

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

1.1. Pertimbangan Dilakukan Pencampuran Batubara (*Coal Blending*)

Pembangkit listrik tenaga batubara dirancang untuk membakar batubara dengan karakteristik tertentu, biasanya batubara yang sesuai desain dari boiler atau batubara yang hemat biaya untuk dikirim ke pembangkit listrik. Namun, seiring berjalannya waktu, aksesibilitas terhadap batubara berubah dan pembangkit listrik tenaga batubara harus menyesuaikan dengan batubara yang tersedia bagi mereka. Batubara baru ini mungkin memiliki kinerja yang berbeda dengan batubara yang sesuai dengan desain boiler, sehingga diperlukan pencampuran untuk mengurangi dampak buruk pada pembangkit listrik. Kemungkinan besar, secara global, setidaknya 20% pembangkit listrik, atau bahkan lebih banyak lagi, tidak dapat mencapai output desain karena kesulitan dalam mendapatkan batubara yang secara konsisten memenuhi kebutuhan boiler (Sloss, 2014). Hal ini dapat mengakibatkan penurunan potensi keluaran pembangkit listrik sebesar 10% atau lebih dan dapat menyebabkan hilangnya produksi total sektor ketenagalistrikan sebesar 2% secara keseluruhan, turunnya efisiensi boiler, tingkat pemadaman paksa yang meningkat, biaya pemeliharaan yang meningkat, naiknya nilai *Net Plant Heat rate* (Sloss, 2014). Dengan mengoptimalkan pencampuran untuk menyediakan stok bahan bakar yang sesuai dan konsisten, pembangkit listrik dapat meningkatkan keluaran daya sekaligus mengurangi dampak negatif pada pembangkit (seperti *slagging*, *fouling* dan korosi) dan berpotensi mengurangi emisi polutan yang menjadi perhatian. Seiring dengan pengetatan standar emisi secara global, jumlah batubara yang dapat memenuhi standar tersebut menurun. Hal ini meningkatkan permintaan batubara yang memenuhi persyaratan, dan hal ini umumnya mengakibatkan kenaikan harga batubara. Pencampuran memungkinkan penggunaan batubara dengan kualitas lebih rendah dan tidak memenuhi persyaratan, sehingga meningkatkan cadangan batubara dan memastikan bahwa seluruh batubara dapat dimanfaatkan sepenuhnya.

1.2. Tujuan pencampuran (*blending*) batubara

1. Mendapatkan biaya batubara yang murah.

Pencampuran memungkinkan pembangkit listrik untuk membakar batubara yang lebih murah. Batubara yang kualitasnya mungkin buruk dengan harga yang murah sehingga dapat menimbulkan dampak buruk bagi pembangkit listrik, dapat dicampur dengan batubara yang berkualitas lebih tinggi dan lebih mahal dapat menghasilkan kualitas batubara seperti yang diharapkan.

2. Keamanan pasokan.

Banyak pembangkit listrik tenaga batubara diharuskan beroperasi dengan kapasitas tinggi dan secara teratur untuk menjamin pasokan energi ke pelanggan. Oleh karena itu konsistensi dan keamanan pengiriman batubara ke pembangkit listrik merupakan prioritas utama. Namun jumlah batubara di tambang batubara yang memenuhi desain boiler semakin terbatas jumlahnya, sehingga pencampuran batubara (*coal blending*) adalah solusi untuk mengamankan pasokan batubara.

3. Memenuhi spesifikasi boiler

Boiler sering kali memerlukan batubara dengan nilai kalor yang tinggi yang digunakan untuk memenuhi permintaan energi listrik pada beban puncak, sedangkan pasokan batubara yang tersedia di pasaran yang harganya sesuai dengan syarat keekonomiannya nilai kalor nya semakin menurun. Kualitas batubara yang lebih rendah juga dapat menyebabkan masalah di boiler yaitu terak dan pengotoran (*slagging dan fouling*) semakin meningkat dan hal ini menyebabkan temperatur gas buang meningkat dan berakibat menurunnya efisiensi boiler dan rusaknya beberapa peralatan pembangkit listrik. Sehingga diperlukan pencampuran batubara (*coal blending*) untuk mendapatkan campuran batubara yang memenuhi spesifikasi boiler sehingga kinerja pembangkit listrik meningkat.

4. Memenuhi aturan perundang-undangan emisi.

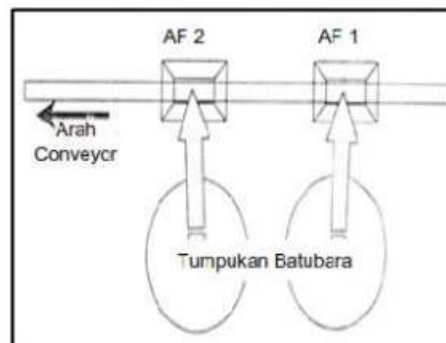
Seiring dengan semakin ketatnya peraturan pengendalian polusi secara internasional, banyak operator pembangkit listrik menyadari bahwa mereka perlu mempertimbangkan kembali batubara yang mereka gunakan dapat memenuhi batas emisi atau target pengurangan emisi. Beberapa emisi yang semakin ketat dilakukan pembatasan diantaranya adalah: CO₂, SO₂, NO_x, partikel (*dust*). Sehingga dituntut untuk melakukan *coal blending* supaya emisi yang dihasilkan masih memenuhi standard perundang-undangan lingkungan .

1.3. Metode pencampuran (*blending*) batubara

Dalam pelaksanaan proses *blending* di stockpile harus mengikuti hasil perhitungan secara teoritis yang telah didukung dengan analisis data laboratorium, agar didapat kualitas yang diharapkan. Prinsip kerja *blending* di stockpile adalah mencampur dua jenis atau lebih kualitas batubara dengan proporsi perbandingan yang telah ditentukan. Hasil yang diperoleh harus benar-benar homogen sehingga dapat memenuhi kualitas permintaan konsumen.

1. Metode Curah Langsung

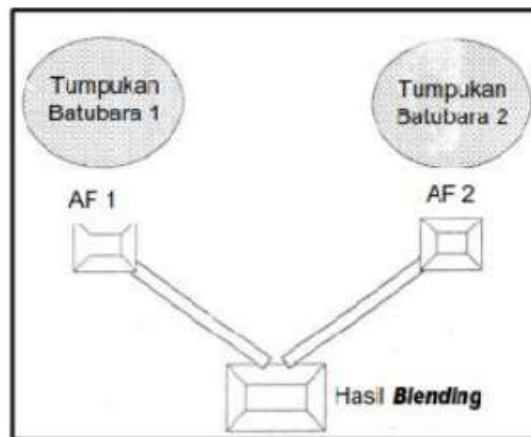
Metode ini menggunakan dua alat penumpah batubara masing-masing menumpahkan batubara ke apron feeder (AF) yang berlainan. Sehingga setelah dua apron feeder penuh maka AF 1 dibuka dengan aliran tertentu, setelah batubara sampai di AF 2, AF 2 dibuka sesuai dengan proporsi yang ditentukan seperti Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Metode Curah langsung (Saputra dkk., 2013)

2. Metode Dua Conveyer

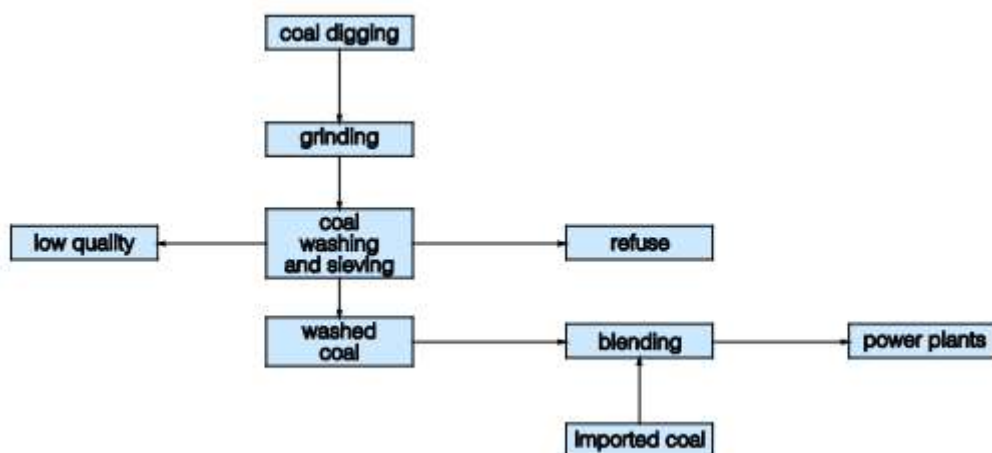
Cara kerja dari metode ini adalah dua alat penumpah batubara masing-masing menumpahkan batubara ke apron feeder yang berlainan. Setelah dua apron feeder penuh maka AF 1 dan AF 2 dibuka bersamaan dengan aliran tertentu berdasarkan perhitungan komposisi *blending*



