

**STUDI PENGGUNAAN BATUBARA LIGNIT MALLAWA DAN
PENCAMPURAN DENGAN CANGKANG BIJI JAMBU METE
DI PT. INDOOFOOD CBP, Tbk CAB. MAKASSAR**

NOVARINI

P2201211409



**PROGRAM PASCA SARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2013

ABSTRAK

NOVARINI. Studi Penggunaan Batubara Lignit Mallawa dan Campuran Dengan Cangkang Biji Jambu Mete di PT. Indoofood CBP, Tbk Cabang Makassar (dibimbing oleh **Yusuf Siahaya** dan **Johannes Leonard**)

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penggunaan batubara lignit dengan kadar sulfur diatas 1,8% dan jika 60% batubara lignit dicampur dengan 40% cangkang biji jambu mete terhadap efek *slagging* dan *fouling* pada ketel uap pipa api di PT. Indoofood CBP, Tbk Cabang Makassar.

Penelitian ini dilakukan pada ketel uap pipa api di bagian utilitas Departemen Teknik PT. Indoofood CBP, Tbk Cabang Makassar. Data yang diambil adalah hasil analisis proksimat, kandungan abu, nilai bakar bahan bakar, temperatur, tekanan, laju alir air umpan dan uap yang dihasilkan, temperatur keluar pipa api, udara berlebih, dan jumlah karbon yang tidak terbakar, serta luas ruang bakar. Analisa data dilakukan pada perhitungan indeks *slagging* dan *fouling* serta kesetimbangan energi proses pembakaran,

Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan menggunakan bahan bakar batubara lignit didapatkan nilai indeks *slagging* 1,42% dan indeks *fouling* Na_2O 0,34%. Jika menggunakan bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete diperoleh nilai indeks *slagging* 0,86% dan indeks *fouling* Na_2O 0,05%. Nilai kalor uap yang dibangkitkan, nilai kalor gas buang, dan kalor yang hilang untuk kondisi ketel uap sebelum dibersihkan menggunakan bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete hampir sama dengan kondisi ketel uap setelah dibersihkan dengan menggunakan bahan bakar batubara lignit.

Kata kunci : Batubara lignit dan cangkang biji jambu mete, ketel uap pipa api, *slagging* dan *fouling*

ABSTRACT

NOVARINI. Study on use of Mixture of Lignite Mallowa Coal and Cashew Nut Shells in PT. Indofood CBP, Tbk of Makassar Branch (supervised by **Yusuf Siahaya** dan **Johannes Leonard**).

This research aimed to analyse of the use 60% of lignite coal of 1,8% sulphur content if mixed with 40% 1,8% and when lignite coal mixed with 40% the cashew nut shells on the slagging and fouling effects on the fire tube steam boiler.

The research was carried out on the fire tube steam boiler in the utility of engineering department of PT. Indofood CBP, Tbk Makassar Branch. Data taken were the proximate analysis result, ash content, fuel value, temperature, pressure, flowrate of feed water, and the steam generated, pipe line fire exit temperature, excessive air, amount of unburned carbon, and combustion chamber extension. The data were analysed by the calculation of the slagging and fouling index, and combustion process energy balance..

The research result indicates that by using lignite coal fuel, the slagging index value of 1,42% and fouling index of Na_2O 0,34% are obtained, however, if using the fuel mixture of 60% lignite coal and 40% the cashew nut shells, the slagging index value is found 0,86% and fouling index value is Na_2O 0,05% . The steam caloric value in the steam boiler condition before being cleaned using the mixture fuel of 60% lignite coal and 40% cashew nut shells are almost the same as the steam boiler condition after being cleaned using the lignite coal fuel.

Keywords : lignite coal and cashew nut shells, fire tube steam boiler, slagging and fouling

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, atas berkah karuniaNya sehingga tesis ini dapat penulis selesaikan, meskipun banyak kendala yang dihadapi.

Tesis yang berjudul “Studi Penggunaan Batubara Lignite Mallawa dan Pencampuran dengan Cangkang Biji Jambu Mete di PT. Indofood CBP, Tbk Cabang Makassar merupakan syarat untuk menyelesaikan studi pada program Pascasarjana Teknik Mesin Universitas Hasanuddin.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Dr. Ir. Yusuf Siahaya, MSME sebagai Ketua Penasehat, Dr. Ir. Johannes Leonard, DEA sebagai Anggota Penasehat, Ir Banu Wirawan sebagai Manajer Produksi, dan Ruli Thanidar ST sebagai Supervisor Teknik di PT. Indofood CBP, Tbk Cabang Makassar atas arahan-arahan yang telah diberikan selama penyusunan proosal tesis ini.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu sampai terselesaikannya proposal tesis ini, terutama kepada :

1. Suami serta anak-anakku atas pengorbanan dan doanya
2. Bapak Dr. Ir. Wahyu H. Piarah, MSME selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
3. Bapak Rafiuddin Syam, ST, M.Eng, Ph.D selaku Ketua Program Studi Pascasarjana Teknik Mesin Universitas Hasanuddin

4. Bapak Direktur serta Staff Program Studi Pascasarjana Universitas Hasanuddin atas segala pelayanannya
5. Bapak, Ibu dosen staff pengajar Jurusan Teknik Mesin Program Studi Pascasarjana Universitas Hasanuddin
6. Kepada seluruh teman-teman Pascasarjana Teknik Mesin angkatan 2011 yang telah banyak membantu dalam penyelesaian proposal tesis ini.

Akhir kata semoga proposal tesis ini dapat bermanfaat bagi kita semua dan oleh karena itu masuka dan kritik dibutuhkan untuk membantu dalam pengembangan penelitian selanjutnya.

Makassar, Agustus 2013

Penulis

DAFTAR ISI

	halaman
ABSTRAK	ii
PRAKATA	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR LAMPIRAN	x
 BAB I PENDAHULUAN	
A.Latar Belakang.....	1
B.Rumusan Masalah	3
C.Tujuan Penelitian.....	4
D.Manfaat Penelitian	5
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
A. Sistem Penanganan Batubara di PT. Indoofood CBP Sukses Makmur, Tbk Cabang Makassar	6
B. Diagram Alir Proses di PT. Indoofood CBP Sukses Makmur, Tbk Cabang Makassar	7
C. Batubara	10
D. Jambu Mete.....	17
E. Potensi Slagging dan Fouling	20
F. Spesifikasi Bahan Bakar yang Digunakan untuk Ketel Pipa Api Stocker Thompson Triumph MK 4	29

halaman**BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

A. Waktu dan Tempat	33
B. Prosedur Penelitian	33
C. Pengolahan Data	36
D. Diagram Alir Penelitian.....	37
E. Proses Pembakaran dan Produksi Steam	38

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

A. HASIL	39
B. PEMBAHASAN.....	64

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

A. KESIMPULAN	78
B. SARAN	79

DAFTAR PUSTAKA.....	80
---------------------	----

LAMPIRAN.....	82
---------------	----

DAFTAR TABEL

Nomor	halaman
1 Klasifikasi batubara berdasarkan peringkat	15
2 Analisa proximate dan ultimate	16
3 Mineral-mineral batubara.....	20
4 Range Impuritis batubara	32
5 Komposisi kimia abu batubara lignit (analisa sucofondo Tanggal 17 Mei 2013)	41
6 Komposisi kimia abu cangkang biji jambu mete (www. Anupinindustries.net/cashew-net-shell-cake.html tahun 2010).....	43
7 Kondisi operasi bahan bakar batubara lignit Mallawa dan cangkang biji jambu mete.....	47
8 Perhitungan pembakakaran-metode BTU batubara lignit Mallawa dan cangkang biji jambu mete	49

DAFTAR GAMBAR

Nomor		halaman
1	Sistem Penanganan Batubara di PT. Indoofood CBP Sukses Makmur, Tbk Cabang Makassar	6
2	Diagram alir proses di PT. Indoofood CBP Sukses makmur, Tbk Cabang Makassar	9
3	Proses pembentukan batubara (DAF).....	14
4	Bentuk spesifik ash dan perubahan bentuk akibat Dari temperatur pembakaran.....	24
5	Slagging pada Ruang Bakar.....	24
6	Fouling di dalam Pipa Api.....	25
7	Proses pembakaran dan produksi steam	38
8	Kondisi ketel uap sebelum dibersihkan menggunakan bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete	65
9	Kondisi ketel uap sebelum dibersihkan menggunakan bahan bakar batubara lignit	66
10	Kondisi ketel uap setelah dibersihkan menggunakan bahan bakar batubara lignit	67
11	Grafik hubungan kondisi ketel uap terhadap temperatur Pembakaran dan temperatur keluar ruang bakar	68
12	Grafik hubungan kondisi ketel uap terhadap temperatur Gas keluar pipa api.....	71
13	Grafik hubungan kondisi ketel uap terhadap Q_{steam} yang dibangkitkan $Q_{\text{gas buang}}$ dan Q_{losses}	73
14	Grafik hubungan kondisi ketel uap terhadap laju alir uap/ Steam yang dihasilkan dan efisiensi ketel uap.....	76

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	halaman
1 Hasil Analisa Proximate Batubara Pada Pemakaian Ketel Uap Sebelum Dibersihkan.....	82
2 Hasil Analisa Cangkang Biji Jambu Mete.....	83
3 Hasil Analisa Kimia Abu Batubara.....	84
4 Perhitungan Konversi Analisa Proximate ke Ultimate Batubara	85
5 Hasil Analisa Proximate Batubara Pada Pemakaian Ketel Uap Setelah Dibersihkan.....	86
6 Grafik Nilai Kapasitas Panas	89
7 Hasil Perhitungan Keseimbangan Energi dan Prestasi Kerja Ketel Uap Sebelum Dibersihkan Menggunakan Bahan Bakar Campuran 60% Batubara Lignit dan 40% Cangkang Biji Jambu Mete	90
8. Tabel Kondisi Proses BTU-Method Sebelum Ketel Uap Dibersihkan Menggunakan Bahan Bakar Batubara Lignit	91
9. BTU-Method Sebelum Ketel Uap Dibersihkan Menggunakan Bahan Bakar Batubara Lignit.....	92
10 Hasil Perhitungan Keseimbangan Energi dan Prestasi Kerja Ketel Uap Sebelum Ketel Uap Dibersihkan Menggunakan Bahan Bakar Batubara Lignit.....	93
11. Tabel Kondisi Proses BTU-Method Setelah Ketel Uap Dibersihkan Menggunakan Bahan Bakar Batubara Lignit	94
12. BTU-Method Setelah Ketel Uap Dibersihkan Menggunakan Bahan Bakar Batubara Lignit.....	95
13. Hasil Perhitungan Keseimbangan Energi dan Prestasi Kerja Ketel Uap Setelah Ketel Uap Dibersihkan Menggunakan Bahan Bakar Batubara Lignit.....	96

14	Tabel Hasil Perhitungan Keseimbangan Energi dan Prestasi Kerja Ketel Uap Sebelum dan Setelah Dibersihkan.....	97
15	Hasil Perhitungan Indeks Slagging dan Fouling	98
16	Perhitungan Ekonomi	99

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Dalam industri, utilitas merupakan bagian vital dari suatu proses produksi. Air, listrik dan steam merupakan bagian utama dari utilitas suatu industri harus terjamin ketersediaannya dan dipastikan terpakai secara efektif dan efisien.

PT. Indoofood CBP Sukses Makmur, Tbk Cabang Makassar yang berdiri sejak bulan Maret tahun 1991 merupakan salah satu dari enam belas cabang yang ada di Malaysia dan Indonesia yang memproduksi produk pangan mie instant dengan merk dagang Indomie, Sarimi, Supermie, Sakura, Vitami dan Intermie merupakan salah satu industri yang menjamin ketersediaan dan memastikan terpakainya steam secara efektif dan efisien untuk keberlangsungan proses produksinya [8].

Steam di PT. Indoofood CBP Sukses Makmur Tbk, Cabang Makassar dihasilkan dari 3 unit ketel pipa api batubara berkapasitas 10,5 ton/jam. Batubara yang digunakan adalah jenis batubara Lignite yang berasal dari Kabupaten Bone Kota Makassar Propinsi Sulawesi Selatan, dengan pemakaian lebih kurang 9600 ton pertahun. Steam yang dihasilkan dari ketiga boiler ini dipakai pada sembilan line produksi untuk proses pengukusan mie instant pada steam box dan penggorengan mie

instant pada fryer serta dipakai sebagai pemanas untuk mengubah fase salah satu bahan baku yaitu minyak goreng yang kondisinya mengental akibat pengaruh temperatur saat transportasi dan saat penyimpanan di tank yard.

