Analisis Pengaruh Terbentuknya *Slagging* dan *Fouling* Terhadap Efisiensi Boiler pada Boiler *Supercritical*

Nadiyatul Fadhilla^{1*}, Arifia Ekayuliana¹, dan Nusyirwan¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. Dr. G.A Siwabessy, Kampus Baru UI Depok 16425

Abstrak

Pada pembangkit tenaga listrik dengan bahan bakar batu bara sebagian besar ash yang dikeluarkan dalam bentuk leburan atau dalam keadaan plastis, sehingga akan mengakibatkan penumpukan ash pada dinding furnace yang sering disebut slagging dan yang terbawa bersama fly ash akan membentuk fouling pada tube-tube boiler. Terbentuknya slagging dan fouling akan meningkatkan temperatur gas buang keluar furnace sehingga efisiensi boiler akan menurun. Untuk melihat pengaruh terbentuknya slagging dan fouling diperlukan perhitungan efisiensi boiler secara tidak langsung (Indirect Method) berdasarkan ASME Standard : PTC 4.1. Performance Test Code For Steam Generating Unit. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan dan mengidentifikasi potensi terbentuknya slagging dan fouling, pengaruhnya terhadap efisiensi boiler, serta menentukan solusi untuk mengatasi penurunan efisiensi pada boiler supercritical. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa dari keempat pemasok A, B, C dan D dengan batu bara HHV berturut turut 4199,6 kcal/kg, 4082,57 kcal/kg, 4198,6 kcal/kg, 4274,6 kcal/kg yang mempunyai potensi terbentuknya slagging fouling rendah terdapat pada pemasok C. Efisiensi boiler yang dihasilkan oleh masing-masing pemasok dengan memperhatikan potensi terbentuknya slagging dan fouling yaitu berturut-turut 80,99 %, 79,42 %, 81,14 %, 80,61 %. Untuk mengatasi penurunan efisiensi boiler yang diakibatkan oleh slagging dan fouling dapat dilakukan pemilihan batu bara yang sesuai dengan kebutuhan boiler, melakukan pencampuran batu bara dari pemasok yang ada, Memastikan pasokan batu bara yang sesuai dengan kebutuhan boiler masih tersedia dalam jangka waktu yang panjang.

Kata-kata kunci: boiler, efisiensi, fouling, slagging, supercritical

Abstract

In electric power plants with coal fuel, most of the ash is released in fused form or in a plastic state, so it will cause ash buildup on the furnace wall which is often called slagging and which is carried along with the fly ash to form fouling on boiler tubes. The formation of slagging and fouling will increase the temperature of the exhaust gas out of the furnace so that the boiler efficiency will decrease. To see the effect of the formation of slagging and fouling, it is necessary to calculate the indirect efficiency of the boiler (Indirect Method) based on ASME Standard: PTC 4.1. Performance Test Code For Steam Generating Unit. This study aims to determine and identify the potential for the formation of slagging and fouling, its effect on boiler efficiency, and find out the solution to overcome the decrease in efficiency in supercritical boilers. The results of this study indicate that from the four suppliers A, B, C and D with HHV coal respectively 4199.6 kcal / kg, 4082.57 kcal / kg, 4198.6 kcal / kg, 4274.6 kcal / kg which has Low potential for slagging fouling is found in supplier C. Boiler efficiency produced by each supplier takes into account the potential for the formation of slagging and fouling, ie 80.99 %, 79.42 %, 81.14 %, 80.61 %. To overcome the decrease in boiler efficiency caused by slagging and fouling coal can be selected according to the needs of the boiler, mixing coal from

* Corresponding author E-mail address: nadiyatulfadhilla17@gmail.com

existing suppliers, Ensuring that the supply of coal in accordance with the needs of the boiler is still available for a long period of time.