Gambar 2. 2 Metode Dua Conveyor (Saputra dkk., 2013)

1.4. Tempat Pencampuran Batubara (*Coal Blending*)

Pencampuran batubara dapat dilakukan di hampir semua titik dalam proses produksi batubara. Gambar 2.3 menunjukkan diagram alur produksi batubara dasar mulai dari penggalian batubara dari dalam tanah hingga pengirimannya ke pembangkit listrik



Gambar 2. 3 Flow Chart Produksi Batubara (Sloss, 2014)

Pencampuran batubara akan bergantung pada banyak faktor, terutama biaya dan kepraktisan. Menurut Stasiuk dan Whitt (2010) biaya penanganan batubara dan lapangan batubara seringkali merupakan biaya tahunan paling signifikan yang dihadapi pembangkit listrik. Mencampur batubara dapat memakan banyak ruang. Jika suatu pembangkit listrik tiba-tiba memerlukan pencampuran di lokasi, maka pembangkit listrik tenaga batubara tersebut harus menyediakan ruang untuk penyimpanan batubara dalam jumlah besar dan fasilitas pencampuran. Dalam beberapa kasus, hal ini tidak memungkinkan secara fisik atau ekonomi. Oleh karena itu, banyak pembangkit listrik yang lebih memilih untuk membeli batubara campuran dari tambang atau dari produsen batubara. Namun, mengandalkan batubara campuran dari tambang atau pemasok dapat membatasi fleksibilitas pembangkit listrik. Pencampuran batubara dapat dilakukan di beberapa tempat sebagai berikut:

- Pencampuran dilakukan di tambang batubara dan di pencucian batubara
- Pencampuran selama transportasi batubara
- Pencampuran sesaat sebelum pembakaran

Di PLTU Superkritikal XYZ , pencampuran batu bara dilakukan di konveyor sesaat sebelum dimasukkan ke coal silo untuk pembakaran di boiler.

1.5. Batubara

Batubara merupakan salah satu sumber energi fosil yang terbentuk dari senyawa-senyawa organik hasil sedimentasi makhluk hidup seperti tumbuhan, bakteri, spora, dan makhluk hidup lainnya selama berjuta-juta tahun. Makhluk hidup yang telah mati akan mengalami berbagai proses alam seperti pembusukan dan pengendapan yang terakumulasi dalam suatu cekungan hingga membentuk batubara. Batubara mulai terbentuk sejak periode *Carboniferous* (periode pembentukan karbon atau batubara) yang dikenal sebagai zaman batubara pertama yang berlangsung antara 360 juta sampai 290 juta tahun yang lalu (Sudewa, 2022).

Berdasarkan tipenya, ada empat tipe batubara sesuai klasifikasinya menurut peringkat ASTM (*American Standard for Testing and Materials*) diantaranya,

1. Peat & Lignite

Spesifikasi kandungan karbon 25%-35%, *calorific value* < 4614 kCal/kg. Merupakan batubara coklat, mempunyai peringkat yang paling rendah daripada batubara lainnya, dan hampir secara eksklusif digunakan untuk keperluan pembangkitan energi listrik. Digunakan sebagai bahan bakar pada proses pembangkitan di PLTU superkritikal XYZ saat ini.

2. Sub-Bituminous

Spesifikasi kandungan karbon 35%-45%, *calorific value* 4614-6393 kCal/kg. Digunakan sebagai desain awal pada bahan bakar pada proses pembangkitan di PLTU superkritikal XYZ.

3. Bituminous

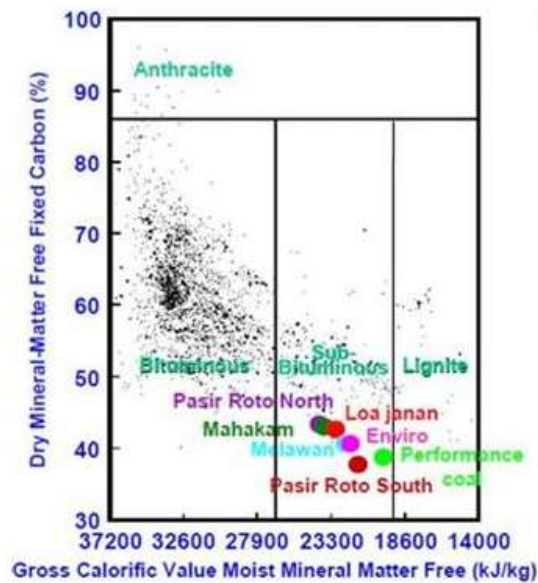
Spesifikasi kandungan karbon 45%-86%, *calorific value* 5837-7783 kCal/kg. Memiliki warna coklat, terkadang hitam.

4. Anthracite

Spesifikasi kandungan karbon 86%-97%, *calorific value* > 8338 kCal/kg. Memiliki warna hitam, biasa dipakai pada pemanas rumah atau bahan bakar dapur industri peleburan besi.



Gambar 2. 4 Klasifikasi Batubara berdasarkan peringkatnya (Sudewa, 2022)



Gambar 2. 5 Desain Peringkat Batubara yang Digunakan Oleh PLTU Superkritikal XYZ Diklasifikasikan sebagai Sub Bituminous (Suhaily, 2015)

1.6. Parameter Kualitas Batubara

Parameter-parameter kualitas batubara dalam melakukan *blending* adalah:

1. Analisis *proximate*, merupakan analisis pendahuluan untuk mengetahui kualitas batubara secara pasar maupun perdagangan. Analisis *proximate* terdiri dari 4 (empat) nilai analisis yang jika dijumlahkan akan bernilai 100%, yaitu:
 - a) Kandungan air merupakan analisis untuk menentukan kadar air yang terkandung pada batubara. Nilai moisture dapat digunakan untuk menghitung hasil-hasil analisis ke dalam basis (kondisi) yang berbeda misalnya *dry basis*, *dry ash free*, *mineral matter free*, *as received*, dan lain-lain.
 - b) Kandungan abu, analisis ini untuk mengetahui akumulasi jumlah abu yang dihasilkan dari proses pembakaran batubara. Kadar abu dalam batubara dapat menurunkan nilai kalori hasil pembakaran batubara. Nilai kandungan abu mempengaruhi tingkat pengotoran (*slagging*, *fouling*), keausan dan korosi alat yang dilalui.
 - c) Kandungan zat terbang (*volatile matter*), *volatile matter* merupakan zat organik (*organic volatile matter*) maupun anorganik (*inorganic volatile*

matter) pada batubara yang menguap atau berubah menjadi gas saat batubara dibakar. Adapun *volatile matter* dari hasil pembakaran batubara terdiri dari gas-gas yang mudah terbakar seperti hidrogen, karbon monoksida, metan, dan gas yang tidak terbakar seperti karbon dioksida.

- d) *Fixed carbon* atau karbon tertambat adalah karbon yang terdapat dalam batubara dimana bagian yang menghasilkan energi saat batubara dibakar. Jumlahnya ditentukan oleh kandungan air, kandungan abu, dan kandungan zat terbang.

Tujuan analisis *proximate* menentukan performa pembakaran dan efisiensi energi dari batubara.

2. Analisis Ultimate didefinisikan sebagai analisis batubara yang dinyatakan dalam kandungan unsur karbon, hidrogen, nitrogen, sulfur dan oksigen. Analisis ini menjelaskan bahwa batubara terdiri dari semua unsur tersebut dengan total komposisi masing-masing unsur tersebut sebesar 100% dalam suatu massa batubara. Tujuan analisis ultimate untuk menghitung kebutuhan stokiometri udara pembakaran dan *excess air*; dan memperkirakan emisi gas buang
3. Analisis Kalorifik (*Calorifik Value* atau *CV*), analisis ini mengukur energi yang dapat dihasilkan saat batubara dibakar, biasanya dalam satuan cal/gr atau kcal/kg. CV merupakan jumlah panas dari proses pembakaran batu bara dalam jumlah tertentu. Besar kalori dilihat dari tingkat kenaikan suhu ketika proses pembakaran tersebut terjadi. Sedangkan, besar panas dihitung dengan membandingkan selisih awal dan akhir suhu pembakaran. *Calorific value* besar pengaruhnya pada pengoperasian pulveriser, windbox, burner, serta pipa batu bara. Bila nilai CV semakin tinggi, artinya aliran batu bara per jam akan semakin rendah. Maka dari itu, coal feeder harus diubah kecepatannya.
4. Analisis titik leleh abu (*ash fusion temperature* atau AFT), suhu dimana abu pertama kali melembut dan menjadi lengket dan menyebabkan *slagging* dan *fouling*. Pengujian AFT ini mengamati perubahan pada kerucut abu karena dipanaskan pada rentang suhu yang diharapkan pada boiler. Suhu pelunakan diambil saat ketinggian kerucut sama dengan lebar kerucut. Analisis ini berguna

untuk mengetahui kecenderungan *slagging* dan *fouling* di boiler. *Slagging* akan terjadi ketika suhu ruang bakar di dalam boiler melebihi AFT.