Salah satu permasalahan dalam pemakaian batubara lignite ini adalah tingginya kadar Sulfur yang melebihi standar yang dipersyaratkan dari tipe boiler yang digunakan di PT. Indoofood CBP Sukses Makmur Tbk, Cabang Makassar yaitu maksimum 1,8%. Tingginya kadar Sulfur ini dapat menimbulkan slagging pada ruang bakar dan fouling pada pipa api ketel uap yang dapat menghambat proses perpindahan panas.

Untuk mengurangi dampak ini, PT. Indoofood CBP Sukses Makmur Tbk, Cab Makassar mencoba melakukan blending/pencampuran batubara lignite dengan cangkang jambu mete, karena pada dasarnya cangkang biji jambu mete merupakan salah satu potensi energi yang dapat diperbaharui dan ketersediaannya di Propinsi Sulawesi Selatan cukup besar. Proses pencampuran ini mengambil persentase 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete dengan tujuan untuk memperoleh nilai kandungan sulfur pada bahan bakar mencapai nilai maksimum dari yang dipersyaratkan oleh spesifikasi bahan bakar yang diperbolehkan untuk dipakai pada ketel di PT. Indoofood CBP Sukses Makmur Tbk, Cab Makassar (nilai Sulfur maksimum 1,8%).

Pencampuran ini diharapkan akan mengurangi potensi terjadinya slagging dan fouling karena kandungan Sulfur pada cangkang biji jambu mete sangat rendah dengan hasil analisa laboratoriumnya tidak dapat terukur karena rendahnya kandungan Sulfurnya. Selain menstandarkan nilai kandungan Sulfur dari bahan bakar, pengambilan persentase pencampuran 60% batubara dan 40% cangkang biji jambu mete ini juga didasarkan pada alasan ketersediaan cangkang biji jambu mete yang tidak bisa tersedia sebanyak ketersediaan batubara lignit.

B. Perumusan Masalah

Standar kandungan Sulfur dalam bahan bakar batubara di PT. Indofood CBP Sukses Makmur Tbk, Cabang Makassar melebihi dari standar yang dipersyaratkan untuk tipe ketel uap pipa api yang digunakan dan jenis pembakarannya bisa berdampak kepada timbulnya slagging dan fouling , karena hal ini maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut :

1. Bagaimana proses penggunaan batubara lignite serta bila 60% batubara lignite ini dicampur dengan 40% cangkang biji jambu mete terhadap efek slagging dan fouling pada Ketel Pipa Api PT. Indofood CBP Sukses Makmur, Tbk Cabang Makassar

2. Bagaimana kesetimbangan energi ketel pipa api bila menggunakan batubara lignite tanpa dicampur dengan cangkang biji jambu mete serta bila 60% batubara dicampur dengan 40% cangkang biji jambu mete.

C. Tujuan

Tujuan yang ingin didapat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisa proses penggunaan batubara lignite dengan kadar Sulfur diatas 1,8 % serta bila 60% batubara lignite ini dicampur dengan 40% cangkang biji jambu mete terhadap efek slagging dan fouling pada ketel uap pipa api di PT. Indofood CBP Sukses Makmur, Tbk Cabang Makassar
2. Menghitung kesetimbangan energi ketel pipa api bila menggunakan batubara lignite tanpa dicampur dengan cangkang biji jambu mete serta bila 60% batubara dicampur dengan 40% cangkang biji jambu mete

D. Batasan Masalah

Permasalahan dalam penulisan dan pembahasan pada penelitian ini dibatasi sebagai berikut :

1. Komposisi campuran bahan bakar adalah 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete.
2. Kondisi yang dibahas adalah sebagai berikut :
 1. Ketel uap pipa api sebelum dibersihkan menggunakan bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete
 2. Ketel uap pipa api sebelum dibersihkan menggunakan bahan bakar batubara lignit
 3. Ketel uap pipa api setelah dibersihkan menggunakan bahan bakar batubara lignit

E. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian yang bisa didapat adalah sebagai berikut :

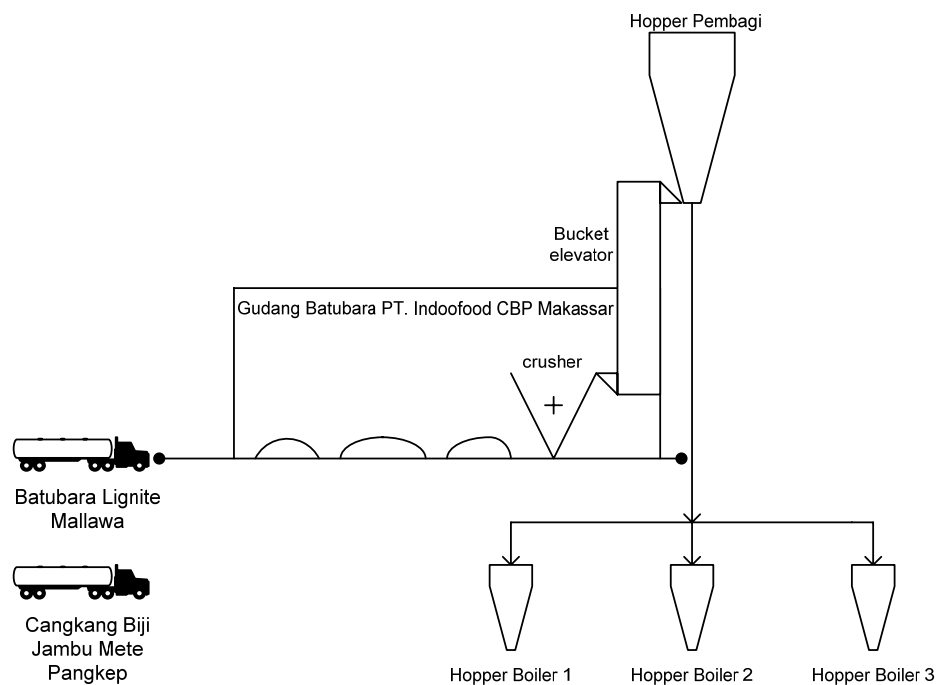
1. Kalangan Industri
Melalui penelitian ini, pihak industri dapat mengetahui seberapa besar prestasi kerja ketel pipa api agar dapat diaplikasikan guna dapat memaksimalkan penggunaannya
2. Kalangan Akademik
Sebagai bahan referensi dan bahan perbandingan untuk penelitian lebih lanjut.

BAB II

LANDASAN TEORI

A. Sistem Penanganan Batubara di PT. Indofood CBP Sukses

Makmur, Tbk Cabang Makassar



Gambar 1 Sistem penanganan batubara di PT. Indofood CBP Sukses Makmur, Tbk Cab. Makassar

Penanganan batubara di PT. Indofood CBP Sukses Makmur, Tbk Cab. Makassar diawali dengan penerimaan batubara dari beberapa penyuplai rekanan yang memiliki tambang di Kecamatan Malawa Kabupaten Bone Sulawesi Selatan menggunakan transportasi darat,

sedangkan cangkang biji jambu mete diterima dari Kabupaten Pangkep Sulawesi Selatan. Batubara dan cangkang jambu mete yang telah disuplai selanjutnya disimpan di gudang batubara yang terletak bersebelahan dengan ke tiga boiler tipe fire tube berkapasitas 10 ton perjam menggunakan proses pembakaran tipe chain grate.

Batubara ini selanjutnya diubah ukurannya agar sesuai dengan standar kebutuhan boiler yaitu 2,5 – 5 cm menggunakan crusher. Setelah ukurannya sesuai standar, batubara diumpankan ke feed hopper pembagi melalui single bucket elevator untuk dibagi ke hopper boiler 1, 2 dan 3 [1].

B. Diagram Alir Proses di PT. Indofood CBPSukses Makmur, Tbk Cab. Makassar

Batubara dan cangkang biji jambu mete dari masing-masing hopper batubara diatur volumenya melalui swing chute agar volume menjadi rata di setiap sisinya rata saat turun di ignition arch untuk menjalani proses pembakaran di atas chain grate. Proses pembakaran selanjutnya diawali dengan memastikan bahwa volume air di dalam boiler terisi minimal $\frac{2}{3}$ volume boiler.

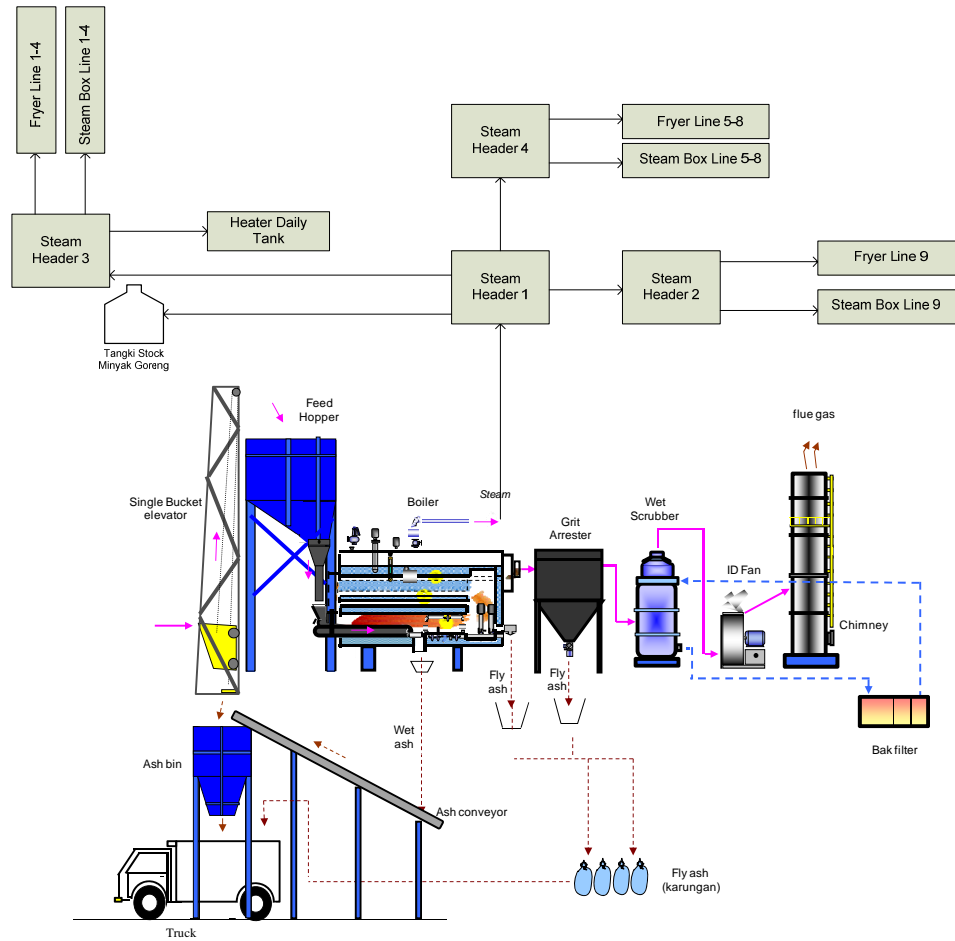
Proses pembakaran awal dilakukan dengan membakar lembaran karton dan bobin sisa etiket pembungkus mie dan nyala dari hasil pembakaran inilah yang dikontakkan ke batubara agar memicu proses pembakaran. Udara pembakaran dihembuskan ke celah-celah bagian bawah chain grate dari FD fan. Udara panas dari ruang bakar ditarik ke pipa api oleh ID fan dan melewati sistem 3 pass wet back, dimana proses

perpindahan panas dan temperatur pada boiler fire tube 3 pass wet back mengalami 2 jenis perpindahan panas yaitu radiasi dan konveksi. Pada area furnace tepatnya di atas chain grate proses transfer panas yang terjadi yaitu radiasi, selanjutnya udara panas yang dihasilkan dan ditarik oleh ID fan ke dalam pipa api dan memanaskan air pada pipa air mengalami proses konveksi dari pipa api ke pipa air pada pass back ke 2 dan ke 3.

Sisa hasil pembakaran berupa wet ash jatuh pada ujung chain grate sedangkan fly ash terpisah melalui tiga tahap yaitu untuk fly ash yang agak berat akan jatuh di bottom ash sebelum masuk ke pipa api atau pada ujung ruang bakar, selanjutnya fly ash yang masih terikut di pipa api akan ditangkap pada ujung pipa api oleh grits arester dan yang terakhir fly ash akan di tangkap di wet scrubber sebelum keluar melalui cerobong.