Keywords: boiler, efficiency, fouling, slagging, supercritical

1. PENDAHULUAN

Pada pembangkit tenaga listrik dengan bahan bakar batu bara sebagian besar *ash* keluar dari ruang bakar beserta dengan gas sisa pembakaran. *Ash* dapat dilepaskan dalam bentuk leburan atau dalam keadaan plastis, sehingga akan mengakibatkan penumpukan *ash* pada dinding *furnace* yang sering disebut *slagging* [1]. Selain *slagging*, kandungan sulfat alkali seperti CaSO_4 dan Na_2SO_4 yang terbawa bersama *fly ash* akan membentuk *fouling* pada *tube-tube* boiler [2]. Terbentuknya *slagging* dan *fouling* akan meningkatkan temperatur gas buang keluar *furnace*. Hal ini juga akan mempengaruhi konsumsi penggunaan bahan bakar yang digunakan akan semakin meningkat. Untuk melihat pengaruh terbentuknya *slagging* dan *fouling* diperlukan perhitungan efisiensi boiler secara tidak langsung (*Indirect Method*) berdasarkan *ASME Standard : PTC 4.1. Performance Test Code For Steam Generating Unit* [3].

Beberapa jenis penelitian mengenai pengaruh *slagging* dan *fouling* telah banyak dipelajari. Novriany Amaliyah dan Muhammad Fachry telah melakukan analisis komposisi batubara mutu rendah terhadap pembentukan *slagging* dan *fouling* dengan menggunakan peralatan *Gas Chromatography Mass Spectrophotometer* (GCMS) yang memperlihatkan bahwa indeks *slagging* pada batu bara Tonasa dalam klasifikasi sedang dan indeks *fouling* dalam klasifikasi rendah-sedang. Hal ini menunjukkan bahwa potensi munculnya *slagging* terbukti terjadi padadaerah *furnace* [4]. Selain itu, F Gatot Sumarno, Wahyono dan Ova Imam Aditya telah melakukan penelitian *fouling* dan pengaruhnya pada *final secondary superheater* PLTU Tanjung Jati B Unit 2 yang juga memperlihatkan indeks *fouling* dalam klasifikasi medium untuk *ash bituminous*. Hal ini menunjukkan *fouling* akan berpengaruh pada proses perpindahan panas yang terjadi pada *final secondary superheater* antara *steam* dan *flue gas* [5].

Tujuan dari penulisan makalah ini:

1. Menentukan potensi terbentuknya *slagging* dan *fouling* oleh batu bara dari pemasok A, B, C dan D
2. Menentukan pengaruh *slagging* dan *fouling* terhadap efisiensi boiler
3. Menentukan solusi untuk mengatasi penurunan efisiensi boiler yang disebabkan oleh *slagging* dan *fouling*

2. METODE

Analisis yang dilakukan yaitu analisa perbandingan potensi pembentukan *slagging* dan *fouling* oleh pemasok A, B, C dan D dan membandingkan efisiensi boiler dari setiap pemasok. Setelah dilakukan perbandingan, dilakukan perhitungan penghematan biaya bahan bakar sehingga dapat disimpulkan pemasok mana yang memberikan potensi pembentukan *slagging* dan *fouling* terbanyak, serta pemeliharaan yang dapat mengurangi pembentukan *slagging* dan *fouling* untuk meningkatkan efisiensi boiler.

Gambar 1. Diagram alir pelaksanaan penelitian.

Perhitungan Indeks Slagging

Slagging terjadi pada bagian terdingin boiler. Pada bagian tersebut *inorganik volatil* akan menempelkan membentuk deposit. Selain itu partikel yang meleleh akan mengalami pendinginan dan juga membentuk deposit pada permukaan terdingin boiler. Jika deposit semakin tebal maka akan mengisolasi perpindahan panas dari *flue gas* ke *steam* pada *tube* boiler [1]. Perhitungan indeks *slagging* pada kategori batu bara *bituminus* menggunakan perhitungan indeks *slagging bituminus* sebagai berikut :

$$R_s = \frac{B}{A} \times S\% \quad (1)$$

$$R_s = \frac{CaO + MgO + Fe_2O_3 + Na_2O + KO_2}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2} \times S\% \quad (2)$$

Klasifikasi dari potensi *slagging* seperti berikut :

		R_s	$< 0,6$	= <i>low</i>
0,6	<	R_s	$< 2,0$	= <i>medium</i>
2,0	<	R_s	$< 2,6$	= <i>high</i>
2,6	<	R_s		= <i>severe</i> .

