

## Kemungkinan Terjadinya *Slagging* Dan Kerugian Efisiensi Akibat Penggunaan *Low Rank Coal* Pada *Boiler* PLTU Suralaya Unit 8

**Prayudi**

Jurusan D3 Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknik – PLN

Email : [prayudi@sttpln.ac.id](mailto:prayudi@sttpln.ac.id)

**Ik Agla**

Jurusan D3 Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknik – PLN

### **Abstract**

*Design a coal-fired power plant is made based on the type and specifications of the coal that will be used. In other words, the power plant can only use one type of coal. Suralaya unit 8 uses coal from Kalimantan to the type of low rank coal and calorific value of 4200 kcal / kg. The low rank coal when burned will produce enough ash to be a pretty big slagging potential.*

*This thesis discusses any loss suffered in the event of slagging. And its effects on the efficiency of the boiler, as well as the way in which the Suralaya unit 8 in troubleshooting the slagging.*

*Keywords : coal specification, design Suralaya boiler unit 8, Efficiency Boiler, slagging and fouling, heat transfer.*

### **1. PENDAHULUAN**

PLTU merupakan salah satu pembangkit listrik utama yang ada di Indonesia karena dapat menghasilkan energi listrik yang besar, sebagai contoh adalah PLTU Suralaya yang dapat menghasilkan listrik sampai 3400 MW, yang cukup untuk memenuhi 30% kebutuhan listrik di Jawa, Bali, dan Madura . Dengan bahan baku air dan bahan bakar yang fleksibel, yaitu bisa dengan batu bara, minyak, sawit, bahkan sampah menjadikan PLTU sebagai pembangkit dengan biaya produksi yang murah.

Pembangkit Listrik Tenaga Uap merupakan jenis pembangkit yang menggunakan uap sebagai media pemutar sudu-sudu turbin. Dimana uap yang digunakan adalah uap kering (*Superheated Steam*). Siklus kerja PLTU sama seperti siklus Rankine yang sudah dimodifikasi, dimana siklus dimulai dari air masuk ke *economizer* dan *boiler furnace*, kemudian terjadi pembakaran dan air berubah menjadi uap jenuh, uap jenuh dikirim ke *superheater* yang memanfaatkan panas radiasi di *furnace* untuk mengubah uap jenuh menjadi uap kering. Uap kering ini dikirim ke turbin dan dimanfaatkan kecepatan uapnya untuk menggerakkan sudu turbin dan memutar generator. Pada PLTU Suralaya, pembakaran dan pemanasan air menjadi uap itu dihasilkan

dari pembakaran batubara sebagai bahan bakar utama.

PLTU batubara juga menggunakan bahan bakar minyak dan solar sebagai bahan bakar awal untuk pemantik (*lighter*), dan udara luar yang dimasukkan ke *furnace* melalui *Force Draft Fan* untuk membantu terjadinya pembakaran sempurna. Pembakaran sempurna inilah merupakan faktor penentu efisiensi boiler. Untuk menciptakan pembakaran yang sempurna dibutuhkan bahan bakar yang memiliki kualitas terbaik, baik dari nilai kalornya ataupun sifat-sifat lainnya, dan tidak meninggalkan zat-zat lain yang tidak bisa terbakar habis. Karena dari zat-zat yang tersisa ini tidak hanya mengurangi efisiensi *boiler*, tapi juga bisa merusak peralatan-peralatan di dalam *boiler*. Oleh karena itu, penting sekali untuk memilih-milih bahan bakar yang akan digunakan pada *boiler*.

Jenis dan spesifikasi batubara sangat dipengaruhi oleh lingkungan tempat penambangan batubara itu dan kondisi udara disekitarnya. Dengan letak geografis Indonesia yang merupakan negara kepulauan, lingkungan di setiap tambang juga pasti berbeda-beda. Oleh karena itulah setiap tambang batubara akan menghasilkan batubara dengan jenis dan spesifikasi yang berbeda-beda pula.

Suatu *boiler* pada PLTU didesain dengan mempertimbangkan lebih dahulu jenis dan spesifikasi batubara yang akan digunakan. Karena akibat dari pembakaran batubara tentunya akan sangat mempengaruhi umur dari konstruksi *boiler*. *Boiler* yang menggunakan batubara *low rank* akan didesain lebih tinggi dari pada *boiler* yang menggunakan batubara *high rank*. Tinggi dan bentuk boiler juga diperhitungkan dari potensi slagging batubara yang digunakan. Semakin besar potensi slagging yang dihasilkan, semakin tinggi konstruksi boiler tersebut.

Sistem penanganan batubara (*Coal Handling*) dari mulai diangkat dengan kapal sampai masuk ke *Pulverizer* dan kemudian dibakar juga berperan dalam terjadinya pembakaran sempurna. Keadaan lingkungan tempat batubara ditampung (*Stockpile*) juga harus diperhatikan. Sistem Penanganan yang buruk bisa mengurangi kualitas batubara, dan bahkan bisa merusak peralatan PLTU. *Coal Sampling* atau pengujian batubara harus selalu dilakukan untuk mengamati batubara yang akan dimasukkan ke mesin agar sesuai dengan spesifikasi desain mesinnya.

## 2. KAJIAN LITERATUR

### Pengertian Batu Bara

Batubara adalah mineral organik yang dapat terbakar, terbentuk dari sisa tumbuhan purba yang mengendap yang selanjutnya berubah bentuk akibat proses fisika dan kimia yang berlangsung selama jutaan tahun. Adapun proses yang mengubah tumbuhan menjadi batubara tadi disebut dengan pembatubaraan (*coalification*).