Steam yang dihasilkan dari ketiga ketel pipa api berkapasitas 10 ton/jam ini selanjutnya dipakai untuk keperluan memanaskan stock minyak goreng di tank yard serta dipakai di sembilan lini proses produksi mie yaitu untuk mengukus mie di steam box dan memanaskan minyak goreng di fryer untuk proses penggorengan mie [5].

Diagram alir Proses di PT. Indofood CBP Sukses Makmur, Tbk Cab. Makassar diperlihatkan pada gambar 2 berikut



Gambar 2 Diagram alir proses di PT. Indofood CBP Sukses Makmur, Tbk Cabang Makassar

C. Batubara

C.1 Produksi dan Konsumsi Batubara

Dunia saat ini mengkonsumsi batubara sebanyak lebih dari 4050 juta sebagai suatu kenaikan sebesar 38% selama 20 tahun terakhir. Batubara dipergunakan diberbagai sektor termasuk pembangkit listrik dan keperluan pembangkit steam pada industri. Pertumbuhan produksi batubara yang tercepat terjadi di Asia, sementara produksi batubara di Eropa menunjukkan penurunan.

Negara penghasil batubara terbesar tidak hanya terbatas pada satu daerah. Lima negara penghasil batubara terbesar adalah Cina, AS, India, Australia dan Afrika Selatan. Sebagian besar produksi batubara dunia digunakan di tempat batubara tersebut diproduksi, hanya 18% dari batubara jenis antrasit yang diperdagangkan di Internasional.

Produksi batubara dunia diharapkan mencapai 70 milyar ton pada tahun 2030 dengan Cina memproduksi sekitar setengah dari kenaikan itu selama jangka waktu tersebut. Produksi batubara ketel uap diprediksikan akan mencapai 5,2 milyar ton tumbuh sebesar 1,5% pertahun dalam jangka waktu 2002 – 2030 dan 1% pertahun khusus untuk kenaikan batubara muda (lignite).

Batubara adalah salah satu energi yang penting bagi dunia, yang digunakan untuk menghasilkan listrik hampir 40% di seluruh dunia. Dibanyak negara angka-angka ini jauh lebih tinggi : Polandia menggunakan batubara lebih dari 94% untuk pembangkit listrik, Afrika Selatan 92%, Cina 77% dan Australia 76%. Batubara merupakan sumber energi yang mengalami pertumbuhan yang paling cepat di dunia lebih cepat dari gas, minyak, nuklir, air dan sumber daya pengganti.

Batubara telah memainkan peran yang sangat penting selama berabad-abad tidak hanya membangkitkan listrik, namun juga merupakan bahan bakar utama untuk menghasilkan steam pada kegiatan-kegiatan industri.

Pasar global batubara sangat besar dan beragam dengan berbagai produsen dan konsumen disetiap benua. Pasokan batubara tidak berasal dari satu daerah tertentu, yang dapat membuat konsumen bergantung pada keamanan pasokan dan stabilitas satu daerah saja. Batubara tersebar diseluruh dunia dan diperdagangkan secara Internasional.

Banyak negara yang mengandalkan pasokan batubara domestik untuk kebutuhan energi mereka seperti Cina, India, Australia dan Afrika Selatan. Negara lain mengimpor batubara dari berbagai negara. Oleh karena itu batubara memiliki peran yang penting dalam memelihara keselamatan kombinasi energi dunia. Peran tersebut adalah :

- Cadangan batubara sangat banyak dan akan tersedia untuk masa depan yang sudah dapat diperkirakan tanpa menimbulkan masalah geopolitik dan keamanan
- Batubara tersedia dari berbagai sumber yang banyak pada pasar dunia yang terpasok dengan baik
- Batubara dapat dengan mudah disimpan di pembangkit dan persediaannya dapat digunakan dalam keadaan darurat
- Pembangkit menggunakan batubara tidak tergantung pada cuaca dan dapat digunakan sebagai pendukung pembangkit listrik tenaga angin dan air
- Batubara tidak memerlukan jaringan pipa dengan tekanan tinggi atau jalur pasokan khusus
- Jalur pasokan batubara tidak perlu penjagaan yang membutuhkan biaya yang tinggi [4].

C.2 Proses Pembentukan Batubara

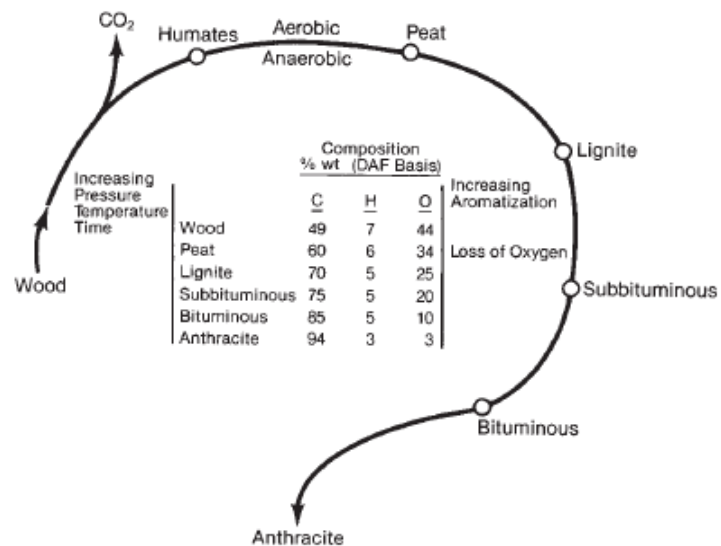
Penimbunan lanau dan sedimen lainnya bersama dengan pergeseran kerak bumi (dikenal sebagai pergeseran tektonik) mengubur rawa dan gambut yang seringkali sampai kedalaman yang sangat dalam. Dengan penimbunan tersebut, material tumbuhan tersebut terkena suhu dan tekanan tinggi. Suhu dan tekanan tinggi tersebut menyebabkan tumbuhan tersebut mengalami proses perubahan fisika dan kimiawi dan mengubah tumbuhan tersebut menjadi gambut dan kemudian batubara.

Pembentukan batubara dimulai sejak Carboniferous Period (Periode pembentukan carbon atau batubara) dikenal sebagai zaman batubara pertama yang berlangsung antara 360 juta sampai 290 juta tahun yang lalu.

Mutu dari setiap endapan batubara ditentukan oleh suhu dan tekanan serta lama waktu pembentukan, yang disebut sebagai “maturitas organik”. Proses awalnya gambut berubah menjadi lignite (batubara muda) atau “brown coal” (batubabara coklat) dengan jenis maturitas organik rendah. Dibandingkan dengan jenis batubara jenis lainnya, batubara muda agak lembut dan warnanya bervariasi dari hitam pekat sampai kecoklatan. Mendapat pengaruh suhu dan tekanan yang terus menerus selama jutaan tahun, batubara muda mengalami perubahan secara bertahap menambah maturitas organiknya dengan mengubah batubara muda menjadi batubara “sub-bituminus” . Perubahan kimia dan fisika terus berlangsung hingga batubara menjadi lebih keras dan warnanya lebih hitam dan membentuk “bituminus”. Dalam kondisi yang tepat, peningkatan maturitas organik yang semakin tinggi terus berlangsung hingga membentuk “antrasit”.

Variasi fisika dan kimia selama proses pembentukan batubara, dimana dengan adanya tekanan dan temperatur menyebabkan terjadi perubahan material organik dan mengakibatkan perubahan struktur kimia, perubahan ini berdasarkan penambahan kandungan karbon mengikuti

pengurangan air, oksigen dan hidrogen. Proses ini digambarkan pada gambar 3 berikut [7] :



Gambar 3. Proses pembentukan batubara (DAF = dry ash free)^[6]

C.3 Klasifikasi Batubara

Sistem klasifikasi batubara dibutuhkan karena batubara merupakan senyawa yang heterogen dengan sifat dan komposisi yang luas, ini dapat diindikasikan dalam proses pembentukan batubara dari lignite ke subbituminous, bituminous dan anthracite.

Sistem American Society for Testing and Materials (ASTM) mengklasifikasikan batubara berdasarkan peringkatnya menggunakan volatile matter (VM) and fixed carbon (FC) melalui analisa proximate

sebagai kriteria peringkat nilai kalor. Sistem Klasifikasi ini diberikan pada tabel 1 berikut :

Tabel.1. Klasifikasi batubara berdasarkan peringkat ^[6]

Class	Group	Fixed Carbon Limits, % (Dry, Mineral- Matter-Free Basis)		Volatile Matter Limits, % (Dry, Mineral- Matter-Free Basis)		Caloric Value Limits, Btu/lb (Moist, ^b Mineral-Matter- Free Basis)		Agglomerating Character
		Equal or Greater Than	Less Than	Greater Than	Equal or Less Than	Equal or Greater Than	Less Than	
I. Anthracitic	1. Meta-anthracite	98	-	-	2	-	-	} Nonagglomerating
	2. Anthracite	92	98	2	8	-	-	
	3. Semianthracite ^c	86	92	8	14	-	-	
II. Bituminous	1. Low volatile bituminous coal	78	86	14	22	-	-	} Commonly agglomerating ^c
	2. Medium volatile bituminous coal	69	78	22	31	-	-	
	3. High volatile A bituminous coal	-	69	31	-	14,000 ^d	-	
	4. High volatile B bituminous coal	-	-	-	-	13,000 ^d	14,000	
	5. High volatile C bituminous coal	-	-	-	-	11,500	13,000	
					10,500 ^e	11,500	} Agglomerating	
III. Subbituminous	1. Subbituminous A coal	-	-	-	-	10,500	11,500	} Nonagglomerating
	2. Subbituminous B coal	-	-	-	-	9,500	10,500	
	3. Subbituminous C coal	-	-	-	-	8,300	9,500	
IV. Lignitic	1. Lignite A	-	-	-	-	6,300	8,300	}
	2. Lignite B	-	-	-	-	-	6,300	

C.4 Komposisi Batubara

Komposisi batubara terbagi menjadi 2 yaitu komposisi fisika dan komposisi kimia, komposisi fisika terdiri dari kandungan air dan nilai kalor, sedangkan komposisi kimia antara lain : volatile matter, ash, Carbon, Hidrogen, Sulfur, Nitrogen dan oksigen.

Komposisi batubara dapat dianalisa berdasarkan 2 jenis analisa yaitu analisa proximate dan analisa ultimate. Contoh analisa ultimate dan proximate diberikan pada tabel 2

Tabel 2. Analisa proximate dan ultimate^[6]

Proximate Analysis		Ultimate Analysis	
Component	% by wt	Component	% by wt
Moisture	2.5	Moisture	2.5
Volatile matter	37.6	Carbon	75.0
Fixed carbon	52.9	Hydrogen	5.0
Ash	7.0	Sulfur	2.3
Total	100.0	Nitrogen	1.5
		Oxygen	6.7
Heating value, Btu/lb	13,000	Ash	7.0
(kJ/kg)	(30,238)	Total	100.0

C.3 Klasifikasi Batubara di PT Indofood CBP, Tbk Cabang Makassar

Adapun klasifikasi batubara yang digunakan PT.Indofood Cabang Makassar adalah batubara produksi rakyat dari Kecamatan Malawa Kabupaten Bone Propensi Sulawesi Selatan, yang dibawa ke Makassar dengan truk, jaraknya kurang lebih 100 km dari Makassar. Batubara ini termasuk dalam klasifikasi batubara lignit karena kandungan Fixed Karbon yang rendah sekitar 37.1 % wt, dan Nilai Kalor Atas (Gross Calorific Value) adalah 6.239 kcal/kg. Hasil pengujian Laboratorium Sucofindo Cabang Makassar tanggal 4 Januari 2013, berdasarkan uji Proksimasi didapatkan :

Parameter	Unit	Test Results
. Total Moisture	% wt	12.5
. Ash Content	% wt	10.9
. Volatile Matter	% wt	42.8
. Fixed Carbon	% wt	37.1
. Total Sulfur	% wt	3.10
. Gross Calorific Value	kcal/kg	6.239

D. Jambu Mete

Potensi jambu mete di Indonesia sangat besar. Produksi jambu mete dari tahun ke tahun mengalami peningkatan. Pada tahun 1999 produksi jambu mete mencapai 88.658 ton gelondong, dan pada tahun 2002 meningkat menjadi 94.439 ton (BPS,2002). Produksi ini akan terus meningkat, mengingat Direktorat Jenderal Bina Produksi Perkebunan telah melaksanakan berbagai program untuk memacu perluasan dan peningkatan produksi jambu mete, khususnya di Kawasan Timur Indonesia. Tanaman jambu mete memiliki keunggulan karena dapat dikembangkan pada daerah yang memiliki kondisi agroekologi marginal dan beriklim kering, sehingga merupakan komodita andalan di Kawasan Timur Indonesia seperti Sulawesi Tenggara, Nusa Tenggara Barat dan Nusa Tenggara Timur.