5. Analisis komposisi kimia abu, terdiri dari: S, SiO₂, Al₂O₃, CaO, Fe₂O₃, MgO, Na₂O, K₂O. Analisis ini berguna untuk mengetahui kecenderungan *slagging* dan *fouling* di boiler. Senyawa kimia yang berdampak besar kepada timbulnya *slagging* adalah CaO dan Fe₂O₃, sedangkan yang berdampak besar kepada timbulnya *fouling* adalah Na₂O, dan K₂O. Senyawa yang menurunkan kecenderungan *slagging* dan *fouling* adalah: SiO₂, MgO dan Al₂O₃ karena mempunyai nilai *ash fusion temperature* yang tinggi (Dai et al, 2015; Prismantoko dkk., 2024; Ali dkk., 2022; Stultz and Kitto, 2005; Ade Arta, 2024).

1.7. Presentasi Karakteristik Bahan Bakar Padat

Ada berbagai metode yang digunakan untuk menjelaskan karakteristik bahan bakar padat atau batubara. Akibatnya, kondisi yang seragam diperlukan untuk analisis komparatif. Tabel 2.1 menggambarkan kerangka metodologis untuk menggambarkan karakteristik bahan bakar padat.

Tabel 2. 1 Metode Penyajian Bahan Bakar Padat (Ade Arta, 2024)

Metode	Uraian
As received (ar)	Metodologi as received berkaitan dengan aplikasi langsung dalam proses pembakaran. Komposisi bahan bakar padat atau batubara tersebut dianggap mencakup totalitas bahan bakar padat atau batubara.
Air dried basis (adb)	Metodologi air-dry base (ADB) menjelaskan komposisi bahan bakar padat atau batubara tanpa kadar air permukaan.
Dry basis (db)	Metode dry basis (db) menunjukkan adanya bahan bakar padat atau konstituen batubara tanpa kandungan air atau kelembaban keseluruhan..
Dry, ash-free (daf)	Metodologi kering, bebas abu (daf) menunjukkan bahan bakar padat atau batubara yang tidak mengandung kadar air dan abu.
Dry, mineral-matter free (dmmf)	Metode kering, bebas materi mineral (dmmf) mengasumsikan bahwa komposisi batubara hanya terdiri dari komponen organik, mengabaikan keberadaan air, abu, dan mineral.
Moist, ash-free (maf)	Metodologi lembap, bebas abu (maf) menunjukkan adanya bahan bakar padat atau batu bara tanpa abu, sementara secara bersamaan mempertahankan jumlah kelembaban minimal.
Moist, mineral-matter free	Metode ini, tanpa bahan mineral dan ditandai dengan kelembaban, menunjukkan sifat bahan bakar padat atau batu bara, tidak ada abu dan mineral tetap mempertahankan kadar air.

1.8. Pendekatan Pengukuran Kualitas Campuran Batubara (*Coal Blending*)

Coal Blending atau pencampuran batubara adalah penggabungan atau penimbunan secara bersamaan dan terus-menerus dalam waktu tertentu dari dua atau lebih material (batubara beda kualitas), yang dianggap mempunyai komposisi yang konstan (parameter kualitas konstan) dan terkontrol proporsinya. Pencampuran dilakukan pada batubara yang berbeda nilai kalori, kandungan sulfur dan kandungan abu, sehingga kualitas batubara hasil campuran merupakan perpaduan dari parameter kualitas batubara yang dicampur. Pencampuran batubara dilakukan untuk mendapatkan hasil yang sesuai dengan yang diinginkan, dengan komposisi yang homogen, secara teoritis parameter kualitas campurannya dapat didekati dengan persamaan (1) (Saputra dkk., 2013) :

$$KB_c = \frac{(KB_1 \times PB_1) + (KB_2 \times PB_2) + \dots + (KB_n \times PB_n)}{PB_c} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana:

KB₁: parameter kualitas batubara 1

KB₂: Parameter kualitas batubara 2

KB_n: Parameter kualitas batubara ke-n

KB_c: Parameter kualitas batubara hasil campuran

PB₁: Persentase batubara 1 (MT)

PB₂: Persentase batubara 2 (MT)

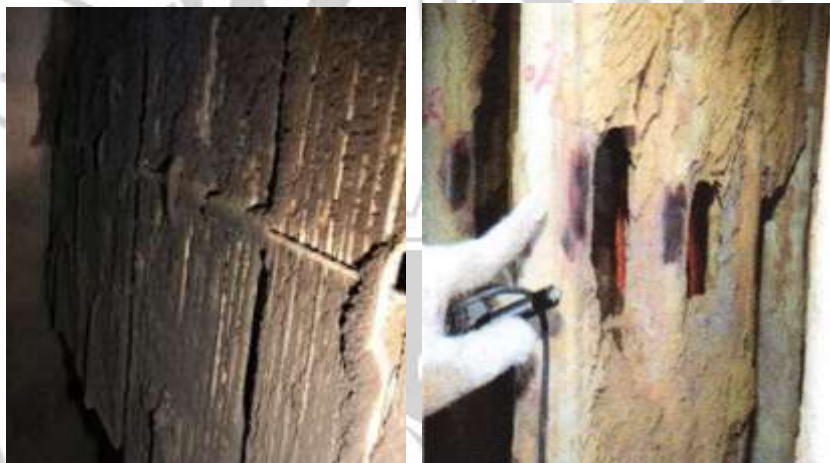
PB_n: Persentase batubara ke-n (MT)

PB_c: Persentase batubara hasil campuran (PB₁+PB₂+...+PB_n)

1.9. Prediksi *Slagging* dan *Fouling*

Slagging terbentuk sebagai akibat dari proses pembakaran batubara, dimana partikel abu batubara baik yang berbentuk padat maupun leburan menempel pada permukaan dinding penghantar panas yang terletak di zona gas pembakaran suhu tinggi. khususnya di dinding yang berdekatan dengan ruang bakar tempat

terjadi perpindahan panas radiasi yang terjadi pada bagian keluaran tungku (*furnace*) ketika suhu gas melebihi suhu melunak abu (*ash softening temperature*). Untuk *slagging ini*, karakteristiknya dapat dinilai dari suhu lebur abu (*ash fusion temperature*) dan kondisi abu itu sendiri. Suhu lebur abu yang rendah akan memudahkan terjadinya *slagging*. Kemudian, diketahui pula bahwa bila rasio unsur alkali/ basa (Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O) terhadap unsur asam (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2) pada rentang nilai tertentu antara 0,4 – 0,7 potensi timbulnya *slagging* juga meningkat (Frandsen, 1997 dan Plaza, 2013), semakin tinggi kadar abu pada batubara juga meningkatkan potensi *slagging* (Bhatt, 2006). Semakin tinggi unsur asam silika dan alumina (SiO_2 dan Al_2O_3) > 60% akan menaikkan *ash fusion temperature*, memerlukan suhu yang lebih tinggi supaya abu tersebut leleh (melebur) sehingga menurunkan potensi *slagging* (Stultz and Kitto, 2005).