Faktor tumbuhan purba yang jenisnya berbeda – beda sesuai dengan jaman geologi dan lokasi tempat tumbuh dan berkembangnya, ditambah dengan lokasi pengendapan (sedimentasi) tumbuhan, serta perubahan geologi yang berlangsung lama (maturitas organik), akan menyebabkan terbentuknya batubara yang jenisnya bermacam – macam. Oleh karena itu, karakteristik batubara berbeda-beda sesuai dengan lapangan batubara (*coal field*) dan lapisannya (*coal seam*). [ 7 ]

### Asal Batubara

Batubara Berasal dari pelapukan “*decay*” dari kayu-kayuan, tumbuh-tumbuhan karena adanya panas matahari saat awal geologi. Tumpukan tumbuh-tumbuhan karena pengaruh alam, dan adanya pergeseran kerak bumi/tektonik, tertimbun tanah dan kotoran, sehingga kontak dengan udara luar menjadi tertutup. Dalam kurun waktu yang panjang tumpukan tumbuhan itu terpengaruh oleh air, panas dan tekanan, sehingga zat-zat organik dan *selulosa* ( $C_6H_{10}O_6$ ) berubah menjadi *Carbon* dan *hydrogen*. Secara bertahap pada kondisi ini kayu berubah menjadi *peat*, *lignit*, *subbituminus*, *bituminus*, *antracite*.

### Klasifikasi Batubara

Berdasarkan proses pembentukan dan bentuk fisik nya batubara dibedakan menjadi :

#### 1. Lignit / batubara muda

Batubara muda ini berwarna agak coklat dengan garis-garis yang nampak seperti kayu, karena maturitas organiknya rendah, batubara ini lebih lembut, unsur *volatile* nya tinggi dan nilai kalornya lebih rendah daripada jenis lainnya. Memiliki kandungan air yang besar bisa mencapai 45%.

#### 2. Subbituminus

Berwarna hitam kecoklat-coklatan atau hitam saja, bersifat homogen dengan permukaan halus, dan tidak nampak adanya lapisan-lapisan. Batubara ini menguap jika berkenaan dengan udara, jika ini terjadi, batubara akan retak dan bisa terbakar sendiri (*spontaneous combustion*).

#### 3. Bituminus

Batubara ini yang bila dipanaskan akan menggumpal dan sulit dipecah. Berwarna hitam keabu-abuan. Batubara ini cocok dipakai untuk pembuatan gas. Batubara bituminus diklasifikasikan lagi menjadi bituminus *volatile* A, B, dan C.

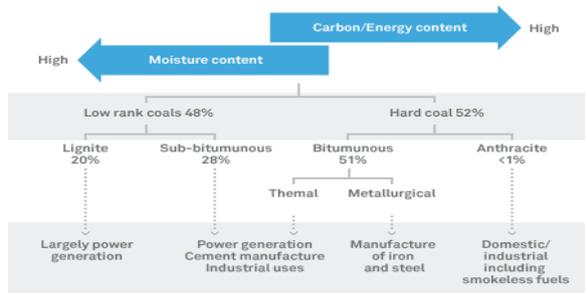
- Bituminus dengan *volatile* tinggi A, sebagian besar bersifat homogen tanpa nampak butir-butir, tetapi beberapa menunjukkan lapisan-lapisan jelas, bersifat keras dan kuat, dengan sedikit retak-retak. Kandungan air, belerang dan kandungan abunya rendah dengan nilai kalor yang tinggi.
- Bituminus dengan *volatile* tinggi B, mempunyai susunan garis-garis sejajar (laminar) yang jelas. Bersifat keras dan

tahan, retak-retak umumnya membentuk sudut 90<sup>0</sup> dan sejajar lapisan, karena itu bongkahannya berbentuk kubus.

- Bituminus dengan *volatile* tinggi C, mempunyai struktur laminer yang jelas, keras, dan sangat kuat. Umumnya memiliki kandungan air, belerang dan abu yang tinggi dan batubara ini dikenal dengan batubara yang mudah terbakar.

4. Antrasit

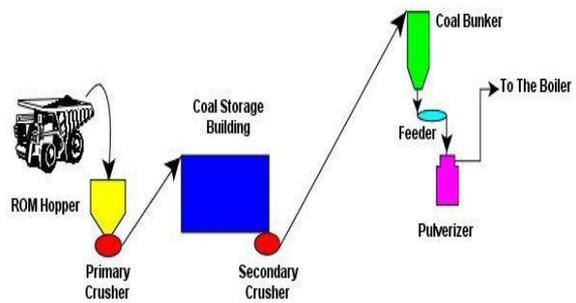
Batubara dengan kualitas yang paling baik. Bersifat keras dengan warna hitam mengkilat, homogen dengan tanpa ada tanda-tanda berlapis. Batubara jenis ini tidak mudah terbakar, untuk mempermudah pembakaran, umumnya digiling terlebih dahulu sebelum dibakar.



Sistem penggilingan batubara di PLTU Feeders Adalah alat pengatur aliran batubara yang akan masuk ke mills. Ada 2 jenis feeder yang digunakan di PLTU yaitu:

- *Volumetric feeder*  
Feeder yang mengatur jumlah batubara yang masuk ke mills berdasarkan ukuran atau tinggi butiran batubara. batubara yang tingginya melebihi batas akan tertahan dan tidak bisa masuk ke mills.
- *Gravimetric coal feeders*  
Digunakan untuk mengatur jumlah batubara yang akan jatuh ke pulverizers per berat jenisnya.
- *Mills*  
Adalah alat yang digunakan untuk menghancurkan/menggiling batubara sampai menjadi butiran halus.