Cangkang Biji Jambu Mete

Biji jambu mete terdiri dari 70 % kulit biji dan 30% daging biji. Dan dalam kulit biji (shell) mengandung minyak sekitar 50% yang terdiri dari 80,9% asam anakardat, dan 13,78% fenol yang biasa disebut kardol, 1,59% kardanol dan 2,64% 2 metil kardol. Dalam istilah perdagangan. Minyak kulit biji mete dikenal sebagai minyak laka atau *Cashew nut shell liquid* (CNSL).

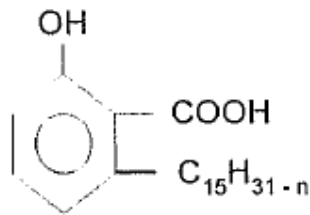
Asam anakardat merupakan asam salisilat yang telah mengalami substitusi memiliki sifat termolabil, dan akan terdekomposisi menjadi kardanol dan CO₂ akibat pengaruh pemanasan. Sifat-sifat asam anakardat antara lain :

- memiliki rumus molekul C₁₈H₂₃O₃ ,
- nilai kalor 5856,13 kal/g,
- memiliki kandungan Carbon 21,45%
- memiliki kadar air 4,11%
- spgr 1,009
- pH 4,3
- kadar abu 1,05%
- bilangan lod 206

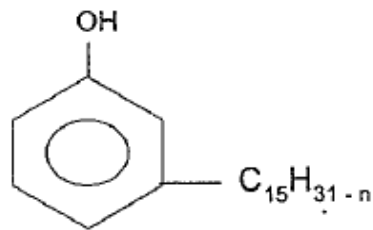
Struktur kimia komponen-komponen utama penyusun CNSL

adalah sebagai berikut :

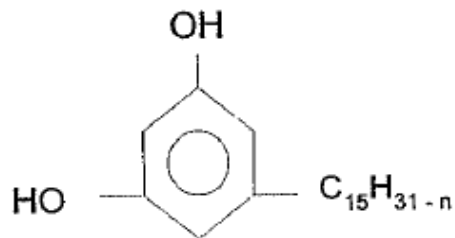
1. Asam anakardat (suatu asam salisilat yang telah mengalami substitusi)



2. Kardanol (fenol yang telah mengalami substitusi pada posisi meta)



3. Kardol (Resolsinol yang telah mengalami substitusi) [9]



E. Potensi Slagging dan Fouling

Mineral-mineral dalam batubara atau Partikel abu/ash pada batubara merupakan sumber deposit pada proses slagging dan fouling di boiler, mineral-mineral ini dibagi menjadi beberapa group antara lain clay mineral (aluminosilicates), sulfides/sulfates, carbonates, chlorides, silica/silicates and oxides. Mineral-mineral ini ditunjukkan dalam tabel 3 berikut :

Tabel 3 Mineral-mineral batubara

Common Minerals Found in Coal	
Clay minerals:	
Montmorillonite	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Illite	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$
Kaolinite	$\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
Sulfide minerals:	
Pyrite	FeS_2
Marcasite	FeS_2
Sulfate minerals:	
Gypsum	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Anhydrite	CaSO_4
Jarosite	$(\text{Na}, \text{K})\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
Carbonate minerals:	
Calcite	CaCO_3
Dolomite	$(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$
Siderite	FeCO_3
Ankerite	$(\text{Ca}, \text{Fe}, \text{Mg})\text{CO}_3$
Chloride minerals:	
Halite	NaCl
Sylvite	KCl
Silicate minerals:	
Quartz	SiO_2
Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
Orthoclase	KAlSi_3O_8
Oxide minerals:	
Hematite	Fe_2O_3
Magnetite	Fe_3O_4
Rutile	TiO_2

Pada batubara lignite nilai yang tinggi adalah logam-logam alkali yaitu Calcium, Magnesium dan Natrium/Sodium yang terkandung di dalam ash content. Selama pembakaran, ash content terkena temperatur tinggi hingga 1649°C sehingga logam – logam alkali terdekomposisi dari senyawa ash content serta mengalami proses pendinginan. Pada zona pembakaran dengan temperatur tinggi terjadi oksidasi dan reduksi yang kuat sehingga mineral-mineral yang terkandung di dalam ash bereaksi satu sama lain serta bereaksi dengan kandungan organik dan anorganik batubara serta dengan gas-gas hasil pembakaran seperti SO_2 . Senyawa-senyawa yang terbentuk oleh interaksi material-material inilah yang menyebabkan permasalahan deposition/endapan.

Endapan yang terbentuk pada ruang bakar (slagging) akan menyebabkan energi radiasi dari ruang bakar menuju pipa air berkurang dan endapan yang terbentuk dalam pipa api (fouling) mengakibatkan temperatur keluar pipa api masih cukup tinggi akibat endapan yang menempel di pipa api yang menghambat transfer temperatur dari pipa api ke pipa air. Fenomena berkurangnya energi radiasi ke pipa air dan terhambatnya transfer panas dari pipa api ke pipa air menurunkan kualitas uap yang dihasilkan [6].

E.1 Slagging

Slagging adalah fenomena menempelnya lelehan partikel abu pada dinding ruang bakar akibat terdekomposisinya senyawa alkali (ash content) yang terkandung di dalam batubara pada temperatur ruang bakar yang lebih tinggi dari temperatur leleh abu.

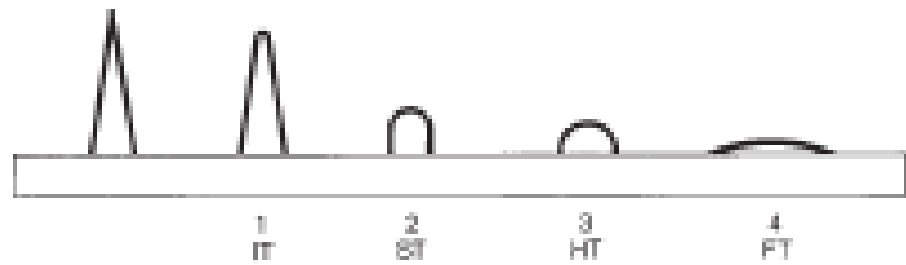
Temperatur Leleh Abu/Fusibility Ash Temperature

Klasifikasi batubara dibedakan terutama pada kandungan carbon dan nilai kalor dari batubara. Klasifikasi ini adalah : Antrasit, Bituminous, Subbituminous dan Lignit.

Perbedaan carbon dan nilai kalor dari klasifikasi batubara ini menyebabkan fusibility ash temperature berbeda. Makin tinggi kandungan karbon dan nilai kalor dari klasifikasi batubara makin tinggi pula fusibility ash temperature batubara tersebut. Yang tertinggi adalah batubara antrasit, kemudian bituminous, subbituminous dan yang paling memiliki fusibility ash temperature rendah adalah batubara lignit. Selama proses pembakaran, partikel ash dihadapkan dengan ketinggian temperatur sekitar 3000 °F (1649 °C). Di zona burner, temperatur bervariasi dari highly oxidizing sampai highly reducing. Ada empat temperatur deformasi yang terdapat pada ash batubara, Babcock & Wilcox (2005) :

1. Initial deformation temperature (IT or ID)
Dimana bentuk dari ash pada permukaan dinding menyerupai bentuk piramid. Untuk batubara lignit : IT = 1.975 °F (Reducing) dan 2.070 °F (Oxidizing). Temperatur deformasi awal.
2. Softening temperature (ST)
Dimana bentuk ash dari piramid menjadi spherical shape. Dimana tinggi spherical (H) sama dengan width (W), jadi $H = W$. Batubara lignit : ST=2.130 °F (Reducing) dan 2.190 °F (Oxidizing). Ini adalah temperature pelunakan
3. Hemispherical temperature (HT):
lignit : HT = 2.150 °F (Reducing) dan 2.210 °F (Oxidizing). Ini adalah temperature pelunakan
4. Fluid temperature (FT) :
Temperatur ini menyebabkan ash yang berbentuk hemispherical mencair dan membentuk lapisan yang hampir rata, dengan ketinggian maksimum 1.59 mm. Batubara lignit. FT = 2.240 °F (Reducing) dan 2.290 °F (Oxidizing).

Gambar.4 menunjukkan perubahan bentuk dari ash akibat dari temperature pembakaran dalam ketel.



Gambar 4. Bentuk spesifik ash dan perubahan bentuk akibat dari temperatur pembakaran^[6]

Gambar 5 berikut menunjukkan bentuk endapan yang terjadi di ruang bakar (slagging).



Gambar 5 Slagging pada ruang bakar

E.2 Fouling

Fouling adalah fenomena menempel dan menumpuknya abu terbang (fly ash) yang terbawa pada gas hasil pembakaran pada bagian dalam pipa api akibat adanya penurunan temperatur.

Karena pada batubara lignite kandungan mineral yang tinggi adalah logam-logam alkali, maka klasifikasi fouling untuk ash adalah berdasarkan kandungan sodium dalam ash.

Fouling menyebabkan temperatur di dalam pipa api sulit untuk ditransfer ke pipa air, sehingga nilai temperatur gas keluar pipa api masih cukup tinggi [6].

Gambar 6 berikut menunjukkan bentuk endapan yang terjadi di dalam pipa air (fouling).



Gambar 6. Fouling di dalam pipa api

E.3 Klasifikasi Ash/Abu

Kajian pembentukan slagging dan fouling dari ash batubara ditentukan berdasarkan ketentuan dari pustaka Steam its generation and use, Edisi 41, Babcock & Wicox 2005 Bab 21.

Ash batubara terdiri dari beberapa komposisi berdasarkan hasil analisis ash dalam persen berat : SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 , P_2O_3 .

a. Klasifikasi batubara bituminous bila kandungan ash batubara :

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{CaO} + \text{MgO}$$

Klasifikasi batubara lignit bila kandungan ash batubara

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 < \text{CaO} + \text{MgO}$$

b. Slaging Indek : Lignit ash (R_s^*) :

$$R_s^* = [(\text{Max HT}) + 4 (\text{Min IT})]/4$$

Klasifikasi potensial slaging dengan menggunakan R_s^* sebagaiberikut :

$$2450 < R_s^* \quad = \text{low}$$

$$2250 < R_s^* < 2450 \quad = \text{medium}$$

$$2100 < R_s^* < 2250 \quad = \text{high}$$

$$R_s^* < 2100 \quad = \text{severe}$$

c. Slaging Index – rasio asam dan persen berat dry basis Sulfur

Perhitungan berdasarkan base untuk rasio asam dan persen berat pada dry basis dari Sulfur dalam batubara maka indeks slagging (R_s^*) dihitung dengan :

$$R_s = \left(\frac{B}{A} \right) \times S$$

Dimana :

B = $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$

A = $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$

S = Persentase berat Sulfur pada dry basis batubara

Klasifikasi potensial slagging menggunakan R_s adalah :

$R_s < 0,6$ = rendah

$0,6 < R_s < 2,0$ = sedang

$2,0 < R_s < 2,6$ = tinggi

$2,6 < R_s$ = sangat tinggi

d. Fouling index – lignit ash

Klasifikasi fouling dari ash batubara lignit ditentukan oleh kandungan sodium (Na_2O) dalam ash, penentuannya sebagai berikut :

- Bila $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 20\%$ berdasarkan berat ash

$\text{Na}_2\text{O} < 3$ = rendah - sedang

$3.0 < \text{Na}_2\text{O} < 6$ = tinggi

$\text{Na}_2\text{O} > 6$ = tinggi sekali

- Bila $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 < 20\%$ berdasarkan berat ash

$\text{Na}_2\text{O} < 1.2$ = rendah - sedang

$1.2 < \text{Na}_2\text{O} < 3$ = tinggi

$\text{Na}_2\text{O} > 3$ = tinggi sekali

Dari uraian diatas maka slaging dan fouling yang disebabkan oleh ash batubara dapat diketahui untuk bahan bakar batubara yang digunakan di PT. Indofood CBP, Tbk Cabang Makassar, bila ash batubara ini diuji di Laboratorium.

e. Fouling Factor, R_f pada sisi air

Fouling factor R_f yang oleh diakibatkan oleh air pada permukaan luar pipa api, tergantung pada temperatur operasi. Persamaan dari fouling factor, Incropera, et al (1996).

$$R_f = 1/U_{\text{dirty}} - 1/U_{\text{clean}}$$

Beberapa harga R_f dapat dilihat pada tabel buku perpindahan panas [6].