Gambar 2. 6 *Slagging* Pada Pipa Superheater (MHI, 2022)

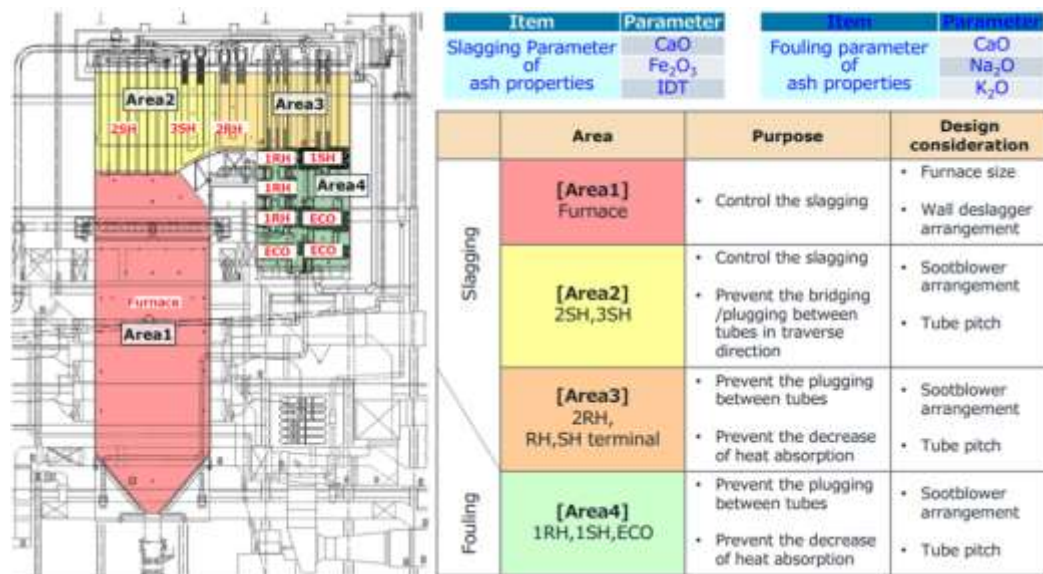
Fenomena *fouling* terjadi ketika abu menempel dan menumpuk pada dinding penghantar panas yang terjadi akibat perpindahan panas konveksi di boiler bagian belakang (*backpass*). Fenomena ini terjadi ketika suhu gas di bagian belakang furnace lebih rendah daripada suhu melunak abu (*ash softening temperatur*). Unsur yang paling berpengaruh pada penempelan abu ini adalah material basa terutama Na, yang dalam hal ini adalah kadar Na_2O selain itu kadar $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ juga berpotensi menyebabkan *fouling* (Lachman, 2021). Bila kadar abu batubara tinggi,

kemudian unsur basa dalam abu juga tinggi, ditambah kadar Na_2O yang tinggi, maka *fouling* akan mudah terjadi (Stultz and Kitto, 2005). Kekuatan ikatan antar abu (*ash sintering strength*) juga berpengaruh terhadap terbentuknya *fouling*, kombinasi tingginya rasio unsur basa terhadap asam dan kadar natrium yang tinggi menyebabkan kenaikan *ash sintering strength* dan menyebabkan tingkat *fouling* yang terbentuk akan semakin tinggi (Stultz and Kitto, 2005).



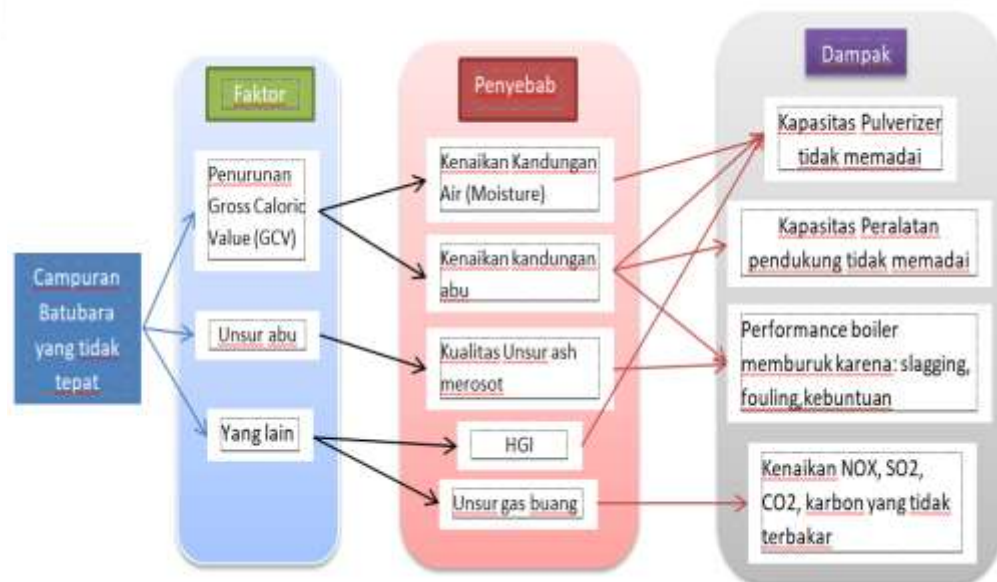
Gambar 2. 7 Fouling di area boiler backpass (MHI, 2022)

Fenomena *Slagging* ini banyak ditemukan di area boiler *high temperature zone* dengan penyerapan panas radiasi seperti *furnace wall*, *secondary* dan *tertiary superheater*. Sedangkan *fouling* banyak ditemukan di area boiler *low temperature zone* dengan penyerapan panas konveksi seperti *primary* dan *secondary reheater*, *primary superheater* dan *economizer*. Dampak *slagging* dan *fouling* dibedakan berdasarkan kondisi abu dalam boiler. Pada Gambar 2.8 seluruh boiler dibagi menjadi 4 area untuk menguji pengaruh parameter desain.



Gambar 2. 8 Area Slagging dan Fouling di Boiler (MHI, 2022)

Dampak campuran batubara yang tidak tepat dapat berakibat kepada kapasitas pulverizer dan peralatan pendukung yang tidak memadai, *performance boiler* yang menurun dan kenaikan emisi gas buang seperti terlihat pada Gambar 2.9



Gambar 2. 9 Dampak Campuran Batubara Yang Tidak Tepat Terhadap Performance Pembangkit Listrik (MHI, 2022)

1.9.1. Metode Prediksi *Slagging*

Pada metode ini, prediksi *slagging* dibedakan sesuai dengan komposisi unsur pembentuk abu, terdiri dari dua tipe abu yaitu tipe bituminous dan tipe lignitic. Batubara peringkat rendah, seperti batubara coklat (lignit, sub-bitumen) biasanya jumlah logam alkali tanah lebih tinggi dari kandungan besi ($\text{CaO} + \text{MgO} > \text{Fe}_2\text{O}_3$) dalam abu, sedangkan batubara bituminous jumlah logam alkali tanah lebih rendah dari pada kandungan besi dalam abu seperti terlihat pada persamaan (2) dan (3), (Plaza, 2013; Frandsen, 1997) :

- Abu tipe bituminous $\text{CaO} + \text{MgO} < \text{Fe}_2\text{O}_3 \dots \dots \dots (2)$
- Abu tipe lignitic $\text{CaO} + \text{MgO} > \text{Fe}_2\text{O}_3 \dots \dots \dots (3)$

a) Abu tipe lignitic:

Rasio tingkat kecenderungan terbentuknya *slagging* oleh unsur – unsur logam dalam abu (kecuali Si yang non logam) pada saat pembakaran batubara ditunjukkan oleh persamaan (4). Pada jenis ini *slagging* ditentukan berdasarkan perhitungan perbandingan unsur alkali dan asam (*base acid ratio*) atau B/A (Stultz and Kitto, 2005; Plaza, 2013; Frandsen, 1997) :

$$R_{B/A} = \frac{\% \text{Fe}_2\text{O}_3 + \% \text{CaO} + \% \text{MgO} + \% \text{Na}_2\text{O} + \% \text{K}_2\text{O}}{\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{TiO}_2} \dots \dots \dots (4)$$

Standard nilai potensi *slagging*

Nilai $R_{B/A}$

- Rendah $< 0,4$ atau $> 0,7$
- Tinggi $0,4 \sim 0,7$

Unsur basa dalam abu meliputi: Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , sedangkan unsur asam yaitu SiO_2 , Al_2O_3 , dan TiO_2

Rasio Basa – Asam pada nilai $0,4 \sim 0,7$ potensi *slagging* tinggi karena jumlah unsur basa (alkali) sama atau lebih besar dari pada unsur asam dan ini menyebabkan temperatur leleh abu menjadi rendah pada rasio tersebut. Semakin tinggi unsur basa dalam abu akan menurunkan temperatur leleh abu terutama pada temperatur abu viskositas 250 poise di mana abu mulai berubah menjadi cair dan plastis dan mudah

lengket di pipa perpindahan panas di dalam boiler. (Prismantoko, 2024; Stultz and Kitto, 2005; Plaza, 2013; Frandsen, 1997)

b) Abu tipe bituminous

Pada jenis ini *slagging* ditentukan berdasarkan persamaan (4) dikalikan kandungan sulfur, dimana S adalah total sulfur (%), kandungan sulfur menyatakan unsur besi dalam bentuk pirit (FeS_2), besi dalam bentuk pirit ini mempunyai titik leleh yang rendah sehingga semakin besar kemungkinan terjadinya pelelehan yang membentuk slag yang keras dan menyumbat jalur aliran udara panas (Stultz and Kitto, 2005; Plaza, 2013; Frandsen, 1997; Li, 2016) :

$$Rs = \frac{B}{A} \times S = \left\{ \frac{(\% \text{Fe}_2\text{O}_3 + \% \text{CaO} + \% \text{MgO} + \% \text{Na}_2\text{O} + \% \text{K}_2\text{O})}{(\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{TiO}_2)} \right\} \times S \dots \dots (5)$$