Perhitungan Indeks Fouling

Fouling merupakan akumulasi partikel pada permukaan aliran keluar *flue gas*, yaitu aliran *flue gas* yang melewati permukaan *superheater*, *reheater* dan aliran pipa penguapan. Evaluasi karakteristik *fouling* sama dengan untuk *slagging*, yaitu dinilai dari rasio unsur basa dan asam serta kadar Na_2O didalam *ash*. Jika nilai-nilai tersebut tinggi, maka secara umum kecenderungan *fouling* juga meningkat. Selanjutnya kadar sulfur yang tinggi juga cenderung mendorong timbulnya *fouling* melalui pembentukan senyawa bertemperatur lebur lebih rendah melalui persenyawaan dengan unsur basa ataupun besi [2]. Perhitungan indeks *fouling* pada kategori batu bara *bituminus* menggunakan perhitungan indeks *fouling bituminus* sebagai berikut :

$$R_f = \frac{B}{A} \times NaO\% \quad (3)$$

$$R_f = \frac{CaO + MgO + Fe_2O_3 + Na_2O + KO_2}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2} \times NaO\% \quad (4)$$

Klasifikasi dari potensi *fouling* seperti berikut:

		R_f	$< 0,2$	$= low$
0,2	$<$	R_f	$< 0,5$	$= medium$
0,5	$<$	R_f	$< 1,0$	$= high$
1,0	$<$	R_f		$= severe.$

Perhitungan Efisiensi Boiler

Efisiensi boiler merupakan unjuk kerja atau tingkat unjuk kerja boiler yang didapatkan dari perbandingan antara energi yang dipindahkan atau diserap oleh fluida kerja didalam boiler dengan masukan energi kimia dari bahan bakar[6]. Perhitungan efisiensi boiler dapat dilakukan dengan metode tidak langsung menggunakan acuan *ASME Standard : PTC 4.1. Performance Test Code for Steam Generating Unit*[3]. Metode tidak langsung juga dikenal dengan metode kehilangan panas dengan menggunakan data boiler efisiensi unit pembangkit yang diperoleh dari *control room*.

Beberapa parameter perlu didapatkan sebelum perhitungan keseluruhan kehilangan panas dapat dihitung. Tahap pertama adalah dengan menghitung kebutuhan udara teoritis (KUT) dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$KUT \left[\frac{kg}{kg} bb \right] = \frac{\left[(11,6 \times C) + \left(34,8 \times \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + (4,35 \times S) \right) \right]}{100} \quad (5)$$

Tahap kedua adalah menghitung kelebihan yang dipasok atau *excess of air* (EA) yang dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$EA[\%] = \frac{excess O_2}{21 - excess O_2} \times 100 \quad (6)$$

Tahap ketiga adalah menghitung massa udara sebenarnya yang dipasok atau *actual mass of air supplied* (AAS). Nilai EA dan KUT didapatkan menggunakan persamaan (5) dan (6) berturut-turut, sehingga didapatkan :

$$ASS \left[\frac{kg}{kg} bb \right] = \left(1 + \frac{EA}{100} \right) \times KUT \quad (7)$$

Tahap keempat adalah menghitung massa udara gas buang kering atau *mass dry* (M_{dry}) yang dapat dihitung dengan persamaan :

$$M_{dry} = M_{CO_2} + M_{N_2 \text{ bahan bakar}} + M_{N_2 \text{ pembakaran udara}} + M_{O_2 \text{ gas buang}} \quad (8)$$

Total kehilangan panas dapat dihitung dengan menjumlahkan kehilangan panas yang diakibatkan oleh gas buang kering L_1 , persentase H_2 dalam bahan bakar L_2 , penguapan kadar air dalam bahan bakar L_3 , kadar air pada udara L_4 , radiasi L_5 , *fly ash* L_6 , dan *bottom ash* L_7 .