Secara umum sistem coal handling adalah sebagai berikut :

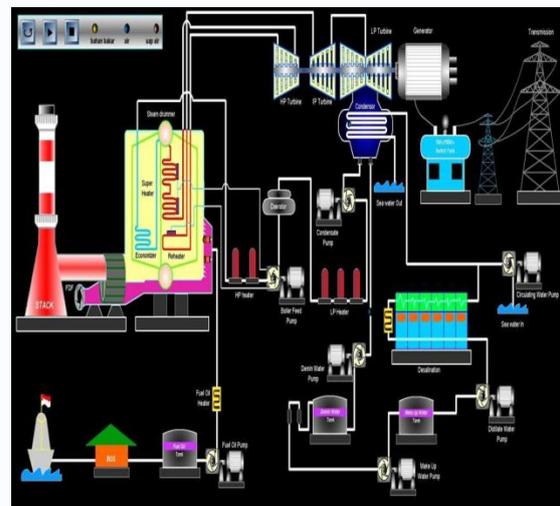


Gambar 1. Sistem Coal Handling Di PLTU

**Pembakaran Batubara**

Sistem pembakaran batubara yang ada di PLTU Suralaya unit 8 adalah Pembakaran Batubara Serbuk (*Pulverized Coal Combustion/PCC*). Pada PCC, batubara diremuk dulu dengan menggunakan *coal pulverizer (coal mill)* sampai berukuran 200 mesh (diameter 74µm), kemudian bersama – sama dengan udara pembakaran disemprotkan ke boiler untuk dibakar. Pembakaran metode ini sensitif terhadap kualitas batubara yang digunakan, terutama sifat ketergerusan (*grindability*), sifat *slagging*, sifat *fouling*, dan kadar air (*moisture content*). Batubara yang disukai untuk boiler PCC adalah yang memiliki sifat ketergerusan dengan HGI (*Hardgrove Grindability Index*) di atas 40 dan kadar air kurang dari 30%, serta rasio bahan bakar (*fuel ratio*) kurang dari 2.

**Siklus Kerja PLTU**



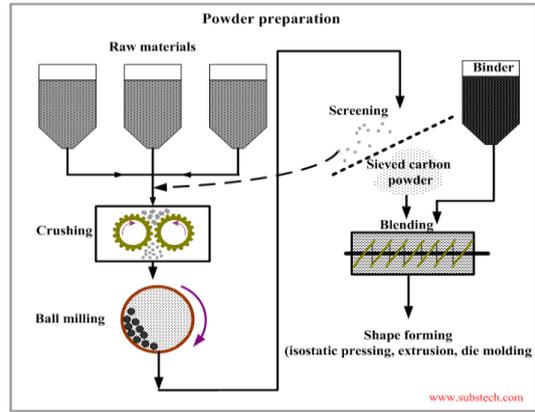
Gambar 2. Siklus Kerja PLTU

Berikut adalah prinsip kerja sederhana dari PLTU :

- 1) Air laut masuk ke *hotwell* dan diolah di *desalination*, *demineralisation*, dan *desulfuration* hingga menjadi air dermin yaitu air yang mempunyai kadar *conductivity* sebesar 0,2 mikrosiemen.
- 2) Air dermin di *hotwell* dipompa oleh *condensate pump* ke *heater* untuk dipanaskan, kemudian dipompa lagi ke deaerator untuk dilepaskan ion-ion dan mineral yang masih tersisa. Kemudian dipompa dengan *boiler feed pump* menuju *boiler*.
- 3) Di *boiler*, air masuk melalui *economizer*. *Boiler* juga dilengkapi dengan *FD fan (Force Draft fan)* yang mengambil udara luar untuk membantu pembakaran batubara. Air yang masuk ke *boiler* menguap sampai menjadi uap kering.
- 4) Uap kering dikirim ke turbin. kemudian uap menggerakkan sudu turbin sehingga turbin berputar. Dan menggerakkan *generator*.
- 5) Uap dari turbin yang masih kering dikembalikan ke *boiler* untuk dipanaskan lagi, dan uap yang sudah jenuh diembunkan di kondensor.
- 6) Air kondensat ini masuk ke *hotwell* dan bergabung dengan air laut yang sudah diolah tadi. Dan siklus kembali terjadi.

**Blending Batubara**

Beberapa pengaruh yang dapat terjadi jika menggunakan batubara di luar spesifikasi pada pembangkit yang telah ada, diantaranya adalah kinerja penggerus, pengendapan (*slagging* dan *fouling*) dan efisiensi pembakaran. Kinerja mesin penggerus (*pulverizer*) biasanya berhubungan dengan nilai kalor dan sifat ketergerusan (*HGI / hardgrove grindability index*). Apabila digunakan batubara dengan kalori rendah dari spesifikasi, maka dibutuhkan batubara yang lebih banyak, dengan kata lain batubara tersebut harus di *blending* dengan batubara dengan nilai kalor yang lebih tinggi.