Standard nilai potensi <i>slagging</i>	Nilai Rs
• Rendah	< 0,6
• Menengah	0,6 ~ 2,0
• Tinggi	2,0 ~ 2,6
• Parah	> 2,6

c) Abu tipe Lignit dan bituminous

Batubara lignit dan termasuk kebanyakan batubara sub bituminous dievaluasi kecenderungan *slagging* terbentuk dengan menghitung suhu leleh abu (*ash fusion temperature*) didasarkan pada perhitungan persamaan (6) di bawah ini (Stultz and Kitto, 2005; Plaza, 2013; Frandsen, 1997; Raask, 1985) :

$$SI \text{ (Slagging index)} = \frac{\{HT(\text{Hemisphere temp.}) + 4 \times IDT(\text{Initial Deformation Temp.})\}}{5} \dots \dots (6)$$

- Suhu Deformasi Awal (IDT) adalah untuk menunjukkan suhu, dimana partikel abu telah cukup dingin untuk masih mampu mempunyai sedikit kecenderungan untuk saling menempel dan perlahan membentuk endapan pada permukaan logam perpindahan panas. Implikasinya terhadap desain adalah suhu gas keluar *furnace*, misal suhu gas buang di pintu keluar

furnace, harus di bawah suhu deformasi awal sekitar 50°C untuk menghindari *sintering* dan potensi *slagging* dalam jalur konveksi.

- ST (*Softening temperature*): menunjukkan kecenderungan partikel abu batubara untuk menempel pada permukaan perpindahan panas dan dinding *furnace*.
- *Hemispherical Temperature* (HT): suhu dimana meningkat kecenderungan partikel abu batubara untuk menempel atau menggumpal.
- *Fluid Temperature* (FT): suhu di mana abu akan berbentuk cair, yaitu suhu di mana abu dapat mengalir di permukaan *metal* perpindahan panas

Kriteria nilai kecenderungan <i>slagging</i>	SI (°C)
• Rendah	> 1340
• Menengah	1340 ~ 1230
• Tinggi	1230 ~ 1150
• Parah	< 1150

Indeks *slagging* untuk tipe lignit dan bituminous juga ditentukan oleh temperatur dimana abu batubara dengan viskositas setara dengan 25 Pa.s (250 poise) mulai terbentuk, viskositas abu antara 250 ~ 1000 poise terbentuk abu dalam bentuk cair atau plastis dimana abu tersebut sangat lengket pada pipa heat transfer di dalam boiler. Viskositas abu batubara 25 Pa.s telah dikaitkan dengan kecenderungan *slagging* dan semakin sulitnya penghilangan deposit dalam boiler berbahan bakar batubara. Semakin tinggi temperatur pada viskositas 25 pa.s (T_{25}) ini maka potensi *slagging* akan semakin rendah, T_{25} ditunjukkan dengan persamaan (7), (8), (9) di bawah ini (Plaza, 2013; Li, 2016) :

$$T_{25} (^{\circ}\text{C}) = [(M \times (10)^6) / (\lg(25) - C)]^{0.5} + 150 \dots \dots \dots (7)$$

$$\text{Dimana: } M = 0,00835 \times \text{SiO}_2 + 0,00601 \times \text{Al}_2\text{O}_3 - 0,109 \dots \dots \dots (8)$$

$$C = 0,0415 \times \text{SiO}_2 + 0,0192 \times \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,276 \times \text{Fe}_2\text{O}_3 + 0,0160 \times \text{CaO} - 3,92 \dots \dots \dots (9)$$

Kriteria nilai kecenderungan <i>slagging</i>	T_{25} (°C)
• Rendah	> 1400
• Menengah	1400 ~ 1245

- Tinggi 1230 ~ 1120
- Parah < 1120

Indeks *slagging* abu tipe lignit dan tipe bituminous juga ditentukan oleh perbandingan iron dan calcium (*iron calcium ratio*), dihitung dengan persamaan (10) berikut ini (Stultz, and Kitto, 2005; Plaza, 2013; Li, 2016) :

$$\text{Iron} - \text{calcium ratio} = \frac{Fe_2O_3}{CaO} \dots \dots \dots (10)$$

Kriteria nilai kecenderungan <i>slagging</i>	rasio iron-calcium
• Rendah	< 0,3 atau > 3,0
• Tinggi	0,3 ~ 3,0

Peran Kalsium: Kalsium biasanya ada dalam bentuk kalsium oksida (CaO) yang membantu mengikat sulfur dan meminimalkan pembentukan senyawa yang dapat membentuk slag. Kalsium juga dapat membantu dalam meningkatkan titik lebur dari bahan bakar yang digunakan, sehingga mengurangi risiko *slagging*.

Peran Besi: Besi, di sisi lain, dapat membentuk senyawa yang lebih mudah mengendap pada suhu tinggi, terutama dalam bentuk oksida (FeO, Fe₂O₃). Ketika rasio besi terhadap kalsium tinggi, kemungkinan terjadinya pembentukan slag meningkat, karena besi cenderung membentuk komponen yang lebih stabil pada suhu tinggi.

Dengan memperhatikan rasio ini, operator boiler dapat memperkirakan potensi pembentukan slag. Jika rasio besi sama atau lebih tinggi dibandingkan dengan kalsium, maka ada kemungkinan besar untuk terjadi masalah *slagging*, yang dapat mengganggu efisiensi dan operasional boiler.

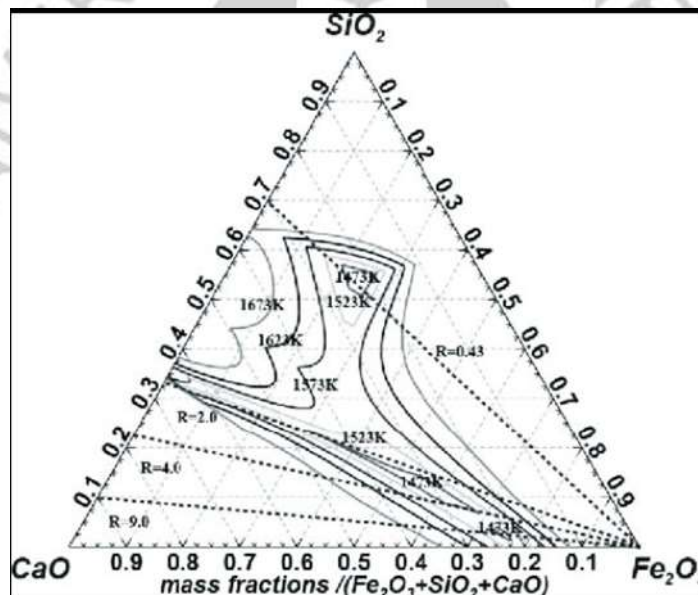
Indeks *slagging* juga dipengaruhi oleh akumulasi *iron dan calcium*, Kriteria *slagging* rendah jika Fe₂O₃+CaO < 10% dan kriteria *slagging* tinggi jika > 10% (Plaza, 2013).

Persentase *Silica* juga menentukan kecenderungan *slagging*, semakin tinggi persentase *silica* maka kecenderungan *slagging* dan *fouling* semakin rendah, dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Plaza, 2013; Frandsen, 1997).

$$\text{Prosentase Silica (G)} = \frac{SiO_2 \times 100}{SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO} \dots \dots \dots (11)$$

Kriteria nilai kecenderungan <i>slagging</i>	Persentasi Silica
• Rendah	72 ~ 80
• Tinggi	65 ~ 72
• Parah	50 ~ 65

Persentasi silika semakin tinggi berpengaruh menurunkan potensi *slagging* karena akan memudahkan menangkap unsur Natrium (Na) sebagai penyebab *fouling* di zona konveksi, sehingga menurunkan potensi *fouling* di boiler (Zhang et al. 2014), Dan semakin tinggi persentasi silika juga menaikkan temperature leleh abu (*ash fusion temperature*) yang menurunkan kecenderungan *slagging* dan *fouling* di boiler (Stultz and Kitto, 2005; Raask, 1985).