Persentase kehilangan panas L_1 dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$L_1[\%] = \frac{M_{dry} \times C_p \times (T_f - T_a)}{HHV} \times 100 \quad (9)$$

Dimana : C_p = kalor jenis gas buang
 m_{dry} = massa gas buang kering
 T_f = *flue gas temperature*
 T_a = *ambient temperature*

Persentase kehilangan panas L_2 didapatkan menggunakan persamaan

$$L_2[\%] = \frac{9 \times H_2 \times (584 + C_p \times (T_f - T_a))}{HHV} \times 100 \quad (10)$$

Dimana CH_2 adalah persentase H_2 dalam 1 kg bahan bakar. Persentase kehilangan panas L_3 dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$L_3[\%] = \frac{M \times (584 + C_p \times (T_f - T_a))}{HHV} \times 100 \quad (11)$$

Dimana M adalah persentase kadar air dalam 1 kg bahan bakar. Selanjutnya, persentase kehilangan L_4 didapatkan dengan menggunakan persamaan :

$$L_4 [\%] = \frac{ASS \times kelembapan \times C_p \times (T_f - T_a)}{HHV} \times 100 \quad (12)$$

Persentase kehilangan panas L_5 didapatkan dari referensi *Losses from ASME Standard : PTC 4.1. Power Test Code for Steam Generating Units*. Besar nilai L_5 adalah 0,19%. Terakhir adalah persentase kehilangan L_6 dan L_7 didapatkan dari hasil uji laboratorium batubara.

Efisiensi boiler dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (9) sampai (12) yang dirumuskan menjadi :

$$EfisiensiBoiler [\%] = 100 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7) \quad (13)$$

Perhitungan Potensi Penambahan Biaya Bahan Bakar (*Additional Fuel Cost*)

Perhitungan efisiensi boiler dilakukan dengan sampel batubara yang berasal dari berbagai pemasok dan didapatkan kalori batubaranya. Selanjutnya dilakukan perbandingan dengan efisiensi ideal boiler sehingga didapatkan selisih biaya bahan bakar yang seharusnya dapat dihemat dikarenakan penurunan efisiensi boiler akibat menggunakan sampel bahan bakar tersebut [7]. Potensi penambahan biaya bahan bakar dapat dirumuskan dengan persamaan berikut :

$$AdditionalFuelCost [Rp] = BiayaBahanbakarideal - S \quad (14)$$

$$S = W_f \times \frac{E_i - E_n}{E_i} \times C_f \times t \quad (15)$$

Dimana, S = Kerugian akibat perubahan efisiensi (Rp)
 W_f = Tingkat penggunaan bahan bakar (kcal/h)
 E_i = Efisiensi Ideal (%)
 E_n = Efisiensi Aktual (%)
 C_f = Biaya bahan bakar per kilo kalori (Rp/kcal)
 t = Jam operasi (h)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada perhitungan *indeks slagging* dan *fouling* dibutuhkan data senyawa kimia pada batu bara setiap pemasok yang terdapat pada *certificate of sampling and analysis* (CoA) dalam bentuk *dry basis* yang tidak mengandung *moisture*, dan untuk perhitungan efisiensi boiler dibutuhkan data operasi boiler yang didapatkan dari *control room* dan laboratorium Pembangkit X.

Tabel 1. Data Sampel Batubara

Time		11/9/2018	17/9/2018	24/9/2018	16/10/2018
Load		642,7822	639,9261	642,6483	645,0987
Pemasok		A	B	C	D
Data Parameter	Satuan	Nilai	Nilai	Nilai	Nilai
SiO ₂	%	28,62	43,88	33,1	40,07
Al ₂ O ₃	%	17,34	24,52	28,55	15,93
Fe ₂ O ₃	%	28,12	9,34	28,55	20,25
CaO	%	12,02	7,5	10,6	10,32
MgO	%	4,99	6,32	5,79	6,72
Na ₂ O	%	0,23	0,92	0,16	0,18
K ₂ O	%	0,56	0,44	0,68	0,62
TiO ₂	%	0,58	1,46	0,65	0,71
Sulfur Content	%	0,13	0,14	0,15	0,12

Pada pembangkit X ini menggunakan bahan bakar batu bara yang termasuk dalam kategori *Low Rank Coal* yang digunakan untuk *supply* boiler dengan rata-rata HHV yang digunakan 4200 kCal/kg. Untuk menghitung nilai *base acid ratio* dari batu bara yang digunakan, perlu adanya data komposisi unsur senyawa dari hasil pembakaran batu bara tersebut. Data dari *certificate of sampling and analysis* (CoA) dapat dihitung serta diketahui hasil indeks *slagging* dan *fouling* yang terjadi sebelum dan sesudah overhaul. Hasil perhitungan dan klasifikasi batu bara yang digunakan pada pembangkit X dapat dilihat pada gambar 2 sebagai berikut :