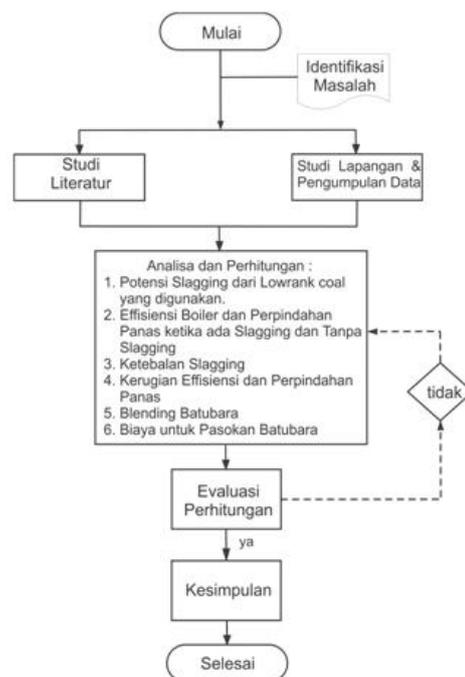


Gambar 3. Sistem *Blending* Batubara

*Blending* merupakan cara terbaik untuk memperbaiki dan menyatukan sifat dan kualitas batubara dari daerah atau jenis yang berbeda, sehingga memungkinkan persyaratan konsumen. Dalam suatu pembangkit listrik *blending* dapat memberikan banyak keuntungan, antara lain :

- a. Meningkatkan kelenturan (*fleksibilitas*) dan memperluas kisaran batubara yang dapat digunakan.
- b. Membantu mengatasi masalah yang terjadi apabila batubara yang digunakan di luar spesifikasi.

**3. METODE PENELITIAN**



Gambar 4. Diagram alir penelitian

**4. ANALISA DAN PEMBAHASAN**

**Penentuan Karakteristik Batubara dan Potensi Slagging dan Foulingnya.**

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium di unit 8 PLTU Suralaya, telah didapatkan *Ash Fusion Temperature* untuk bahan bakar batubara kalimantan.

**Kalimantan**

$$Fe_2O_3 < CaO + MgO$$

$$17,28 < 15,13 + 4,89$$

$$17,28 < 20,02$$

bila  $Fe_2O_3 < CaO + MgO \rightarrow$  *Lignitic Ash*

$$Rs * = \frac{(Max HT) + 4(Min IT)}{5}$$

Berdasarkan Ketentuan, satuan  $^{\circ}C$  dirubah menjadi  $^{\circ}F$

$$HT = 1250^{\circ}C = \frac{9}{5} \times 1250C + 32 = 2282^{\circ}F$$

$$IT = 1150^{\circ}C = \frac{9}{5} \times 1150C + 32 = 2102^{\circ}F$$

*Slagging Index :*

$$Rs * = \frac{(2282) + 4(2102)}{5}$$

$$Rs * = 2138$$

$$2100 < Rs * < 2250 = high$$

**Slagging Potensial = high Fouling Potensial (Rf)**, bila  $CaO + MgO + Fe_2O_3 > 20\%$  Dari berat abu batubara  $CaO + MgO + Fe_2O_3 > 20\%$  *by weight to coal ash*  $15,13 + 4,89 + 17,28 > 20\%$  *by weight to coal ash*  $37,3 > 20\%$  *by weight to coal ash*

$$Na_2O < 3 \rightarrow 0,27 < 3 = low\ to\ medium$$

**Fouling Potensial = low to medium**

Dari hasil perhitungan dan analisis abu batubara kalimantan bisa dibuat tabel Indikasi Potensial *Slagging* dan Potensial *Fouling*, seperti dibawah ini:

Tabel 1. Indikasi Potensial *Slagging* dan *Fouling*

Batubara	Hasil Analisis Abu	Klasifikasi Abu	Nilai	Indikasi	
				Slagging	Fouling
Kalimantan	$Fe_2O_3 < CaO + MgO$ $(CaO + MgO + Fe_2O_3) > 20\%$	<i>Lignitic Ash</i>	$2100 < Rs * < 2250$ $Na_2O < 3$	High	Low to medium

Ternyata Batubara dari Kalimantan ini memiliki potensi terjadi *slagging* yang besar jika digunakan sebagai bahan bakar boiler.

**Perhitungan Efisiensi Boiler**

Berikut data pengoperasian boiler unit 8 pada beban 602 MW yang diambil dari *control room*. Dengan batubara dari Kalimantan dengan *Gross CV* = **3592 kcal/kg**

Tabel 2. Data Bahan Bakar dan Uap di Boiler

Fuel	Main Steam			Reheat Steam					Feed Water	
	Flow	Press	Temp	Flow	Press	Temp	Press	Temp	Eco	Press
Ton/h	Ton/h	MPa	$^{\circ}C$	Ton/h	MPa	$^{\circ}C$	MPa	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	MPa
353	1913	16,22	537	1615	37,9	480	3,39	523	328	18,38

Dengan metode langsung (*direct methode*) :

$$Efisiensi\ Boiler = \frac{output}{input} \times 100\%$$

$$= \frac{ms(h_2 - h_1) + mr(h_4 - h_3)}{mf \times HV} \times 100\%$$

Dimana :

$$ms = 1913\ ton/h$$

biasanya dalam proses pembakaran ada sebesar 1% bahan bakar tidak terbakar (*Boiler Operation Engineering, Q & A P. Chattopadhyay, 1994*). Dengan demikian bahan bakar yang benar-benar terbakar adalah :

$$Mf = 353\ ton/h \left[ 1 - \frac{1}{100} \right] = 353 \frac{ton}{h} \times \frac{99}{100} = 349,5 \frac{ton}{h}$$

$$Mr = 1615\ ton/h$$

$$Gross\ CV = 3592\ kcal/kg = 3592 \times 0,0041868 = 15,0389856\ Mj/kg$$

$$Net\ CV(Kcal/kg) = \{ \{ Gross\ CV(Mj/kg) \} - \{ 0,0942\% \ TS \} \} \times 238,8461$$

$$Net\ CV = (15,0389856 - (0,0942 \times 0,33)) \times 238,8461 = 3584,578289\ Kcal/Kg = 3585\ Kcal/Kg$$