F. Spesifikasi Bahan Bakar yang Digunakan untuk Ketel Pipa Api Stocker Thompson Triumph MK 4

Karakteristik batubara yang mempengaruhi output dan efisiensi maksimum pembakaran menggunakan batubara Pea grade A atau batubara yang memiliki nilai kalori berkisar 6573 kcal/kg – 6812 kcal/kg adalah sebagai berikut :

1. Nilai Kalori dan Kadar Abu/Ash Content
2. Volatile Content dan pengapian/ignition
3. Ukuran batubara dan pemisahan/segregation
4. Ash Fusion Temperature
5. Moisture Content
6. Ketebalan bahan bakar di atas chanin grate
7. Unsur-unsur kimia sebagai unsur penelusuran

1. Nilai Kalori dan Ash Content

Nilai kalori batubara biasanya dinyatakan dalam air-dried basis/basis kering. Grade Batubara Gauteng adalah sebagai berikut :

- Grade A 27,5 – 28,5 MJ/kg atau 6573 kcal/kg - 6812 kcal/kg
- Grade B 26,5 – 27,5 MJ/kg atau 6334 kcal/kg – 6573 kcal/kg
- Grade C 25,5 – 26,5 MJ/kg atau 6095 kcal/kg – 6334 kcal/kg
- Grade D dibawah 25,5 MJ/kg atau dibawah 6095 kcal/kg

Nilai kalori dan ash content batubara terkait erat. Jika ash content naik maka nilai kalor akan jatuh/turun. Meningkatnya ash content akan menambah jumlah carbon yang tak terbakar / unburned carbon karena peningkatan ash content mengurangi temperatur pembakaran sehingga sulit bagi udara pembakaran untuk mencapai/membakar carbon yang tidak terbakar.

2. Volatile Content dan Ignation/Pembakaran

Batubara memiliki temperatur penyalaan/ignition temperature sekitar 400°C sementara volatile content terlepas/menguap pada temperatur berkisar 150°C. Setelah dipanaskan secara radiasi, volatile yang telah lepas bercampur dengan udara pembakaran untuk proses pembakaran di atas chain grate.

Campuran volatile content dan udara pembakaran ini menambah keturbulenan gas dan turun menuju batubara yang akan dibakar dan menambah efek pembakaran di atas chain grate dan menambah/menaikkan temperatur pembakaran. Bila volatile content rendah perambatan api menuju batubara sulit terjadi. Kualitas volatile content batubara minimal 23%.

3. Ukuran batubara dan pemisahan/segregation

Ketebalan batubara di atas chain grate tergantung pada tipe batubara dan ukurannya. Normalnya ketebalan batubara di atas chain grate mencapai 6 – 8 kali dari ukuran batubara. Ukuran maksimum

partikel batubara yang tidak melalui proses pencucian adalah 150-200 mm.

4. Temperatur peleburan Abu/Ash Fussion Temperature

Temperatur peleburan abu mengikuti range :

$$1280^{\circ}\text{C} < \text{TPA} < 1400^{\circ}\text{C}$$

5. Moisture Content

Moisture Content membantu pengikatan partikel halus agar bisa tetap pada chain grate untuk proses pembakaran dan membantu radiasi transfer panas. Kandungan moisture untuk pembakaran dibatasi bernilai 8%.

6. Ketebalan bahan bakar di atas chain grate

Ketebalan bahan bakar di atas chain grate untuk bahan bakar yang tidak dicuci adalah 4 – 6 kali dari ukuran partikel batubara (100 – 150 mm) sedangkan untuk bahan bakar yang dicuci adalah 6 – 8 kali dari ukuran partikel batubara (150 – 200 mm).

7. Unsur-unsur kimia sebagai unsur penelusuran

Ada empat unsur kimia pada batubara yang mempengaruhi pengoperasian ketel, unsur tersebut adalah sebagai berikut :

1. Chlorine
2. Phosphorus
3. Sulphur
4. Iron (didalam ash/abu)

Range impuritis batubara terlihat pada tabel 4 berikut

Tabel 4. Range impuritis batubara^[1]

Impuritis batubara	Range		
	Tinggi	Sedang	Rendah
Chlorine	>0,3	0,15 – 0,3	<0,15
Phosphorus	>0,1	0,03 – 0,1	<0,03
Sulphur	>1,8	1,3 – 1,8	<1,3
Iron (didalam ash/abu)	>8,0	4,0 – 8,0	<4,0

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat

Waktu penelitian dilaksanakan pada bulan Januari – Pebruari 2013 bertempat di PT. Indofood CBP Sukses Makmur, Tbk Cabang Makassar.

B. Prosedur Peneitian

B.1 Studi Kepustakaan

Studi kepustakaan dilakukan dengan mempelajari serta mengutip teori dan data dari referensi yang berkaitan dengan proses pembakaran dan prestasi kerja ketel uap pipa api.

B. 2 Pengambilan Data

Dengan mencatat data-data teknis berkaitan dengan operasional ketel pipa api di PT. Indofood CBP Sukses Makmur, Tbk Cabang Makassar serta data yang menyangkut komposisi bahan bakar, data kesetimbangan energi seperti temperatur, tekanan, laju alir massa air umpan ketel serta data dimensi ketel uap pipa api .

Data yang dimaksud diantaranya adalah :

a. Data sifat-sifat bahan bakar batubara lignite Mallowa dan cangkang

biji jambu mete:

Analisa ultimate

- Carbon (C)
- Hydrogen (H₂)
- Sulfur (S)
- Oksigen (O₂)
- Nitrogen (N₂)
- Water (H₂O)
- Ash :

Analisa proximate

- Moisture
- Volatiles
- Fixed Carbon
- Ash

Higher heating value (HHV)

Data analisis ash/abu

No	Senyawa Kimia	Presentasi (%)
1	TiO ₂ (Titanium Dioksida)	
2	SiO ₂ (Silika Dioksida)	
3	Al ₂ O ₃ (Aluminium Oksida)	
4	Fe ₂ O ₃ (Iron Oksida)	
5	CaO (Kalsium Oksida)	
6	MgO (Kalsium Oksida)	
7	K ₂ O (Kalium Oksida)	
8	Na ₂ O (Sodium Oksida)	

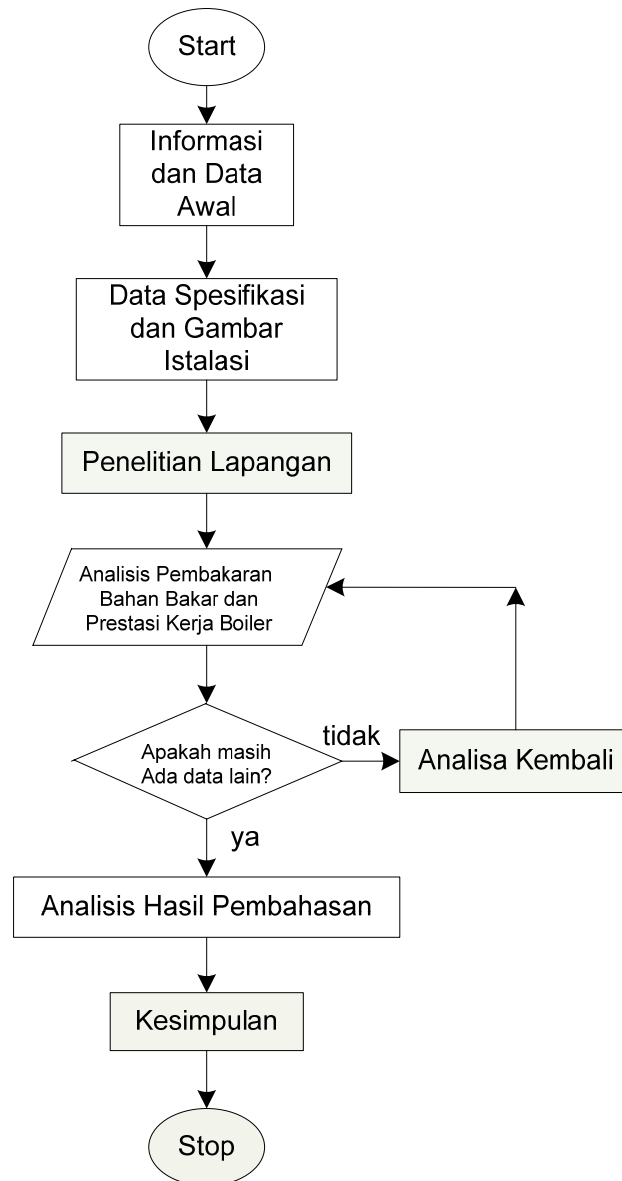
- b. Data – data teknis ketel uap PT. Indofood CBP Sukses Makmur, Tbk Makassar.
- a. Temperatur uap/steam
 - b. Tekanan uap/steam
 - c. Laju alir uap/steam
 - d. Temperatur air umpan
 - e. Temperatur gas keluar pipa api
 - f. Excess air/udara berlebih
 - g. Jumlah carbon yang tidak terbakar/unburned carbon loss
 - h. Luas furnace

C. Pengolahan Data

Pengolahan data berupa perhitungan dilakukan dengan langkah-langkah berikut :

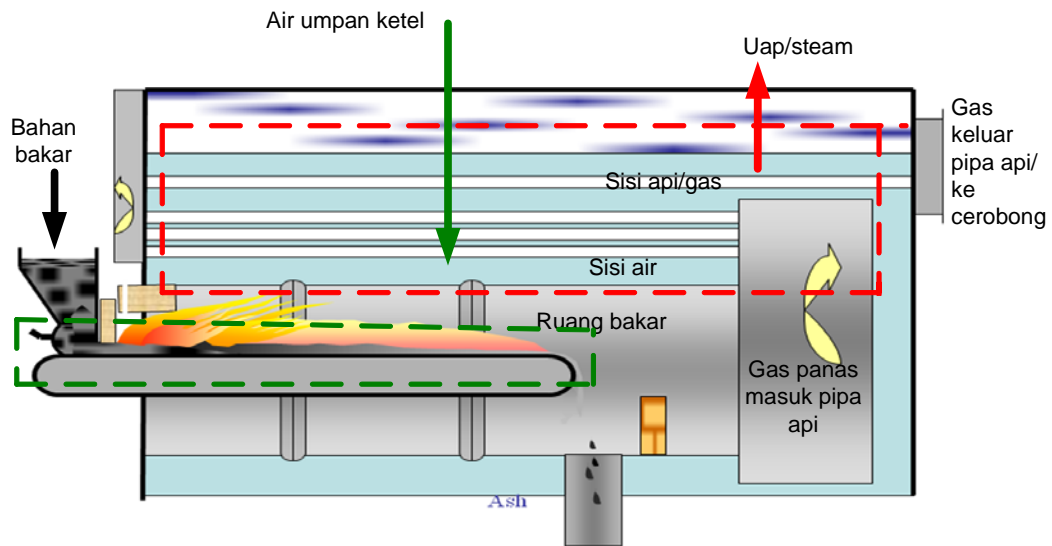
- Menghitung konversi analisa proximate ke analisa ultimate dan menghitung nilai analisa proximate dan ultimate serta data-nilai kalor dari pencampuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete berdasarkan persentase berat pencampurannya.
- Menghitung prestasi kerja ketel uap pipa api bila bahan bakar yang digunakan batubara lignit serta bila berbahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete menggunakan metode BTU
- Menghitung kesetimbangan energi
- Menganalisa potensi terjadinya slagging dan fouling pada ketel uap pipa api bila menggunakan bahan bakar batubara lignit dan bila menggunakan campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete.

D. Diagram Alir Penelitian



E. Proses pembakaran dan produksi steam

Proses pembakaran dan produksi steam di PT. Indofood CBP Tbk, Cabang Makassar menggunakan ketel pipa api terlihat pada gambar 7 berikut :



Gambar 7. Proses pembakaran dan produksi steam^[5]

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. HASIL

Bahan bakar yang digunakan oleh ketel uap PT. Indoofood CBPSukses Makmur, Tbk Cabang Makassar adalah batubara lignit dari Kecamatan Mallawa Kabupaten Bone Sulawesi Selatan sedangkan cangkang biji jambu mete dari Kabupaten Bone Sulawesi selatan. Sebelum dipakai pada proses pembakaran di ketel uap, batubara ini diuji terlebih dahulu di Sucofindo Makassar.