Dari gambar 3 dijelaskan hubungan tentang hasil perhitungan indeks *slagging* dan *fouling* dari hasil pembakaran batu bara. Dari gambar tersebut juga didapatkan hasil bahwa indeks *slagging* tertinggi terjadi pada tanggal 22 Oktober 2018 dengan nilai 0,33 dengan klasifikasi “*Low*” yang bersumber dari pemasok B. Faktor yang mempengaruhi tinggi atau rendahnya potensi terbentuknya *slagging* pada proses pembakaran di boiler dikarenakan oleh tingkat *sulfur* yang terkandung pada batu bara yang digunakan pada proses pembakaran. Selain itu juga pada bahan batu bara yang digunakan saat pembakaran di boiler. Batu bara yang digunakan memiliki HHV yang lebih rendah, sehingga akan berpengaruh pada hasil Na_2O serta *sulfur* yang terkandung didalamnya.

Gambar 2. Grafik Indeks Slagging dan Fouling

Dari gambar 2 dijelaskan hubungan tentang hasil perhitungan indeks *slagging* dan *fouling* dari hasil pembakaran batu bara. Dari gambar tersebut juga didapatkan hasil bahwa indeks *slagging* tertinggi terjadi pada tanggal 22 Oktober 2018 dengan nilai 0,33 dengan klasifikasi “*Low*” yang bersumber dari pemasok B. Faktor yang mempengaruhi tinggi atau rendahnya potensi terbentuknya *slagging* pada proses pembakaran di boiler dikarenakan oleh tingkat *sulfur* yang terkandung pada batu bara yang digunakan pada proses pembakaran. Selain itu juga pada bahan batu bara yang digunakan saat pembakaran di boiler. Batu bara yang digunakan memiliki HHV yang lebih rendah, sehingga akan berpengaruh pada hasil Na_2O serta *sulfur* yang terkandung didalamnya.

Pada gambar 2 juga menjelaskan potensi terbentuknya *fouling* dari hasil pembakaran batu bara. Hal ini juga memperlihatkan indeks *fouling* tertinggi terjadi pada tanggal 10 Desember 2018 dengan nilai 0,9835 yang mempunyai klasifikasi “*High*” bersumber dari pemasok B. Hal ini disebabkan karena batu bara yang digunakan mempunyai HHV rendah sehingga akan berpengaruh pada hasil Na_2O serta *sulfur* yang terkandung didalamnya. Selain itu gambar 2 juga menjelaskan potensi terbentuknya *slagging* dan *fouling* sebelum overhaul lebih tinggi dibanding setelah overhaul, maka hal ini dapat dibuktikan dengan gambar 3 yang memperlihatkan *fouling* yang terbantuk di boiler pembangkit X.

Gambar 3. *Slagging* pada Pipa *Superheater*

Adanya *slagging* yang menempel pada pipa *superheater* dapat membuat perpindahan panas pada pipa terhambat. Sehingga menghasilkan uap yang tetap maka kebutuhan bahan bakar bertambah, ketika bahan bakar bertambah temperatur pembakaran akan semakin tinggi yang nantinya temperatur sisa pembakaran yang keluar dari boiler akan semakin tinggi. Hal seperti inilah yang menyebabkan efisiensi boiler menurun, karna semakin tinggi temperatur gas keluar maka efisiensi akan berkurang.

Gambar 4. Grafik Perbandingan Efisiensi Boiler dengan *Indeks Slagging* dan *Fouling*

Slagging dan *fouling* selain berpengaruh pada perpindahan panas juga akan mempengaruhi efisiensi boiler. Hal ini dapat dibuktikan dengan grafik pada gambar 4 dengan potensi terbentuknya *slagging* dan *fouling*. Berdasarkan grafik tersebut terlihat jelas bahwa pengaruh indeks *slagging* dan *fouling* akan berpengaruh besar bagi efisiensi boiler. Apabila *slagging* dan *fouling* menurun maka efisiensi boiler akan meningkat. Hal ini dapat dilihat pada tanggal 22 Oktober 2018 efisiensi boiler berada pada posisi paling rendah ini dikarenakan indeks *slagging* dan *fouling* sangat tinggi. Sedangkan untuk efisiensi yang tertinggi terdapat pada tanggal 24 September 2018 dengan menggunakan batu bara HHV yang tinggi serta kandungan sulfur dan Na_2O yang rendah. Sehingga potensi untuk pembentukan *slagging* dan *fouling* rendah serta efisiensi boiler menjadi tinggi. Pada gambar 4 juga terlihat perbedaan efisiensi boiler sebelum dan sesudah