Gambar 2.10 Diagram leleh dan fraksi cair pada komposisi Fe_2O_3 – CaO – SiO_2 (Xiao et al., 2014)

Dari Gambar 2.10 terlihat bahwa titik leleh SiO_2 murni sangat tinggi yaitu sekitar 1710 °C, dibandingkan Fe_2O_3 murni mempunyai titik leleh lebih rendah yaitu 1565°C, Tetapi jika SiO_2 bereaksi dengan oksida lain yaitu Fe_2O_3 pada proporsi yang seimbang membentuk fase eutectic seperti fayalite (Fe_2SiO_4) yang mempunyai titik leleh yang sangat rendah (<1200°C) dan lengket pada pipa perpindahan panas (Xiao, 2014), (Frandsen, 1997)

1.9.2. Metode Prediksi *fouling*

a) Abu tipe bituminous.

Faktor yang menentukan kecenderungan *fouling* ditentukan oleh kandungan basa terlebih sodium (Na) di dalam abu, semakin tinggi kandungan sodium dalam abu maka potensi *fouling* semakin tinggi (Stultz and Kitto, 2005; Plaza, 2013; Frandsen, 1997; Li, 2016).

$$\text{Kandungan sodium} = \% \text{Na}_2\text{O} \dots \dots \dots (12)$$

Kriteria nilai kecenderungan <i>Fouling</i>	% Na ₂ O
• Rendah	< 0,5
• Menengah	0,5 ~ 1,0
• Tinggi	1 ~ 2,5
• Parah	> 2,5

b). Abu tipe Lignitic

Untuk abu tipe lignitic faktor *fouling* ditentukan oleh kandungan Na₂O (sodium) (Plaza, 2013; Frandsen, 1997; Li, 2016) :

$$\text{Kandungan sodium} = \% \text{Na}_2\text{O} \dots \dots \dots (13)$$

Kriteria nilai kecenderungan <i>Fouling</i>	% Na ₂ O
• Rendah	< 2
• Menengah	2 ~ 6
• Tinggi	6 ~ 8
• Parah	> 8

Kecenderungan *fouling* ditentukan dengan persamaan (14) berikut ini (Stultz and Kitto, 2005; Plaza, 2013; Frandsen, 1997; Li, 2016) :

$$\text{Faktor } Fouling (R_f) = B/A \times \text{Na}_2\text{O in the ash (\%)} \dots \dots \dots (14)$$

Kriteria nilai kecenderungan <i>fouling</i>	R _f
• Rendah	< 0,2
• Menengah	0,2 ~ 0,5
• Tinggi	0,5 ~ 1,0
• Parah	> 1,0

Perpaduan antara rasio basa - asam yang tinggi dan sodium (Na₂O) yang tinggi menyebabkan *ash sintering strength* (kekuatan ikatan antara abu semakin kuat dan

stabil) sehingga semakin sulit dihilangkan dengan menggunakan soot blower. (Stultz and Kitto, 2005)

Total kandungan alkali di dalam ash terutama sodium dan potasium (K_2O) juga berpengaruh terhadap tingkat *fouling*, dengan persamaan (15) di bawah ini (Lachman, 2021; Frandsen, 1997; Raask, 1985) :

$$Rf = \% Na_2O + (0.6589 \times \% K_2O) \times (\% ash/100) \dots \dots \dots (15)$$

Kriteria nilai kecenderungan <i>fouling</i>	Rf
• Rendah	< 0,3
• Menengah	0,3 ~ 0,45
• Tinggi	0,45 ~ 0,6
• Parah	> 0,6

Menurut Lachman, 2021 persamaan sodium potasium *fouling* index juga berpengaruh terjadinya *fouling* karena ketika potassium mengembun pada partikel fly ash, hal ini meningkatkan tingkat keterlekatan permukaan dan karena itu merupakan penyebab utama terjadinya *fouling*. Hal ini diamati oleh Miles et al., 1996, sodium potasium *fouling* index dituliskan pada persamaan (16) (Lachman, 2021; Ghasidin et al, 2023; Lachman, 2021):

$$Fu = \frac{B}{A} \times (Na_2O + K_2O) \dots \dots \dots (16)$$

Kriteria nilai kecenderungan *fouling*: Fu

- Rendah < 2
- Tinggi > 2

Logam alkali membentuk eutektik bertitik leleh rendah dengan silika, dan rasio mereka terhadap silika (AtS) yang didefinisikan sebagai $(K_2O + Na_2O)/SiO_2$ digunakan juga untuk mengevaluasi *fouling* (Lachman, 2021; Ghasidin et al, 2023) :

$$AtS = \frac{(K_2O + Na_2O)}{SiO_2} \dots \dots \dots (17)$$

Kriteria nilai kecenderungan *fouling*: AtS

- Rendah < 0,1

- Tinggi $> 0,1$

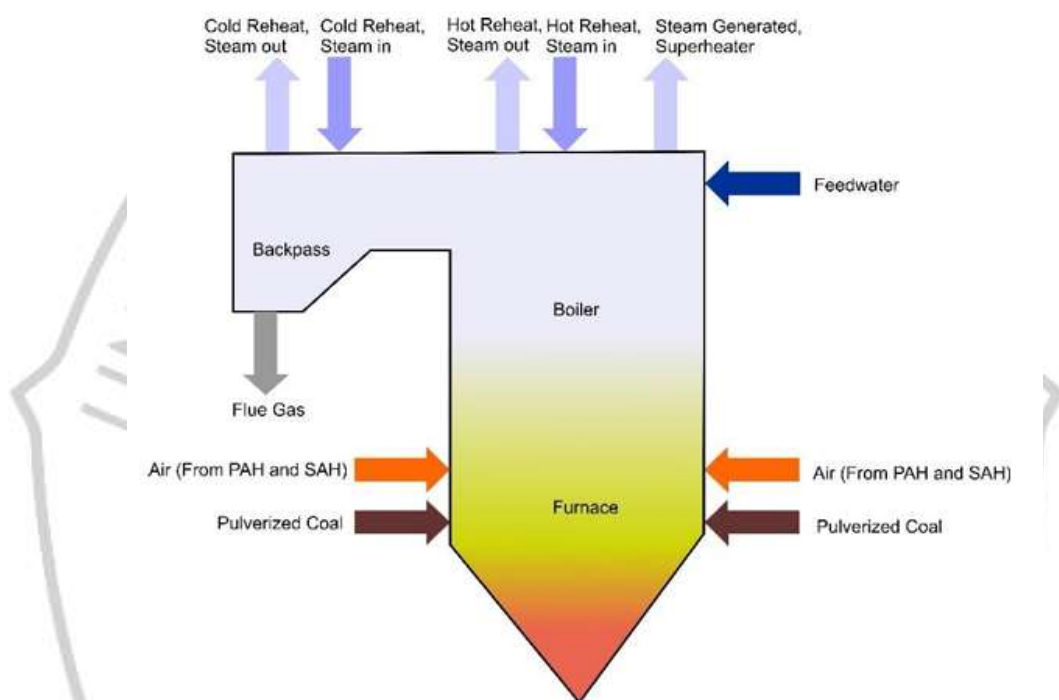
Batubara sebagai bahan bakar pembangkit listrik harus memenuhi persyaratan teknis pembangkit listrik seperti nilai kalor, kandungan sulfur, kadar abu, *fusibilitas*, kandungan Na_2O , dan prediksi *slagging fouling* yang berada pada nilai yang diperbolehkan. Karena adanya kebijakan peralihan batubara, nilai kalori menjadi penting. Jika nilai kalori batubara terlalu rendah, maka konsumsi batubara akan semakin tinggi, dan kemungkinan target produksi listrik dari pembangkit listrik tersebut tidak akan tercapai (Luo and Agraniotis, 2017). Kandungan sulfur merupakan salah satu parameter penentuan baku mutu batubara yang berkaitan dengan polutan udara, selain itu juga mempengaruhi prediksi *slagging* dan potensi korosi pada boiler (Ren et al., 2020). Kadar abu, *fusibilitas*, kandungan Na_2O , dan prediksi pengotoran *slagging, fouling* ditentukan untuk meminimalkan risiko terak dan pengotoran. *Slagging dan fouling* dapat mengurangi penyerapan panas dalam tungku, menurunkan efisiensi boiler, penghentian unit tidak terjadwal karena kebocoran pipa disebabkan panas berlebih pada pipa boiler, dan meningkatkan biaya pengoperasian (Stultz and Kitto, 2005; Luo and Agraniotis, 2017).

