* sebesar 2339,6 dan Na_2O sebesar 0,62%; Y dengan nilai Rs^* sebesar 2370,2 dan Na_2O sebesar 0,48%; dan Z dengan nilai Rs^* sebesar 2348,6 dan Na_2O sebesar 0,65%; menghasilkan efisiensi rata-rata *boiler* secara berturut-turut adalah 88,320%, 89,853%, dan 88,349%.

Daftar Pustaka

- [1] Direktorat Jendral Ketenaga Listrikian Kementrian Energi dan Sumber Daya Alam Mineral, "Statistik Ketenagalistrikan 2019," Sekretariat Jendral Ketenagalistrikan, Jakarta, 2020.
- [2] J. B. Kitto and S. C. Stultz, *Steam its generation and use*, Ohio: The Babcock & Wilcox, 2005.
- [3] M. Bujalski, M. Zyrkowski, D. Nabaglo and S. Krzysztof, "The algorithm of steam soot blowers operation based on the monitoring of fouling factors of heating surfaces of a coal-fired boiler under operating conditions," in *Web of Conferences 82*, Poland, 2019.
- [4] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Thermodynamics An Engineering Approach*, Boston : McGraw-Hill, 2003.
- [5] P. K. Nag, *Power Plant Engineering*, New Delhi: McGraw-Hill, 2008.
- [6] I. Muzaki and A. Mursadin, "Analisis Efisiensi Boiler dengan Metode Input-Output di PT. Japfa Comfeed Indonesia Tbk. Unit Banjarmasin," *SMJE KINEMATIKA*, vol. 4, no. 1, pp. 37-46, 2019.
- [7] C. L. Sianipar, H. E. Handayani and S. , "Analisis Pengaruh Kualitas Batubara Umpan Terhadap Potensi Slagging pada Boiler Circulating Fluidized Bed (CFB) Di PLTU Banjarsari 2 X 135 MW," *Jurnal Pertambangan*, vol. 3, no. 1, pp. 36-43, 2019.
- [8] S. Pipatmanomai, B. Fungtammasan and S. Bhattacharya, "Characteristics and composition of lignites and boilers ashes and their relation to slagging," *ELSEVIER*, vol. Fuel, no. 88, pp. 116-123, 2009.
- [9] P. and I. Agla, "Kemungkinan Terjadinya Slagging Dan Kerugian Efisiensi Akibat Penggunaan Low Rank Coal Pada Boiler PLTU Suralaya Unit 8," *Jurnal Power Plant* , vol. 1, no. 1, pp. 45-54, 2019.
- [10] I. Monika and F. Sulistyohadi, "Sifat Endapan Abu Paduan Batubara dalam Proses," *Indonesian Mining Journal*, vol. 22, no. 1, pp. 49-60, 2019.
- [11] H. S. and A. F. Lubis, "Pengaruh Fouling Terhadap Laju Perpindahan Panas pada Superheater Boiler PLTU Sabalang," *Jurnal Power Plant*, vol. 6, no. 1, pp. 48-57, 2018.
- [12] H. Bhaskaran, "Influence of Flue Gas and Feedwater Temperature on Boiler Efficiency - An Analysis," *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 94-109, 2016.