overhaul, efisiensi boiler sebelum overhaul terjadi fluktuatif yang dikarenakan HHV dan senyawa pada batu bara yang bervariasi sedangkan sesudah overhaul efisiensi boiler relatif kontinu yang disebabkan oleh HHV dan senyawa batu bara yang digunakan mendekati spesifikasi boiler

Gambar 5. Perbandingan Efisiensi Setiap Pemasok

Berdasarkan perhitungan data diatas untuk masing-masing pemasok maka dapat disimpulkan efisiensi boiler, *indeks slagging* dan *fouling* masing masing pemasok terdapat pada gambar 5. *Indeks fouling* tertinggi dihasilkan oleh pemasok B yang dikarenakan kandungan senyawa pada batu bara pemasok B lebih tinggi dari pemasok lainnya. Begitu pula dengan efisiensi boiler yang dihasilkan oleh pemasok B, semakin tinggi *indeks slagging* dan *fouling* maka efisiensi boiler menurun. Sedangkan untuk efisiensi boiler tertinggi terdapat pada pemasok C. Hal ini disebabkan kandungan senyawa asam basa yang lebih rendah dan mempunyai HHV batubara yang lebih tinggi dari pemasok lainnya sehingga menyebabkan efisiensi boiler lebih tinggi. Dari perbedaan yang terlihat pada gambar 5 maka dapat direkomendasikan batu bara yang sesuai dengan boiler pada pembangkit X adalah batu bara yang dipasok oleh pemasok C dengan mempunyai efisiensi boiler yang tinggi dan *indeks slagging fouling* yang rendah dibandingkan pemasok lainnya.

Perbedaan efisiensi boiler akan berpengaruh terhadap konsumsi batu bara, semakin tinggi konsumsi batu bara maka efisiensi akan berkurang sehingga menyebabkan pemborosan konsumsi batu bara. HHV batu bara juga akan mempengaruhi konsumsi batu bara, semakin rendah HHV batu bara maka konsumsi batu bara akan bertambah hal ini akan menambah pengeluaran biaya konsumsi batu bara. Gambar dibawah ini memperlihatkan perbandingan penghematan biaya konsumsi batu bara.

Gambar 6. Perbandingan *Additional Fuel Cost*

HHV batu bara pemasok mempengaruhi biaya konsumsi batu bara. Gambar 6 memperlihatkan dengan menghasilkan beban yang sama namun kalori batu bara yang berbeda mempunyai perbedaan penambahan biaya bahan bakar. Penambahan bahan bakar tertinggi terdapat pada pemasok B sebesar Rp5.449.704.468 yang mempunyai HHV rendah sebesar 4082,57 Kcal/kg. Hal ini dikarenakan semakin rendah nilai kalori batubara maka konsumsi batu bara akan meningkat sehingga akan menambahkan biaya bahan bakar.

Terbentuknya *slagging* dan *fouling* pada boiler dapat mengakibatkan penurunan efisiensi boiler, untuk mencegah penurunan tersebut maka pembangkit dapat melakukan beberapa hal berikut yaitu :

1. Melakukan pemilihan batu bara yang sesuai dengan kemampuan boiler dan melakukan perpanjangan kontrak dengan pemasok yang mempunyai batu bara sesuai dengan kebutuhan boiler.
2. Melakukan pencampuran batu bara dari pemasok yang ada sehingga mendapatkan campuran batu bara yang menghasilkan *slagging* dan *fouling* rendah. Namun hal ini tetap menghasilkan *slagging* dan *fouling*, sehingga dibutuhkan bantuan peralatan untuk mengurangi *slagging* dan *fouling*. Untuk mengurangi *slagging* hanya dapat dilakukan pada saat pembangkit kondisi off karena *slagging* mempunyai karakter jelaga yang keras dan sulit untuk dibersihkan menggunakan sootblower. Sedangkan untuk mengurangi *fouling* diperlukan bantuan penggunaan sootblower yang akan membersihkan jelaga yang menempel pada pipa-pipa boiler.
3. Memastikan pasokan batu bara yang sesuai dengan kebutuhan boiler masih tersedia dalam jangka waktu yang panjang, jika ketersediaan tidak memadai lakukan pembelian saham pada pemasok sehingga dapat menjaga ketersediaan batu bara yang dibutuhkan.