Dengan tekanan *economizer* = 18,38 Mpa  
 = 183,8 bar gauge + 1 bar = 184,8 bar abs

Dan temperature di *economizer* = 328°C  
Entalpi air pengisi ketel = h1= 1479,3 Kj/kg =  
1479,3/4,184 = **353,56 kcal/kg**

Dengan tekanan *superheater* = 16,22 Mpa =  
 162,2 bar + 1 = 163,2 bar abs

Temperature di *superheater* = 537°C  
Entalpi uap meninggalkan *superheater* =h2=  
3382,7 Kj/kg = **808,49 kcal/kg**

Dengan tekanan uap masuk *reheater*= 37,9 Mpa  
 = 379 bar g = 380 bar abs temperatur masuk  
*reheater*= 480°C  
Didapat entalpi =h3= 3088,5 kj/kg = **738,16**  
**kcal/kg**

Dengan tekanan uap keluar *reheater* = 3,39 Mpa  
 = 33,9 bar + 1 = 34,9 bar abs Dan temperatur di  
*reheater* = 523°C  
Didapat entalpi uap keluar *reheater* =h4= 3496  
**kj/kg = 835, 5 kcal/kg**

Maka efisiensi boiler pada beban 602 MW =

$$\eta_B = \frac{ms(h_2-h_1) + mr(h_4-h_3)}{mf \times HV} \times 100\%$$

$$\eta_B = \frac{1913000(808,49-353,56) + 1615000(835,5-738,16)}{349500 \times 3585} \times 100\%$$

$$\eta_B = \frac{1913000(454,93) + 1615000(97,34)}{349500 \times 3585} \times 100\%$$

$$\eta_B = \frac{870281090 + 157204100}{1252957500} \times 100\%$$

$$\eta_B = \frac{1027485190}{1252957500} \times 100\% = \mathbf{82\%}$$

**Perhitungan Kerugian Efisiensi boiler akibat slagging**

Berikut ini adalah data operasi boiler ketika kotor/berslagging :

Tabel 3. Data Operasi Boiler Dalam Keadaan Berslagging

Fuel	Main Steam				Reheat Steam				Feed Water	
	Flow	Press	Temp	Flow	Press	Temp	Press	Temp	Eco	Press
Ton/h	Ton/h	MPa	°C	Ton/h	MPa	°C	MPa	°C	°C	MPa
363	1866	15,90	512	1560	33,9	440	3,28	510	302	18,00

Dengan tabel uap didapat :

Entalpi air pengisi ketel = h1 = 1335,7 kj/kg =  
 319,24 kcal/kg

Entalpi uap meninggalkan superheater = h2 =  
 3326,1 kj/kg = 794,96 Kcal/kg

Entalpi uap masuk reheater = h3 = 2615,6 Kj/kg  
 = 625,14 Kcal/kg

Entalpi uap meninggalkan reheater = h4 =  
 3474,3 kj/kg = 721,71 Kcal/kg

$$M_f = 363 \text{ ton/h} \left[ 1 - \frac{1}{100} \right] = 363 \frac{\text{ton}}{\text{h}} \times \frac{99}{100} = \mathbf{359,37 \frac{\text{ton}}{\text{h}}}$$

Maka, efisiensi boiler menjadi :

$$\eta_B = \frac{ms(h_2-h_1) + mr(h_4-h_3)}{mf \times HV} \times 100\%$$

$$\eta_B = \frac{1866000(794,96-319,24) + 1590000(721,71-625,14)}{359370 \times 3585} \times 100\%$$

$$\eta_B = \frac{1866000(475,72) + 1590000(96,57)}{359370 \times 3585} \times 100\%$$

$$\eta_B = \frac{1041239820}{1288341450} \times 100\%$$

$$\eta_B = \frac{1041239820}{1288341450} \times 100\% = \mathbf{80,82\% = 80,8\%}$$

dari perhitungan diatas terjadi penurunan efisiensi boiler sebesar :

$$\Delta\eta_B = 82\% - 80,8\% = 1,2\%$$

**Perhitungan Kerugian Perpindahan Kalor Pada Water Wall Tube Akibat Ketebalan Slagging di dalam Boiler**

Dari Perhitungan efisiensi boiler diatas, didapat efisiensi normal (82%). Dihasilkan energi pembakaran (output) sebesar 1.027.485.190 kcal/h. Berdasarkan spesifikasi boiler unit 8 PLTU Suralaya, seperti pada lampiran, didapat :

$\Sigma_w$  = Emissivity dinding ketel, dalam keadaan bersih = 0,85

$\Sigma_f$  = Emissivity nyala api, api berwarna terang (luminous) = 0,9

$C_o$  = Konstanta Stefan Boltzmann = 4,9 Kcal/m<sup>2</sup> °K jam

$F_r$  = Luas bidang yang terkena radiasi pada waterwall (m<sup>2</sup>) = 5999 m<sup>2</sup>

$T_f$  = Suhu nyala api maximum di furnace = 1333°C = 1333 + 273°K = 1606°K

$$Q_r = \Sigma_w \cdot \Sigma_f \cdot C_o \cdot F_r \left[ \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right]$$

kcal/jam.