1.10. Efisiensi Boiler

Efisiensi termis boiler didefinisikan sebagai persentase energi panas bahan bakar (*heat input*) yang digunakan secara efektif pada uap yang dihasilkan atau dengan pengertian efisiensi yang lain, efisiensi pada boiler adalah prestasi kerja atau tingkat unjuk kerja boiler yang didapatkan dari perbandingan antara energi yang dipindahkan ke fluida kerja atau diserap oleh fluida kerja didalam boiler dengan masukan energi panas bahan bakar. Berdasarkan USA Standard ASME PTC 4-1 *Power Test Code for Steam Generating Units* terdapat dua metode dalam mengevaluasi efisiensi boiler yaitu dengan menggunakan metode langsung (*direct*) dimana energi dipindahkan ke fluida kerja (air dan uap) dibandingkan dengan energi panas bahan bakar boiler. Kedua adalah dengan metode tidak langsung (*indirect*) dimana efisiensi merupakan perbedaan antara persentase panas yang masuk dan persentase kehilangan panas yang terjadi.

1.10.1. Metode Langsung

Dikenal dengan metode input-output karena metode ini hanya memerlukan panas keluaran/output dan panas masuk/input untuk evaluasi efisiensi seperti terlihat pada Gambar 2.11. Dimana output merupakan energi panas yang dipindahkan ke fluida kerja untuk memproduksi uap pada kondisi keluaran superheater dan panas masuk/input merupakan energi panas bahan bakar (ASME, 2013).



Gambar 2. 11 Skema Input dan Output Perhitungan Metode Direct (Suhaily, 2015)

$$Boiler\ Efficiency = \frac{Panas\ keluar}{Panas\ masuk} \times 100\% \dots \dots \dots (18)$$

$$Boiler\ Efficiency = \frac{Q \times (H-h) \times 100}{(q \times GCV\ batubara)} \dots \dots \dots (19)$$

di mana,

Q = jumlah uap yang dihasilkan per jam (kg/jam)

q = jumlah batubara yang terpakai per jam (kg/jam)

$GCV = \text{Gross Calorific Value batubara (kCal/kg)}$

$H = \text{enthalpy uap (kCal/kg)}$

$h = \text{enthalpy feedwater (kCal/kg)}$

Parameter yang dipantau untuk perhitungan efisiensi boiler dengan metode langsung adalah:

- Jumlah steam yang dihasilkan per jam (Q) dalam kg/jam.
- Jumlah bahan bakar yang digunakan per jam (q) dalam kg/jam.
- Tekanan kerja (dalam kg/cm²(g))
- Suhu air umpan (°C)
- Jenis bahan bakar dan nilai panas kotor bahan bakar (GCV) dalam kcal/kg bahan bakar

Adapun keuntungan metode langsung yaitu:

- Pekerja pabrik dapat dengan cepat mengevaluasi efisiensi boiler.
- Memerlukan sedikit parameter untuk perhitungan
- Memerlukan sedikit instrumen untuk pemantauan
- Mudah membandingkan rasio penguapan dengan data benchmark.

Kerugian metode langsung adalah;

- Tidak memberikan petunjuk kepada operator tentang penyebab dari efisiensi sistem yang lebih rendah.
- Tidak menghitung berbagai kehilangan yang berpengaruh pada berbagai tingkat efisiensi

PLTU superkritikal XYZ menggunakan boiler yang dilengkapi dengan economizer dan reheater guna meningkatkan efisiensi perpindahan panas boiler. Maka terdapat sedikit perubahan dan penambahan dari persamaan Efisiensi boiler di atas untuk mencari efisiensi boiler dengan metode direct menjadi (Suriyan, 2024) :

Boiler Efficiency =

$$\frac{(m_{MS} \times h_{MS}) + (m_{HR} \times h_{HR}) - (m_{FW} \times h_{FW}) - (m_{CR} \times h_{CR}) - (m_{SHS} \times h_{SHS}) - (m_{RHS} \times h_{RHR})}{m \text{ batubara} \times GCV \text{ Coal}} \dots (20)$$

di mana, $m_{MS} = \text{flow main steam (steam keluar super heater) (kg/h)}$

$h_{MS} = \text{enthalpy main steam (steam keluar super heater) (kJ/kg)}$

$m_{HR} = \text{flow steam keluar hot reheat (kg/h)}$

h_{HR} = enthalpy steam keluar *hot reheat* (kJ/kg)
 m_{FW} = *flow boiler feedwater* masuk *economizer* (kg/h)
 h_{FW} = entalphy boiler *feedwater* masuk *economizer* (kJ/kg)
 m_{CR} = *flow steam* masuk *cold reheat* (kg/h)
 h_{CR} = *entalphy steam* masuk *cold reheat* (kJ/kg)
 m_{SHS} = *flow spray super heater* (kg/h)
 h_{SHS} = *entalphy spray super heater* (kJ/kg)
 m_{RHS} = *flow spray reheater* (kg/h)
 h_{RHS} = *entalphy spray reheater* (kJ/kg)
 $\dot{m}$ batubara = *flow batubara* yang dipakai dalam proses (kg/h)
GCV coal = *Gross Calorific Value* batubara (kcal/kg)

1.11. Perhitungan Ketersediaan Unit (*Unit Availability*)

Pada Beban penuh 815 NMW, normal jumlah Pulverizer in service 5 buah dan 1 standby. Beban 1 Pulverizer maximum: 85 t/h. Total maximum beban 5 Pulverizer in service: 425 t/h pada beban penuh 815 NMW.

Perhitungan konsumsi/ laju massa bahan bakar (Ade Arta, 2024) :

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{(m_{steam} \times h_{steam}) - (m_{feed\ water} \times h_{feed\ water})}{\eta_{boiler} \times HHV} \dots \dots \dots (21)$$

Dengan:

- $\dot{m}_{fuel}$ = *flow* (laju masa) batubara (kg/h)
- m_{steam} = *flow* (laju masa) uap (kg/h)
- h_{steam} = entalpi uap (kJ/kg)
- $m_{feed\ water}$ = *flow* (laju masa) *feed water* (air pengumpan) (kg/h)
- $h_{feed\ water}$ = *entalpi feed water* (air pengumpan) (kJ/kg)
- η_{boiler} = Efisiensi boiler
- HHV = nilai kalor bahan bakar (kcal/kg)

Kriteria unit availability, konsumsi bahan bakar ≤ 425 t/h

1.12. Net Plant Heat Rate (NPHR)

NPHR menunjukkan tingkat efisiensi pembangkit listrik yang memproses bahan bakar menjadi energi panas dan kemudian menjadi listrik. NPHR adalah

banyaknya energi yang diperlukan pembangkit untuk menghasilkan satu kWh listrik neto (kcal/kwh). Nilai *plant heat rate* dipengaruhi oleh nilai *turbine heat rate* dan efisiensi boiler. Nilai NPHR semakin kecil berarti semakin sedikit energi yang diperlukan untuk menghasilkan satu kWh listrik neto, maka efisiensi unit pembangkit semakin baik. Perhitungan plant heat rate ada 2 metode, yaitu metode langsung atau input-output dan metode keseimbangan energi. Perhitungan plant heat rate dengan metode langsung diperoleh dari jumlah energi bahan bakar yang masuk ke boiler dibagi dengan daya neto pembangkit. Perhitungan NPHR dengan metode kesetimbangan energi menggunakan persamaan 22. (Suriyan, 2024).

$$NPHR \left(\frac{kcal}{kwh} \right) = \frac{NTHR}{Effisiensi Boiler} \dots \dots \dots (22)$$

NTHR atau Net Turbine Heat Rate (kcal/kWh) adalah banyaknya energi yang diperlukan turbin untuk menghasilkan 1 kWh listrik.

$$NTHR = \frac{(m_{MS} \times h_{MS}) + (m_{HR} \times h_{HR}) - (m_{FW} \times h_{FW}) - (m_{CR} \times h_{CR}) - (m_{SHS} \times h_{SHS}) - (m_{RHS} \times h_{RHS})}{Generator Output - Auxiliary Power} \dots (23)$$

Generator Output = Daya listrik yang dihasilkan generator (kW)

Auxiliary Power = Daya pemakaian sendiri (kW)

Perhitungan NPHR dengan metode langsung menggunakan persamaan berikut . (Suriyan, 2024) :

$$NPHR \left(\frac{kcal}{kwh} \right) = \frac{mf \times HHV}{Generator Output - Auxiliary Power} \dots \dots \dots (24)$$

mf = laju aliran masa bahan bakar (T/h)

HHV = High Heating Value bahan bakar (kcal/kg)

1.13. Specific Fuel Consumption (SFC)

Spesific Fuel Consumption (SFC) merupakan metrik yang signifikan dalam dinamika operasional pembangkit karena mencerminkan seberapa besar efisiensi dalam mengubah energi kimia menjadi energi mekanik. SFC mengukur jumlah total bahan bakar yang digunakan oleh pembangkit untuk menghasilkan 1 kWh output listrik, dengan persamaan sebagai berikut (Ade Arta, 2024) :

$$SFC_{netto} \left(\frac{kg}{kWh} \right) = \frac{NPHR \left(\frac{kcal}{kWh} \right)}{HHV \text{ batubara} \left(\frac{kcal}{kg} \right)} \dots \dots \dots (25)$$