Dari data yang telah didapatkan maka peneliti merekomendasikan batu bara dari pemasok C untuk dikonsumsi oleh pembangkit X. Hal ini dikarenakan HHV batu bara pemasok C mendekati spesifikasi HHV pembangkit X 40198,6 kcal/kg, sedangkan untuk potensi terbentuknya *slagging* dan *fouling* lebih baik dari batu bara pemasok A yang mempunyai HHV lebih tinggi dari pemasok C. Namun dengan melihat semua perbandingan, maka dapat direkomendasikan batu bara pemasok C lebih tepat untuk pembangkit X.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan beberapa hal, antara lain

1. Potensi terbentuknya *slagging* oleh pemasok A bernilai 0,116 yang mempunyai klasifikasi "Low", pemasok B bernilai 0,147 yang mempunyai klasifikasi "Low", pemasok C bernilai 0,16 yang mempunyai klasifikasi "Low", pemasok D bernilai 0,136 yang mempunyai klasifikasi "Low". Sedangkan potensi terbentuknya *fouling* oleh pemasok A bernilai 0,284 yang mempunyai klasifikasi "Medium", pemasok B bernilai 0,529 yang mempunyai klasifikasi "High", pemasok C bernilai 0,217 yang mempunyai klasifikasi "Medium", pemasok D bernilai 0,36 yang mempunyai klasifikasi

- “Medium”. Maka dengan perhitungan indeks slagging dan fouling batu bara pemasok B mempunyai potensi terbentuknya slagging dan fouling lebih tinggi dibandingkan pemasok lainnya.
2. Terbentuknya slagging dan fouling pada boiler mengakibatkan penurunan perpindahan panas pada pipa-pipa boiler sehingga temperatur flue gas tinggi menyebabkan efisiensi boiler berkurang. Hal ini dapat dilihat dari efisiensi boiler yang dihasilkan oleh masing-masing pemasok dengan memperhatikan potensi terbentuknya slagging dan fouling yang berturut-turut 80,99 %, 79,42 %, 81,14 %, 80,61 %.
 3. Untuk mengatasi penurunan efisiensi boiler yang diakibatkan oleh slagging dan fouling dapat dilakukan pemilihan batu bara yang sesuai dengan kebutuhan boiler, melakukan pencampuran batu bara dari pemasok yang ada, memastikan pasokan batu bara yang sesuai dengan kebutuhan boiler masih tersedia dalam jangka waktu yang panjang.

REFERENSI

1. H. Speliethoff, “Characterization of Slagging and Fouling in Biomass Combustion Bioslag,” *Energy Technology TU Delft*, 2000.
2. T. B. & W. Company, “Steam its Generation and Use Edition : 40 Chapture”. 2005.
3. ASME, “ASME Standard PTC 4.1. Performance Test Code for Stean Generating Unit”.
4. N. Amaliyah dan M. Fachry, “Analisis Komposisi Batubara Mutu Rendah Terhadap Pembentukan Slagging dan Fouling Pada Boiler,” *Jurnal Energy*, 2011.
5. F. G. Sumarno, W. dan O. I. Aditya, “Fauling dan Pengaruhnya Pada Final Secondary Superheater PLTU Tanjung Jati B Unit 2,” *Jurnal Energi Jurusan Teknik Mesin PNS*, vol. 10 No 1, 2014.
6. M. E. Sangputri dan A. G. , “Perhitungan Efisiensi Boiler Unit 20 PT PJB UBJOM Rembang Pada Beban 315 MW Dengan Metode Langsung (Directed Method),” *Jurnal Kerja Praktek*, vol. 1 No 1, 2015.
7. Nussyirwan, “Optimasi Efisiensi,” dalam *Aset Manajemen*, Jakarta, 2017.