A.1 Hasil dan Analisa Perhitungan Ketel Uap Untuk Pemakaian 04 Januari 2013 (Kondisi bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete sebelum ketel uap dibersihkan)

Data Sifat-sifat Bahan Bakar

Data di bawah ini merupakan hasil uji campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete yang dipakai pada tanggal 04 Januari 2013. Hasil uji batubara lignit dilakukan di Sucofindo Makassar pada tanggal 04 Januari 2013 (sertifikat hasil analisa dari sucofindo ada pada lampiran 1), sedangkan analisa cangkang biji jambu mete didapatkan dari hasil pengujian dengan alamat web site www.anupinindustries.net/cashew-net-shell-cake.html tahun 2010.

Sifat-sifat batubara lignit :

Analisa proximate :

- Moisture : 9,20 %
- Volatiles : 42,80 %
- Fixed Carbon : 37,10 %
- Ash : 10,90 %

Higher heating value (HHV) : 11.230 Btu/lb : 24.141 kJ/kg

Analisa ultimate didapatkan dengan mengkonversi nilai analisa proximate (perhitungan dapat dilihat pada lampiran 4), hasil perhitungan adalah sebagai berikut :

Analisa ultimate :

- Carbon (C) : 65,55 %
- Hydrogen (H₂) : 4,94 %
- Sulfur (S) : 3,10 %
- Oksigen (O₂) : 5,20 %
- Nitrogen (N₂) : 1,16 %
- Water (H₂O) : 9,20 %
- Ash : 10,90 % :

Data analisis ash/abu batubara lignit:

Komposisi kimia abu batubara di bawah ini merupakan hasil analisa yang dilakukan di Sucofindo pada tanggal 17 Mei 2013 (sertifikat hasil analisa dari sucofindo ada pada lampiran 3).

Tabel 5. Komposisi kimia abu batubara lignit
(analisa sucofindo tanggal 17 Mei 2013)

No	Senyawa Kimia	Presentasi (%)
1	TiO ₂ (Titanium Dioksida)	0,97
2	SiO ₂ (Silika Dioksida)	41,07
3	Al ₂ O ₃ (Aluminium Oksida)	25,27
4	Fe ₂ O ₃ (Iron Oksida)	24,50
5	CaO (Kalsium Oksida)	3,48
6	MgO (Kalsium Oksida)	1,32
7	K ₂ O (Kalium Oksida)	1,10
8	Na ₂ O (Sodium Oksida)	0,34

Klasifikasi ash batubara PT. Indofood CBP Sukses Makmur Tbk Cabang Makassar adalah ash bituminous karena :



$$24,50\% > 3,48\% + 1,32\%$$

$$24,50\% > 4,80\%$$

Sifat-sifat cangkang biji jambu mete :

Data di bawah ini merupakan hasil uji cangkang biji jambu mete yang

Analisa ultimate :

- Carbon (C) : 46,08 %
- Hydrogen (H₂) : 3,88 %
- Sulfur (S) : Traces
- Oksigen (O₂) : 38,98 %
- Nitrogen (N₂) : 0,21 %
- Water (H₂O) : 8,85 %
- Ash : 2,0 % :

Analisa proximate :

- Moisture : 8,85 %
- Volatiles : 68,03 %
- Fixed Carbon : 21,12 %
- Ash : 2,00 %

Higher heating value (HHV) : 9.101 Btu/lb

Data analisis ash/abu cangkang biji jambu mete :

Komposisi kimia abu cangkang biji jambu mete di bawah ini juga merupakan hasil uji cangkang biji jambu mete yang didapatkan dari hasil pengujian dengan alamat web site www.anupinindustries.net/cashew-net-shell-cake.html tahun 2010.

Tabel 6. Komposisi kimia abu cangkang biji jambu mete^[2]

No	Senyawa Kimia	Presentasi (%)
1	TiO ₂ (Titanium Dioksida)	4,02
2	SiO ₂ (Silika Dioksida)	61,83
3	Al ₂ O ₃ (Aluminium Oksida)	1,99
4	Fe ₂ O ₃ (Iron Oksida)	3,99
5	CaO (Kalsium Oksida)	25,64
6	MgO (Kalsium Oksida)	1,88
7	K ₂ O (Kalium Oksida)	0,00
8	Na ₂ O (Sodium Oksida)	0,65

Klasifikasi ash cangkang biji jambu mete PT. Indofood CBP Sukses

Makmur Tbk Cabang Makassar adalah ash lignite karena :



$$3,99\% < 25,64\% + 1,88\%$$

$$3,99\% < 27,54\%$$

Perhitungan analisa proximate dan ultimate campuran 60% batubara dan 40% cangkang biji jambu mete pada tabel 7

Perhitungan ultimate 60% batubara dan 40% cangkang biji jambu mete

Karena menggunakan 60% batubara dan 40% cangkang biji jambu mete, maka perhitungan ultimate komposisi bahan bakar untuk batubara dan cangkang biji jambu mete juga dihitung berdasarkan persentase berat masing-masing bahan bakar sebagai berikut :

$$\begin{aligned}C &= (60\% \times C \text{ batubara}) + (40\% \times C \text{ cangkang biji jambu mete}) \\ &= (60\% \times 65,55) + (40\% \times 46,08) \\ &= 57,76\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}N_2 &= (60\% \times N_2 \text{ batubara}) + (40\% \times N_2 \text{ cangkang biji jambu mete}) \\ &= (60\% \times 1,16) + (40\% \times 0,21) \\ &= 0,78\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}H_2 &= (60\% \times H_2 \text{ batubara}) + (40\% \times H_2 \text{ cangkang biji jambu mete}) \\ &= (60\% \times 4,94) + (40\% \times 3,88) \\ &= 4,52\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}O_2 &= (60\% \times O_2 \text{ batubara}) + (40\% \times O_2 \text{ cangkang biji jambu mete}) \\ &= (60\% \times 5,55) + (40\% \times 38,98) \\ &= 18,92\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{HHV} &= (60\% \times \text{HHV batubara}) + (40\% \times \text{HHV cangkang biji jambu mete}) \\
 &= (60\% \times 6.239 \text{ kcal/kg}) + (40\% \times 5.056 \text{ kcal/kg}) \\
 &= 5.766 \text{ kcal/kg} \\
 &= 10.379 \text{ btu/lb} \\
 &= 24.141 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

Perhitungan proximate 60% batubara dan 40% cangkang biji jambu mete

Karena menggunakan 60% batubara dan 40% cangkang biji jambu mete, maka perhitungan proximate komposisi bahan bakar untuk batubara dan cangkang biji jambu mete jugadihitung berdasarkan persentase berat masing-masing bahan bakar sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 \text{S} &= (60\% \times \text{S batubara}) + (40\% \times \text{S cangkang biji jambu mete}) \\
 &= (60\% \times 3,10) + (40\% \times 0) \\
 &= 1,86
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Ash} &= (60\% \times \text{Ash batubara}) + (40\% \times \text{Ash cangkang biji jambu mete}) \\
 &= (60\% \times 10,90) + (40\% \times 2) \\
 &= 7,34
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Moisture} &= (60\% \times \text{Moisture batubara}) + (40\% \times \text{Moisture cangkang biji jambu mete}) \\
 &= (60\% \times 8,80) + (40\% \times 8,85) \\
 &= 8,82
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Volatile} &= (60\% \times \text{Volatile batubara}) + (40\% \times \text{Volatile cangkang biji jambu mete}) \\
 &= (60\% \times 42,80) + (40\% \times 68,03) \\
 &= 52,89
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Fixed Carbon, FC} &= (60\% \times \text{FC batubara}) + (40\% \times \text{FC cangkang biji jambu mete}) \\
 &= (60\% \times 37,10) + (40\% \times 21,12) \\
 &= 30,71
 \end{aligned}$$

Data-data Teknis Ketel Uap

Data-data teknis ketel uap di PT. Indoofood CBP Sukses Makmur, Tbk Cabang Makassar di bawah ini didapatkan dengan melihat kondisi proses pada control panel ketel uap, buku manual ketel uap serta catatan pada laporan harian ketel uap yang ada di PT. Indoofood CBP Sukses Makmur, Tbk Cabang Makassar.

Dengan bahan bakar 60% batubara dan 40% cangkang biji jambu mete

- Temperatur uap/steam : 162°C = 324°F
- Tekanan uap/steam : 561 kPa
- Laju alir uap/steam : 5.750 kg/h
- Temperatur air umpan : 81°C = 177°F
- Tekanan air umpan : 0,49 bar
- Laju alir air umpan : 5.750 kg/h
- Temperatur gas keluar pipa api : 208°C = 406°F
- Excess air/udara berlebih : 26%
- Jumlah carbon yang tidak terbakar : 0,14%
- Luas furnace : 851,61 ft²

Perhitungan Kesenjangan Energi

Perhitungan prestasi kerja ketel uap menggunakan Metode BTU

Kondisi operasi ketel uap dan sifat bahan bakar menggunakan campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete menggunakan metode BTU diberikan pada tabel 7 berikut :

Table 7			
Kondisi operasi			
<i>Bahan bakar: batubara lignit, Mallawa + cangkang biji jambu mete</i>			
Ultimate, % by wt		Proximate, % by wt	
C	57,76	Moisture	8,82
H2	4,52	Volatiles	52,89
S	1,86	Fixed carbon	30,71
O2	18,92	Ash	7,34
N2	0,78		100
H2O	8,82		
Ash	7,34		
	100		
Higher heating value (HHV) :		10.379 Btu/lb	
Excess air		26,0 % by wt	
Unburned carbon loss		0,14 % by wt	
Unaccounted loss		1,5 % by wt	
ABMA radiation loss (see Chapter 22)		0,4 % by wt	
Furnace exit gas temperature		1.540 F	

Perhitungan Prestasi Kerja Ketel Uap Pipa Api Menggunakan Bahan Bakar 60% Batubara dan 40% Cangkang Biji Jambu Mete menggunakan Metode BTU

Prestasi kerja ketel uap dan sifat bahan bakar menggunakan cangkang biji jambu mete untuk perhitungan menggunakan metode BTU diberikan pada tabel 8 berikut :

Data tabel 8 BTU, no 10 / Laju steam, didapatkan dengan cara sebagai berikut :

$$P_{\text{steam}} = 5,61 \text{ bar}$$

$$= 561 \text{ kPa}$$

$$T_{\text{steam}} = 162^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Entalpi steam} = h_s = 2.760 \text{ kJ/kg}$$

$$P_{\text{air umpan ketel (l)}} = 0,49 \text{ bar}$$

$$T_{\text{air umpan ketel (l)}} = 81^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Entalpi air umpan ketel} = h_l = 339,1 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Laju massa steam (m}_s\text{)} = 5.750 \text{ kg/h}$$

$$\begin{aligned} \text{Laju steam [10] BTU Method} &= m_s \times (h_s - h_l) \\ &= 5.750 \text{ kg/h} \times (2.760 - 339,1) \text{ kJ/kg} \\ &= 13,920 \times 10^6 \text{ kJ/h} \\ &= 13.196 \times 10^6 \text{ Btu/h} \end{aligned}$$

Data tabel 8 BTU, no 61 / Temperatur adiabatik pembakaran, didapatkan dengan cara sebagai berikut :

Temperatur adiabatik pembakaran/adiabatic flame temperature didapatkan dari gambar 3 bab 10 BabCock & Wilcox, steam

Pada tabel 8 BTU Method, no 60= 876,5 Btu/lb dan pada tabel 8 BTU

Method, no 36 = 5,89% didapatkan didapatkan temperatur adiabatik

$$\text{pembakaran} = 2.810 \text{ }^{\circ}\text{F} = 1.543 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Temperatur gas keluar dapur/Furnace exit gas temperatur pada tabel 7
(kondisi operasi/operating conditions) didapatkan dengan cara sebagai
berikut :

$$\begin{aligned} \text{HHR} &= \frac{\text{Heat available no 60 tabel 8 BTU method} \times \text{gas mass flowrate no 56 tabel 8 BTU method}}{\text{flat projected area} \times \text{effectiveness factor}} \\ &= \frac{876,5 \text{ Btu/lb} \times 15.700 \text{ lb/h}}{851,61 \text{ ft}^2 \times 1} \\ &= 16.159 \frac{\text{Btu}}{\text{h ft}^2} \end{aligned}$$