SFC = Specific fuel Consumption (kg/kWh)

NPHR = Net Plant Heat Rate (kCal/ kWh)

HHV batubara = Nilai Kalori batubara (kcal/kg)

1.14. Harga Patokan Batubara

Berdasarkan keputusan Menteri ESDM no. 41.K/ MB.01/ MEM.B/ 2023 tentang pedoman penetapan harga patokan untuk penjualan komoditas batubara, ditetapkan harga patokan batubara dengan persamaan sebagai berikut:

- Harga patokan batubara kalori > 5200 – 6000, sebagai berikut:

$$HPB = \left(HBA1 \times \frac{K}{5200} \times \frac{(100-TM)}{(100-23,12)} \right) - ((TS - 0,69) \times 4 + (Ash - 6) \times 0,4) \dots (26)$$

- Harga patokan batubara kalori > 4200 – 5200, sebagai berikut:

$$HPB = \left(HBA2 \times \frac{K}{4200} \times \frac{(100-TM)}{(100-35,29)} \right) - ((TS - 0,2) \times 4 + (Ash - 4,21) \times 0,4) \dots (27)$$

HPB = Harga patokan batubara (USD/Ton)

HBA 1 = Harga batubara acuan 1 (USD/Ton)

HBA 1 bulan Maret 2025 periode 1 = 82,66 USD/ Ton

HBA 2 = Harga batubara acuan 2 (USD/Ton)

HBA 2 bulan Maret 2025 periode 1 = 50,70 USD/ Ton

K = Nilai kalor batubara (kcal/kg)

TM = Kandungan air batubara (Total Moisture) (%)

TS = Kandungan sulfur (belerang) batubara (Total Sulphur) (%)

Ash = Kandungan abu batubara (ash) (%)

1.15. Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca

Metode - 1: Unit pembangkit yang memiliki data konsumsi bahan bakar tapi tidak memiliki data kualitas bahan bakar (*proximate dan ultimate analysis*), formula nya sebagai berikut (Suhaily, 2024) :

$$E_{CO_2} = K_{BB} \times FE \dots \dots \dots (28)$$

di mana:

E_{CO_2} : Total emisi CO₂ (Ton CO₂)

KBB : Konsumsi Bahan Bakar (Tj)

FE : Faktor Emisi (ton/Tj)

Metode – 2: Perusahaan pembangkit yang telah memiliki data konsumsi bahan bakar dan telah mengukur kualitas bahan bakar (*ultimate analysis atau kandungan karbon*):

$$E_{CO_2} = F_{BB} \times C_{ar} \times FO \times 44/12 \dots \dots \dots (29)$$

di mana:

E_{CO_2} : Total emisi CO₂ (Ton CO₂)

F_{BB} : Konsumsi Batubara (Ton)

C_{ar} : Kandungan karbon, as received, persentasi (*weighted average*)

FO : Faktor oksidasi spesifik (jika tersedia)

44 : Berat molekul CO₂

12 : Berat atom C

Metode – 3: Metode emisi CO₂ yang dikeluarkan oleh Dirjen Ketenaga Listrikan, hanya digunakan untuk mengukur emisi CO₂ dari pembangkit listrik berbahan bakar batu bara. Salah satu kandungan terpenting dari batu bara adalah abu, Abu merupakan hasil sisa setelah pembakaran batubara yang besarnya antara 1% sampai 30% dari berat batubara.

$$E_{CO_2} = F_{BB} \times [C_{ar} - (A_{ar} \times C_{ub})] \times 3,6667 \dots \dots \dots (30)$$

Dimana:

E_{CO_2} : Total emisi CO₂ (Ton CO₂)

F_{BB} : Konsumsi Batubara (Ton)

C_{ar} : Kandungan karbon, as received (rerata), persentasi

A_{ar} : Kandungan abu, as received (rerata), persentasi

C_{ub} : Kandungan karbon dalam abu (unburn carbon), rerata, persentasi

1.16. EtaPRO

EtaPRO adalah aplikasi perangkat lunak yang dikembangkan oleh Eta Systems dan Toshiba, terutama digunakan di sektor energi untuk mengelola dan mengoptimalkan pembangkit listrik yang terdiri dari peningkatan kapasitas, efisiensi dan memastikan ketersediaan pembangkit listrik. Ini sangat berguna dalam konteks pengoperasian pembangkit listrik, karena menawarkan alat untuk pemantauan kinerja termal, diagnostik ketidak normalan, dan pemeliharaan

prediktif, dan telah dipasang di lebih dari 676.000 MW Pembangkit Listrik di 40 negara. Berikut adalah beberapa fitur dan manfaat utama EtaPRO. (Prakoso, 2024)

:

- **Pemantauan Kinerja:** EtaPRO menyediakan data dan analisis real-time pada berbagai performance metrik kinerja sistem pembangkit listrik. Hal ini membantu operator dan teknisi memantau efisiensi dan kesehatan peralatan mereka.
- **Pemeliharaan Prediktif:** perangkat lunak ini menggunakan algoritme canggih dan data historis untuk memprediksi potensi kegagalan peralatan sebelum terjadi, sehingga memungkinkan pemeliharaan proaktif dan mengurangi waktu henti dari pengoperasian pembangkit listrik.
- **Diagnostik:** EtaPRO dapat mendiagnosis masalah pada peralatan dan sistem dengan menganalisis pola data dan mengidentifikasi anomali, yang membantu dalam pemecahan masalah dan menyelesaikan masalah dengan lebih efektif.
- **Visualisasi Data:** menawarkan alat visualisasi data yang komprehensif, termasuk dasbor dan laporan, yang membantu pengguna menafsirkan data kompleks dan membuat keputusan yang tepat.
- **Integrasi:** perangkat lunak ini dirancang untuk berintegrasi dengan berbagai sumber data dan sistem kontrol, memberikan pandangan kohesif tentang operasi pembangkit listrik.
- **Optimalisasi:** Dengan menganalisis data kinerja, EtaPRO membantu mengoptimalkan pengoperasian pembangkit listrik, meningkatkan efisiensi secara keseluruhan, dan mengurangi biaya operasional.
- **Virtual Plant:** untuk melihat kinerja termal terbaik yang dapat dicapai dengan model termodinamika spesifik pabrik.

1.17. Boiler Cleanliness

Boiler cleanliness dianalisis menggunakan software EtaPRO. Data utama yang diperlukan dalam menghitung heat transfer coefficient adalah aliran massa

serta temperatur input dan output dari suatu alat penukar kalor. Kemudian data tersebut dilakukan perhitungan untuk menentukan nilai dari *heat load*, *heat transfer coefficient* serta *cleanliness factor* dari suatu alat penukar kalor. *Cleanliness factor* merupakan referensi penting dalam memprediksi tingkat kebersihan dari suatu alat penukar kalor (Suhaily, 2024; Suhaily, 2025). Perhitungan cleanliness factor pada alat penukar panas menggunakan persamaan 31 sampai dengan 33.

$$HTC_{clean} = HTC_{base} \times \left(\frac{GIT_{act} + 459.67}{GIT_{base} + 459.67} \right)^{0.6} \dots \dots \dots (31)$$

$$BlrSectCleanFact = \left(\frac{HTC_{act}}{HTC_{clean}} \right) \dots \dots \dots (32)$$

$$WaterWallCleanFact = \left(\frac{H_{flame} - H_{fegta}}{H_{flame} - H_{fegtc}} \right) \dots \dots \dots (33)$$

Dengan.

HTC_{act} adalah Actual Section Heat Transfer Coefficient
[Btu/h.ft².°F]

HTC_{base} adalah Base Section Heat Transfer Coefficient
[Btu/h.ft².°F]

HTC_{clean} adalah Cleanliness Section Heat Transfer Coefficient
[Btu/h.ft².°F]

GIT_{act} adalah Actual Section Gas inlet Temperature [°F]

GIT_{base} adalah Base Section Gas Inlet Temperature [°F]

$BlrSectCleanFact$ adalah Boiler Section Cleanliness Factor [%]

$WaterWallCleanFact$ adalah Water Wall Section Cleanliness Factor [%]

H_{flame} adalah Flue Gas Enthalpy at Adiabatic Flame Temp [Btu]

H_{fegta} adalah Flue Gas Enthalpy at Actual Furnace Exit Gas Temp [Btu]

H_{fegtc} adalah Flue Gas Enthalpy at Clean Furnace Exit Gat Temp [Btu]