$$Q_r = \Sigma_w \cdot \Sigma_f \cdot C_o \cdot F_r \left[ \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right]$$

kcal/jam.

$$= 0,85 \times 0,9 \times 4,9 \times 5999 \left[ \left( \frac{1606}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right]$$

kcal/jam

$$= 22487,25 \left[ 66.524,58 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right]$$

$$= 1.495.954.961 - 66.524,58 \left( \frac{T_w}{100} \right)^4$$

Atau

$$66.524,58 \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 = 1.495.954.961 - Q_r$$

$$= 1.495.954.961 - 1.027.485.190$$

$$\left( \frac{T_w}{100} \right)^4 = \frac{468.469.771}{66.524,58} = 7.042,055$$

$$T_w^4 = 7.042,055 \times 100^4$$

$$T_w = 100 \cdot \sqrt[4]{7.042,055} = 9,160619684 \times 100 = 916,062^{\circ}K = 643,062^{\circ}C$$

Khusus pembangkitan uap air, dalam pipa boiler adalah suatu kondisi campuran air dan uap pada temperature constant, maka Mean Temperature Difference ( $\Delta t_m$ ) adalah :

$$\Delta t_m = \frac{t_1 - t_{s'}}{\log_e \left( \frac{t_1 - t_{s'}}{t_2 - t_{s'}} \right)}$$

Dimana:  $t_1$  = suhu dinding boiler sisi gas asap ( $t_w$ ) = 643,062°C

$t_2$  = suhu bagian dalam dinding waterwall tube diperkirakan  $\geq$  dengan temperatur (uap+air) yaitu 400°C

$t_{s'}$  = suhu antara air dan uap = 369°C

$$\Delta t_m = \frac{643,062 - 400}{\log_e \left( \frac{643,062 - 369}{400 - 369} \right)}$$

$$\Delta t_m = \frac{243,062}{\ln \left( \frac{274,062}{31} \right)} = \frac{243,062}{\ln(8,84)} = \frac{243,062}{2,18} = 111,5^{\circ}C = 112^{\circ}C$$

Panas konveksi ( $Q_k$ ) yang diterima dinding boiler adalah 77,12% x panas radiasi di ruang bakar.

$$\left( \frac{\text{suhu di reheater}}{\text{suhu ruang bakar}} \times 100\% = \frac{1028}{1333} \times 100\% = 77,12\% \right)$$

$$Q_k = 77,12\% \times 1.027.485.190 = 792.396.578,5 \text{ Kcal/h}$$

$$Q_k = UA (\Delta t_m)$$

Dimana,

$U$  = Overall heat transfer coefficient

$A$  = Luas waterwall heat area = 5999 m<sup>2</sup>

$$\text{Jadi } U = \frac{0,7712 \times 1.027.485.190}{5999 \times 112} = \frac{792.396.578,5}{671.888} = 1179,36 \text{ Kcal/h.m}^2.^{\circ}C$$

Untuk kondisi  $\eta_B$  normal (82%) beban penuh, tidak ada deposit yang menempel di bagian luar daerah gas.

$$\text{Jadi persamaan } U = \frac{1}{\frac{1}{h_{12}} + \frac{(\Delta x)}{k_{23}} + \frac{1}{h_{34}}} \quad h_{34}$$

Diketahui :

material waterwall tube = SA-210C ( carbon steel)

Konduktifitas termal Carbon steel (K23)

$$= 47 \text{ W/m.K}$$

$$= 47 \times 0,85984 = 40,412 \text{ Kcal/m}^{\circ}C.$$

$$1179,36 = \frac{1}{\frac{1}{4266,43} + \frac{0,0125}{40,412} + \frac{1}{544,14}}$$

h12 = perpindahan panas konveksi  
 $= Q / A \cdot \Delta T = \frac{77,22\% \times 1.027.485.190}{5999 \cdot (400 - 369)} = \frac{793424063,7}{185969}$   
 $= 4.266,43 \text{ Kcal/h.m}^2.\text{OC}$   
 $= 873,91 \text{ BTU/ hr ft}^2\text{F (Water Evaporate)}$

h34 =  $Q / A \cdot \Delta T$   
 $= \frac{793.424.063,7}{5999 \cdot (1333 - 643,062)}$   
 $= \frac{793.424.063,7}{1.458128,938}$   
 $= 544,14 \text{ Kcal/h.m}^2.\text{OC}$

$\Delta x$  = bore diameter – external diameter  
 $= 63,5 - 51 = 12,5 \text{ mm} = 0,0125 \text{ m}$

Untuk kondisi  $\eta_B$  menurun menjadi 80,8% dan beban tetap konstan penuh, maka energi pembakaran (output) meningkat menjadi  $Q_r = 1041239820 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$

$$66.524,58 \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 = 1.495.954.961 - Q_r$$

$$= 1.495.954.961 - 1.041.239.820$$

$$\left( \frac{T_w}{100} \right)^4 = \frac{454.715.141}{66.524,58} = 6.835,30$$

$$T_w^4 = 6.835,3 \times 100^4$$

$$T_w = T_1 = 100 \cdot \sqrt[4]{6.835,3} = 9,092627406 \times 100$$

$$= 909,263^{\circ}\text{K} = 636,263^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_m = \frac{t_1 - t_s'}{\log_e \left( \frac{t_1 - t_s'}{t_2 - t_s'} \right)}$$

$t_1$  = suhu dinding boiler sisi gas asap ( $t_w$ )  
 $= 636,263^{\circ}\text{C}$