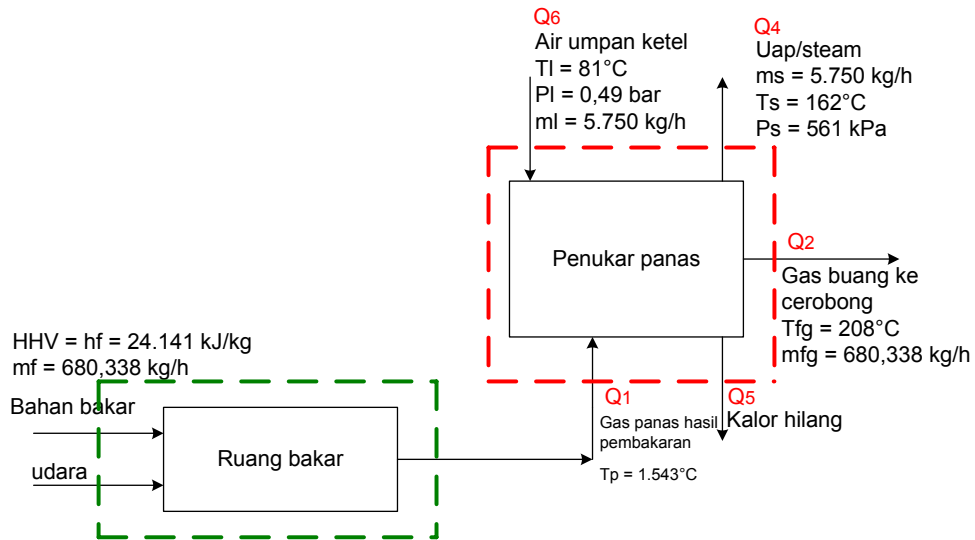
Menggunakan gambar 34 bab 4 BabCock & Wilcox dengan nilai HHR

16.159 Btu/h ft²

didapatkan nilai Temperatur gas keluar dapur = 1.540 °F

= 838 °C

Perhitungan kesetimbangan energi [10]



Laju alir bahan bakar (m_f), didapat dari tabel 8 Metode BTU no 55 = 1500

lb/h = 680,338 kg/h

$$\begin{aligned}
 Q_1 \text{ (Hot product)} &= m_f \times \text{HHV} \\
 &= 680,338 \text{ kg/h} \times 24.141 \text{ kJ/h} \\
 &= 16,424 \times 10^6 \text{ kJ/h}
 \end{aligned}$$

Menggunakan gambar 9 bab 22 BabCock & Wilcox dengan nilai moisture in flue gas 5,89%(no 36 pada tabel 8 BTU Method) $T_{fg} + T_{udara} = 208^\circ\text{C} +$

$27^\circ\text{C} = 235^\circ\text{C} = 487^\circ\text{F}$ didapatkan nilai $C_{p_{fg}} = 0,25 \text{ Btu/lb}^\circ\text{F} = 0,25$

kcal/kg $^\circ\text{C}$

maka :

$$\begin{aligned}
 Q_2 \text{ (flue gas)} &= m_{fg} \times c_{p_{fg}} \times \Delta T \\
 &= 680,338 \text{ kg/h} \times 0,25 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \times (208 - 27)^\circ\text{C} \\
 &= 30.785 \text{ kcal/h} \\
 &= 0,128 \times 10^6 \text{ kJ/h}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_3 \text{ (kalor yang dimanfaatkan)} &= Q_1 - Q_2 \\
 &= 16,424 \times 10^6 \text{ kJ/h} - 0,128 \times 10^6 \text{ kJ/h} \\
 &= 16,296 \times 10^6 \text{ kJ/h}
 \end{aligned}$$

Entalpi steam (h_s) pada temperatur 162°C dan tekanan 561 kPa adalah 2.760 kJ/kg

$$\begin{aligned}
 Q_4 \text{ (steam yang dibangkitkan)} &= m_s \times h_s \\
 &= 5.750 \text{ kg/h} \times 2.760 \text{ kJ/kg} \\
 &= 15,870 \times 10^6 \text{ kJ/h}
 \end{aligned}$$

Entalpi air umpan ketel (h_l) pada temperatur 81°C dan tekanan 0,49 bar adalah 339,1 kJ/kg

$$\begin{aligned}
 Q_6 \text{ (air umpan ketel)} &= m_l \times h_l \\
 &= 5.750 \text{ kg/h} \times 339,1 \text{ kJ/kg} \\
 &= 1,949 \times 10^6 \text{ kJ/h}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_5 \text{ (losses)} &= Q_3 - (Q_4 - Q_6) \\
 &= 16,296 \times 10^6 \text{ kJ/h} - (15,870 \times 10^6 \text{ kJ/h} - 1,949 \times 10^6 \text{ kJ/h}) \\
 &= 2,375 \times 10^6 \text{ kJ/h}
 \end{aligned}$$

$$\text{Persentase } Q_5 \text{ (losses)} = \frac{Q_5 \text{ (losses)}}{Q_1} \times 100\% = \frac{2,375 \times 10^6 \text{ kJ/h}}{16,424 \times 10^6 \text{ kJ/h}} = 14,46\%$$

$$\text{Efisiensi ketel uap } (\eta) = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \frac{Q_4 - Q_6}{Q_1} = \frac{(15,870 \times 10^6 - 1,949 \times 10^6) \text{ kJ/kg}}{16,424 \times 10^6 \text{ kJ/kg}} = 84,76\%$$

A.2 Hasil dan Analisa Perhitungan Ketel Uap Untuk Pemakaian 11 Januari 2013 (Kondisi bahan bakar batubara lignit sebelum ketel uap dibersihkan)

Hasil dan analisa perhitungan ketel uap untuk pemakaian 11 Januari 2013 (Kondisi bahan bakar batubara lignit sebelum ketel uap dibersihkan), sama dengan perhitungan hasil dan Analisa Perhitungan Ketel Uap Untuk Pemakaian 04 Januari 2013 (Kondisi bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete sebelum ketel uap dibersihkan). Hasil perhitungan kondisi proses ada pada lampiran 8, metode BTU ada pada lampiran 9 dan hasil perhitungan kesetimbangan energi serta prestasi kerja ada pada lampiran 10.

A.3 Hasil dan Analisa Perhitungan Ketel Uap Untuk Pemakaian 27 Pebruari 2013 (Kondisi bahan bakar batubara lignit setelah ketel uap dibersihkan)

Hasil dan analisa perhitungan ketel uap untuk pemakaian 27 Pebruari 2013 (Kondisi bahan bakar batubara lignit setelah ketel uap dibersihkan), sama dengan perhitungan hasil dan Analisa Perhitungan Ketel Uap Untuk Pemakaian 11 Januari 2013 (Kondisi bahan bakar 100% batubara lignit sebelum ketel uap dibersihkan). Hasil perhitungan kondisi proses ada pada lampiran 11, metode BTU ada pada lampiran 12 dan hasil perhitungan kesetimbangan energi serta prestasi kerja ada pada lampiran 13.

Hasil perhitungan kesetimbangan energi untuk ketiga kondisi di atas ditabulasikan pada lampiran 14.

A.4 Analisis ash/abu

Partikel abu pada batubara merupakan sumber deposit atau endapan pada permukaan dinding bagian-bagian ketel uap yang menghalangi proses perpindahan panas pada ketel uap. Endapan yang terbentuk dari abu ini bisa terbagi dua, yaitu slagging dan fouling.

Slagging merupakan endapan yang terbentuk pada ruang bakar yang mengakibatkan terhambatnya perpindahan panas dari ruang bakar ke sisi air. Fouling merupakan fenomena menempelnya dan menumpuknya abu terbang yang terbawa pada gas hasil pembakaran dalam pipa api akibat adanya penurunan temperatur, fouling

mengakibatkan terhambatnya perpindahan panas dari sisi pipa api ke sisi pipa air.

Salah satu cara untuk memprediksi potensi terjadinya slagging yaitu berdasarkan perhitungan dasar rasio asam dan persen berat pada dry basis dari Sulfur dalam batubara seperti cara berikut :

Indeks slagging

Perhitungan berdasarkan base untuk rasio asam dan persen berat pada dry basis dari Sulfur dalam batubara maka indeks slagging (R_s^*) dihitung dengan :

$$R_s = \left(\frac{B}{A} \right) \times S$$

Dimana :

B = CaO + MgO + Fe₂O₃ + Na₂O + K₂O

A = SiO₂ + Al₂O₃ + TiO₂

S = Persentase berat Sulfur pada dry basis batubara

Klasifikasi potensial slagging menggunakan R_s adalah :

$R_s < 0,6$ = rendah

$0,6 < R_s < 2,0$ = sedang

$2,0 < R_s < 2,6$ = tinggi

$2,6 < R_s$ = sangat tinggi

Dari uraian mengenai indeks slagging, maka slagging yang disebabkan oleh ash batubara pada ketel uap pipa api di PT. Indofood CBP, Tbk Cabang Makassar bisa diketahui dengan menganalisa bahan bakar yang digunakan di PT. Sucofindo Makassar (hasil analisa ada pada lampiran 3). Berikut perhitungan indeks slagging di ketel uap pipa api bila menggunakan bahan bakar batubara :

Indeks slagging pemakaian bahan bakar batubara

$$\begin{aligned} B &= \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \\ &= 3,48 + 1,32 + 24,50 + 0,34 + 1,10 \\ &= 30,74 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &= \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 \\ &= 41,07 + 25,27 + 0,97 \\ &= 67,31 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S &= \text{Persentase berat Sulfur pada dry basis batubara} \\ &= 3,10 \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh nilai indeks slagging untuk ash lignite :

$$R_s = \left(\frac{B}{A} \right) \times S$$

$$R_s = \left(\frac{30,74}{67,31} \right) \times 3,10\% = 1,42\%$$

Karena nilai R_s yang didapat berada di dalam range $0,6 < R_s < 2,0$ maka potensi terjadinya slagging bila memakai bahan bakar batubara dikategorikan **sedang**

Untuk mengetahui potensi terbentuknya slagging bila memakai bahan bakar campuran 60% batubara dan 40% cangkang biji jambu mete, maka perhitungan komposisi abu diporsikan sesuai dengan persentasi pemakaian bahan bakar. Komposisi abu batubara diuji di PT. Sucofindo sedangkan komposisi abu cangkang biji jambu mete didapatkan dari web site pada lampiran 2.

Berikut perhitungan indeks slagging di ketel uap pipa api bila menggunakan campuran bahan bakar 60% batubara dan 40% cangkang biji jambu mete :

Indeks slagging pemakaian bahan bakar 60%batubara dan 40% cangkang biji jambu mete

$$\begin{aligned}
 B &= (60\% \text{ CaO batubara} + 40\% \text{ CaO cangkang biji jambu mete}) + \\
 &\quad (60\% \text{ MgO batubara} + 40\% \text{ MgO cangkang biji jambu mete}) + \\
 &\quad (60\% \text{ Fe}_2\text{O}_3 \text{ batubara} + 40\% \text{ Fe}_2\text{O}_3 \text{ cangkang biji jambu mete}) + \\
 &\quad (60\% \text{ Na}_2\text{O batubara} + 40\% \text{ Na}_2\text{O cangkang biji jambu mete}) + \\
 &\quad (60\% \text{ K}_2\text{O batubara} + 40\% \text{ K}_2\text{O cangkang biji jambu mete})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= (60\% \times 3,48 + 40\% \times 25,64) + (60\% \times 1,32 + 40\% \times 1,88) + \\
&\quad (60\% \times 24,50 + 40\% \times 3,9) + (60\% \times 0,34 + 40\% \times 0,65) + \\
&\quad (60\% \times 1,10 + 40\% \times 0) \\
&= 31,27
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A &= (60\% \text{ SiO}_2 \text{ batubara} + 40\% \text{ SiO}_2 \text{ cangkang biji jambu mete}) + \\
&\quad (60\% \text{ Al}_2\text{O}_3 \text{ batubara} + 40\% \text{ Al}_2\text{O}_3 \text{ cangkang biji jambu mete}) + \\
&\quad (60\% \text{ TiO}_2 \text{ batubara} + 40\% \text{ TiO}_2 \text{ cangkang biji jambu mete}) \\
&= (60\% \times 41,07 + 40\% \times 61,83) + (60\% \times 25,27 + 40\% \times 1,99) + \\
&\quad (60\% \times 0,97 + 40\% \times 4,02) \\
&= 67,52
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S &= (60\% \text{ Persentase berat Sulfur pada dry basis batubara} + \\
&\quad 40\% \text{ Persentase berat Sulfur pada dry basis cangkang biji jambu mete}) \\
&= (60\% \times 3,10 + 40\% \times 0) \\
&= 1,86
\end{aligned}$$

Sehingga diperoleh nilai indeks slagging untuk ash lignite :

$$R_s = \left(\frac{B}{A} \right) \times S$$

$$R_s = \left(\frac{31,27}{67,52} \right) \times 1,86\% = 0,86\%$$

Karena nilai R_s yang didapat berada di dalam range $0,6 < R_s < 2,0$ maka potensi terjadinya slagging untuk pemakaian bahan bakar 60% batubara dan 40% cangkang biji jambu mete dikategorikan **sedang**.