$t_2$  = suhu bagian dalam dinding waterwall tube diperkirakan  $\geq$  dengan temperatur (uap+air) yaitu  $385^{\circ}\text{C}$

$t_s'$  = suhu antara air dan uap =  $369^{\circ}\text{C}$

$$\Delta t_m = \frac{636,263 - 385}{\log_e \left( \frac{636,263 - 369}{385 - 369} \right)}$$

$$\Delta t_m = \frac{251,263}{\log_e \left( \frac{267,263}{16} \right)} = \frac{251,263}{\log_e(16,70)} = \frac{251,23}{2,82} = 89,1$$

$^{\circ}\text{C} = 89^{\circ}\text{C}$

$Q_k = UA (\Delta t_m)$

$$U = \frac{0,7712 \times 1041239820}{5999 \times 89} = \frac{803.004.149,2}{533.911} = 1504,004 \text{ Kcal / h.m}^2.\text{OC}$$

Kerugian perpindahan panas total (U) :

$\Delta U = U$  ketika terjadi *slagging* – U dalam keadaan bersih

$$= 1504,004 - 1179,36 = 324,644$$

### Perhitungan Ketebalan Slagging

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{12}} + \frac{(\Delta x)_1}{K_{23}} + \frac{(\Delta x)_2}{K_{34}} + \frac{1}{h_{45}}$$

Dimana :

U = koefisien perpindahan panas global =  $1504,004 \text{ Kcal / h.m}^2.\text{OC}$

h12 = Koefisien konveksi air pengisi boiler  
 $= \frac{77,22\% \times 1041239820}{5999 \cdot (385 - 369)} = \frac{803.004.149,2}{95.984}$   
 $= 8366,02 \text{ Kcal/h.m}^2.\text{OC}$

K23 = Konduktifitas termal dinding tube  
 $= 40,412 \text{ Kcal/m}.\text{OC}$

K34 = Konduktifitas termal *slagging*  
 $= 0,4 \text{ W/m.K} = 0,34392 \text{ Kcal/m}.\text{OC}$

Catatan : Kandungan *slagging* adalah lempung (clay), pyrite, calcite, dolomite, serta kuarsa (quartz) termasuk ke dalam geopolimer, jadi konduktifitas termal *slagging* =  $0,4 \text{ W/m.K}$

$$h_{45} = \text{Koefisien konveksi gas asap}$$

$$= \frac{77,22\% \times 1041239820}{5999 \cdot (1333 - 636,263)} = \frac{803.004.149,2}{4.179.725,263}$$

$$= 192,119 \text{ Kcal/h.m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$(\Delta x)_1 = \text{ketebalan dinding tube} = 12,5 \text{ mm}$$

$$= 0,0125 \text{ m}$$

$$(\Delta x)_2 = \text{ketebalan slagging}$$

$$\text{Jadi, } \frac{1}{U} = \frac{1}{h_{12}} + \frac{(\Delta x)_1}{K_{23}} + \frac{(\Delta x)_2}{K_{34}} + \frac{1}{h_{45}}$$

$$\frac{(\Delta x)_2}{K_{34}} = \frac{1}{U} - \frac{1}{h_{12}} - \frac{(\Delta x)_1}{K_{23}} - \frac{1}{h_{45}}$$

$$\frac{(\Delta x)_2}{0,34392} = \frac{1}{1504,004} - \frac{1}{8366,02} - \frac{0,0125}{40,412} - \frac{1}{192,119}$$

$$\frac{(\Delta x)_2}{0,34392} = 0,000664891 - 0,000119531151 - 0,000309314 - 0,0005205$$

$$(\Delta x)_2 = 0,004968954 \times 0,34392$$

$$= 1,70892266 \times 10^{-3} \text{ m} = 1,71 \text{ mm}$$

Terjadi *slagging* setebal **1,71 mm**

### Kerugian Biaya Akibat *Slagging* di Dalam Boiler

Dari perhitungan efisiensi diatas dapat diketahui bahwa efisiensi boiler pada keadaan beban penuh (*full load*). Adalah 82%.

$$\eta_B = \text{Output} / \text{Input} = \text{Energi keluar} / \text{Energi masuk}$$

$$\text{Input} = \text{Output} / \eta_B$$

Bila karena *slagging*, efisiensi boiler turun menjadi 80,8% tetapi beban dikehendaki tetap *full load* ; maka *input* = (jumlah bahan bakar x nilai kalori)

$$\text{Input} = \frac{1041239820 (\text{output})}{0,808} = 1.288.663.144 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

$$\text{Nilai kalori batubara} = 3585 \text{ kcal/ kg}$$

Jumlah batubara yang dibutuhkan adalah :

$$X = \frac{1.288.663.144 \text{ kcal/h}}{3.585 \text{ kcal/kg}} = 359.459,7332 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 359,46 \frac{\text{ton}}{\text{h}} = 8.627,04 \text{ ton/day}$$

Bila *Load factor* 80%, maka batubara yang dibutuhkan = 0,8 x 8.627,04 = 6.901,632 ton/day = 2.519.095,68 ton/ year.

Pada kondisi normal dengan beban *full load* membutuhkan batubara 353.000 kg/h = 353 ton/h = 8.472 ton/day.

Dengan load factor 80% ;

maka batubara yang dibutuhkan= 0,8 x 8.472 ton/day = 6.777,6 ton/day = 2.473.824 ton/year.

Jadi kerugian karena efisiensi boiler turun s/d 1,2% ialah :

$$(2.519.095,68 - 2.473.824) = 45.271,68 \text{ ton/year}$$

$$\times \text{Rp. } 205.000/\text{ton}$$

$$= \text{Rp. } 9.280.694.400 \text{ /year.}$$

### Analisis Kerugian Mesin Akibat *Slagging*

Dari hasil perhitungan kerugian perpindahan panas, terjadi *slagging* setebal 1,71 mm. Ini akan mengurangi jumlah panas yang dipakai untuk menguapkan air pengisi boiler. Dengan kata lain, suhu hasil pembakaran di furnace harus dinaikkan. Untuk menaikkan suhu pembakaran di furnace, aliran bahan bakar juga harus ditingkatkan. Tentu saja ini memakan biaya yang lebih besar karena harus memasok batubara lebih banyak.

Selain itu jika *slagging* sudah menempel pada dinding tube cukup lama, berat *slagging* bisa menarik dinding tube turun. Hal ini sangat berbahaya karena akan mengurangi ketebalan dinding tube dan rentan menyebabkan kebocoran dinding tube. Selain itu kandungan yang terdapat pada *slagging* ini berupa unsur –unsur padat yang tidak bisa terbakar seperti unsur-unsur logam besi oksida yang bersifat korosif terhadap dinding tube.

### Analisis Pencegahan *Slagging* di Unit 8

PLTU Suralaya unit 8 sudah melakukan upaya pencegahan *slagging* yaitu dengan memblending batubar *low rank* yang sering digunakan dengan batubara *medium rank*. *Blending* dilakukan dengan mencampur kedua batubara ini sebelum masuk ke mesin penggiling.

Untuk mendapatkan batubara dengan nilai kalor 4200 kcal/kg agar spesifikasi boiler terpenuhi, maka unit 8 harus melakukan *blending low rank coal* dengan CV = 3585 kcal/kg dan *medium rank coal* dengan CV = 4500 kcal/kg. Laju aliran massa batubara *low rank* adalah 353 Ton/h. Untuk, maka diperlukan batubara *medium rank* dengan laju alir massa sebesar :

$$4200 = \frac{(3585 \times 353) + (4500 \times \frac{ton}{h})}{353 + ton/h}$$

$$4200 = \frac{1265505 + (4500 \times \frac{ton}{h})}{353 + ton/h}$$

$$4200 \times (353 + ton/h) = 1265505 + (4500 \times ton/h)$$

$$1482600 + (4200 \times ton/h) = 1265505 + (4500 \times ton/h)$$

$$(4200 - 4500) \times ton/h = 1265505 - 1482600$$

$$-300 \times ton/h = -217095$$

$$Ton/h = \frac{-217095}{-300} = 723,65$$

Jadi, batubara *medium rank* yang dibutuhkan sebanyak 723,65 ton/h atau dengan persentase 32,78 % batubara *low rank* dan 67,22% batubara *medium rank*. Dengan adanya *blending* batubara ini didapatkan batubara yang memenuhi spesifikasi boiler dengan potensi *slagging* yang lebih sedikit (*low*).

### Kesimpulan

1. Kerugian yang diakibatkan oleh *slagging* meliputi : kerugian perpindahan panas pada dinding *tube*, kerugian efisiensi boiler, kerugian biaya untuk memasok batubara.
2. Kerugian efisiensi boiler yang terjadi mencapai 1,2%, dimana efisiensi boiler dalam keadaan bersih adalah 82% dan ketika ada *slagging* menurun menjadi 80,8%.
3. Jika *slagging* terus terjadi mengakibatkan penurunan efisiensi boiler, pasokan batubara meningkat dari 353 ton/h menjadi 363 ton/h. Hal ini akan mengakibatkan pengeluaran biaya untuk memasok batubara meningkat sebesar Rp . 9.280.694.400 /year.

4. Upaya yang dilakukan PLTU Suralaya unit 8 untuk mencegah terjadinya *slagging*, antara lain dengan melakukan *blending* batubara. Batubara *low rank* di campur dengan *medium rank* sebelum digiling, dengan persentase 32,78 % batubara *low rank* dan 67,22% batubara *medium rank*.

### Daftar Pustaka

Arigayota, Abdul Rahman, *Diktat Bahan Bakar dan Pelumas*, Jakarta : Sekolah Tinggi Teknik – YPLN. 2002

Asof, MT, Ammar, Ir. *Karakteristik Batubara*. STT-PLN. Jakarta. Oktober 2004.

ASTM International :D 1857-017, *Standart Test Method for Fusibility of Coke and Coke Ash*.

*Boiler Engineering Question and Answer*, Pchatto Padhyay, 1994

POWERPLANT MANAGEMENT INSTITUTE. *Power Plant Familiarisation*. National Thermal Power Corporation Ltd. New Delhi. November 1995.

Putra, Ekky. *Penanganan Batubara, Coal Handling*. ( Online ). <http://artikelbiboer.blogspot.com>.

Rochani, Habib, Ir. *Tabel uap*. STT-PLN. Jakarta.

Rumidi, Sukandar, *Batubara & Gambut*. nd

Steam Its Generation and Use Babcox and Wilcox.1992.

Surya,ST, Fuja Rangga, *Pengaruh Karakteristik Batubara Terhadap Efisiensi Boiler PLTU Suralaya Unit 6*, Jakarta :STT-PLN.2010.

The Babcock & Wilcox Company, *Fuel Ash Affects on boiler Design and Operation*

<http://thebloghub.com/pages/ABU-BATUBARA>.

[www.engineeringtoolbox.com](http://www.engineeringtoolbox.com)