Salah satu cara untuk memprediksi potensi terjadinya fouling yaitu berdasarkan kandungan Sodium/Natrium dalam ash bahan bakar seperti cara berikut :

Indeks fouling

Klasifikasi fouling untuk ash batubara lignite adalah berdasarkan kandungan Sodium/Natrium dalam ash sebagai berikut :

Jika $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 < 20\%$

$\text{Na}_2\text{O} < 1,2$ = rendah – sedang

$1,2 < \text{Na}_2\text{O} < 3$ = tinggi

$\text{Na}_2\text{O} > 3$ = tinggi sekali

Jika $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 20\%$

$\text{Na}_2\text{O} < 3$ = rendah – sedang

$3 < \text{Na}_2\text{O} < 6$ = tinggi

$6 < \text{Na}_2\text{O}$ = tinggi sekali

Dari uraian mengenai indeks fouling, maka fouling yang disebabkan oleh ash batubara pada ketel uap pipa api di PT. Indofood CBP, Tbk Cabang Makassar bisa diketahui dengan menganalisa bahan bakar yang digunakan di PT. Sucofindo Makassar (hasil analisa ada pada lampiran 3). Berikut perhitungan indeks fouling di ketel uap pipa api bila menggunakan bahan bakar batubara :

Indeks fouling pemakaian bahan bakar batubara

$$\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 < 20\%$$

$$3,48\% + 1,32\% + 24,50\% < 20\%$$

$$29,30\% > 20\%$$

Jika $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 20\%$, maka untuk $\text{Na}_2\text{O} = 0,34\%$ berarti :

$\text{Na}_2\text{O} < 3$, maka potensi fouling bila menggunakan bahan bakar batubara dikategorikan **rendah-sedang**

Untuk mengetahui potensi terbentuknya fouling bila memakai bahan bakar campuran 60% batubara dan 40% cangkang biji jambu mete, maka perhitungan komposisi abu diporsikan sesuai dengan persentasi pemakaian bahan bakar. Komposisi abu batubara diuji di PT. Sucofindo sedangkan komposisi abu cangkang bijinjambu mete didapatkan dari web site pada lampiran 2.

Berikut perhitungan indeks fouling di ketel uap pipa api bila menggunakan campuran bahan bakar 60% batubara dan 40% cangkang biji jambu mete :

Indeks fouling bila pemakaian bahan bakar 60%batubara dan 40% cangkang biji jambu mete

$$\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 20\%$$

$$(\text{60\% CaO batubara} + \text{40\% CaO cangkang biji jambu mete}) +$$

$$(\text{60\% MgO batubara} + \text{40\% MgO cangkang biji jambu mete}) +$$

$$(\text{60\% Fe}_2\text{O}_3 \text{ batubara} + \text{40\% Fe}_2\text{O}_3 \text{ cangkang biji jambu mete}) > 20\%$$

$$(\text{60\%} \times 3,48 + \text{40\%} \times 25,64) + (\text{60\%} \times 1,32 + \text{40\%} \times 1,88) +$$

$$(\text{60\%} \times 24,50 + \text{40\%} \times 3,9) > 20\%$$

$$30,15 > 20\%$$

$$\text{Na}_2\text{O} = (\text{60\% Na}_2\text{O batubara} + \text{40\% Na}_2\text{O cangkang biji jambu mete})$$

$$= (\text{60\%} \times 0,34 + \text{40\%} \times 0,65)$$

$$= 0,05$$

Jika $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 20\%$, maka untuk $\text{Na}_2\text{O} = 0,05\%$ berarti :

$\text{Na}_2\text{O} < 3$, maka potensi fouling untuk pemakaian bahan bakar campuran 60% batubara dan 40% cangkang biji jambu mete dikategorikan **rendah-sedang**.

Hasil perhitungan indeks slagging dan fouling untuk masing-masing pemakaian bahan bakar dan kondisi ketel sebelum dan sesudah dibersihkan ada pada lampiran 15.

B. PEMBAHASAN

Hubungan slagging, fouling dan berbagai kalor pada proses produksi uap/steam pada ketel uap pipa api PT. Indofood CBP, Tbk Cabang Makassar dianalisa berdasarkan 3 kondisi yaitu :

1. Kondisi ketel uap sebelum dibersihkan menggunakan bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete
2. Kondisi ketel uap sebelum dibersihkan menggunakan bahan bakar batubara lignit
3. Kondisi ketel uap setelah dibersihkan menggunakan bahan bakar batubara lignit

Hubungan slagging dan fouling serta parameter-parameter yang dipengaruhinya dibahas sebagai berikut :

1. Pada kondisi ketel uap sebelum dibersihkan menggunakan bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete

Pengaruh indeks slagging mempengaruhi $T_{\text{pembakaran}}$, $T_{\text{gas keluar}}$ ruang bakar, efisiensi ketel dan laju alir uap/steam sedangkan indeks fouling mempengaruhi T_{keluar} pipa api, efisiensi ketel dan laju alir uap/steam. Untuk kondisi ketel uap sebelum dibersihkan menggunakan bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete bisa terlihat pada gambar 8 berikut.

slagging

Indeks slagging = 0,86%
 $T_{\text{pembakaran}} = 1.543^{\circ}\text{C}$
 $T_{\text{gas keluar ruang bakar}} = 838^{\circ}\text{C}$

fouling

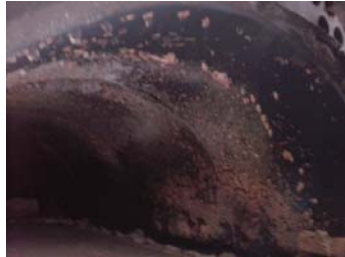
Indeks fouling $\text{Na}_2\text{O} = 0,05\%$
 $T_{\text{keluar pipa api}} = 208^{\circ}\text{C}$

Efisiensi = 84,76%
 Laju alir uap/steam = 5.750 kg/h

Gambar 8. kondisi ketel uap sebelum dibersihkan menggunakan bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete

2. Pada kondisi ketel uap sebelum dibersihkan menggunakan bahan bakar batubara lignit

Pengaruh indeks slagging mempengaruhi $T_{\text{pembakaran}}$, $T_{\text{gas keluar ruang bakar}}$, efisiensi ketel dan laju alir uap/steam sedangkan indeks fouling mempengaruhi $T_{\text{keluar pipa api}}$, efisiensi ketel dan laju alir uap/steam. Untuk kondisi ketel uap sebelum dibersihkan menggunakan bahan bakar batubara terlihat pada gambar 9 berikut:

slagging

→ Indeks slagging = 1,42%
 $T_{\text{pembakaran}} = 1.427^{\circ}\text{C}$
 $T_{\text{gas keluar ruang bakar}} = 875^{\circ}\text{C}$

fouling

→ Indeks fouling $\text{Na}_2\text{O} = 0,34\%$
 $T_{\text{keluar pipa api}} = 270^{\circ}\text{C}$

→ Efisiensi = 80%
 Laju alir uap/steam = 5.449 kg/h

Gambar 9. kondisi ketel uap sebelum dibersihkan menggunakan bahan bakar batubara lignit

3. Pada kondisi ketel uap setelah dibersihkan menggunakan bahan bakar batubara lignit

Pengaruh indeks slagging mempengaruhi $T_{\text{pembakaran}}$, $T_{\text{gas keluar ruang bakar}}$, efisiensi ketel dan laju alir uap/steam sedangkan indeks fouling mempengaruhi $T_{\text{keluar pipa api}}$, efisiensi ketel dan laju alir uap/steam. Untuk kondisi ketel uap sebelum dibersihkan menggunakan bahan bakar batubara terlihat pada gambar 10 berikut:

slagging**fouling**

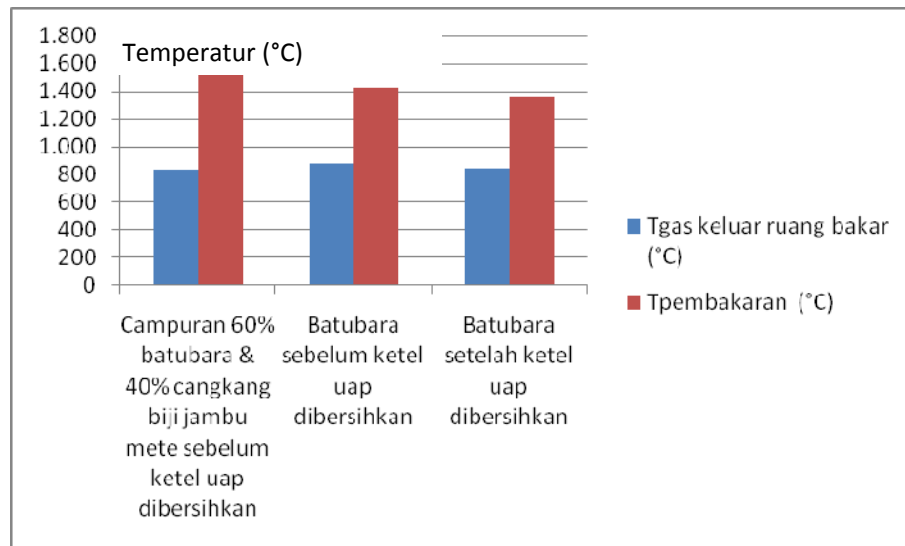
→ Indeks slagging = 1,42%
 $T_{\text{pembakaran}} = 1.360^{\circ}\text{C}$
 $T_{\text{gas keluar ruang bakar}} = 846^{\circ}\text{C}$

→ Efisiensi = 85,54%
 Laju alir uap/steam = 5.800 kg/h

→ Indeks fouling $\text{Na}_2\text{O} = 0,34\%$
 $T_{\text{keluar pipa api}} = 171^{\circ}\text{C}$

Gambar 10. kondisi ketel uap setelah dibersihkan menggunakan bahan bakar batubara lignit

Temperatur gas keluar ruang bakar merupakan indikasi dari adanya slagging pada ruang bakar, hubungan kondisi ketel uap terhadap temperatur gas keluar ruang bakar ditunjukkan pada gambar 11 berikut :



Gambar 11. Grafik hubungan kondisi ketel uap terhadap temperatur pembakaran dan temperatur gas keluar ruang bakar

Dari gambar 11 terlihat bahwa pada kondisi slagging sebelum dibersihkan, temperatur pembakaran di ruang bakar bila menggunakan campuran 60% batubara lignit dan 40% lebih tinggi dibanding dengan temperatur pembakaran bila hanya menggunakan bahan bakar batubara lignit (temperatur pembakaran bila menggunakan bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete 1.543°C dan temperatur pembakaran bila menggunakan batubara lignit sebelum dibersihkan adalah 1.427°C dan bila menggunakan batubara lignit setelah dibersihkan adalah 1.360°C).

hal ini terjadi karena cangkang biji jambu mete memiliki komposisi nilai volatiles matter/zat terbang lebih tinggi dibanding batubara lignit (volatiles matter cangkang biji jambu mete 68,03% sedangkan batubara lignite 42,80% dan 42,10%) serta cangkang biji jambu mete memiliki ash

content/kandungan abu lebih rendah dibanding batubara lignite (ash content cangkang biji jambu mete 2% dan ash content batubara lignit 10,90%) walaupun nilai kalor /HHV batubara lignit lebih tinggi dari cangkang biji jambu mete (HHV batubara lignit berkisar 26.121 kJ/kg dan 26.026 kJ/kg sedangkan HHV cangkang biji jambu mete 9.101 Btu/lb). Volatile matter membantu perambatan api menuju batubara, dimana campuran volatile matter dan udara pembakaran menambah keturbulenan gas dan akan turun menuju batubara yang akan dibakar serta menambah efek pembakaran di atas chain grate sehingga menaikkan atau menambah temperatur pembakaran. Tingginya nilai ash content menghambat udara pembakaran untuk mencapai/membakar carbon sehingga tidak semua carbon bisa diubah menjadi CO_2 , hal ini menurunkan nilai kalor pembakaran sehingga menurunkan nilai temperatur pembakaran.

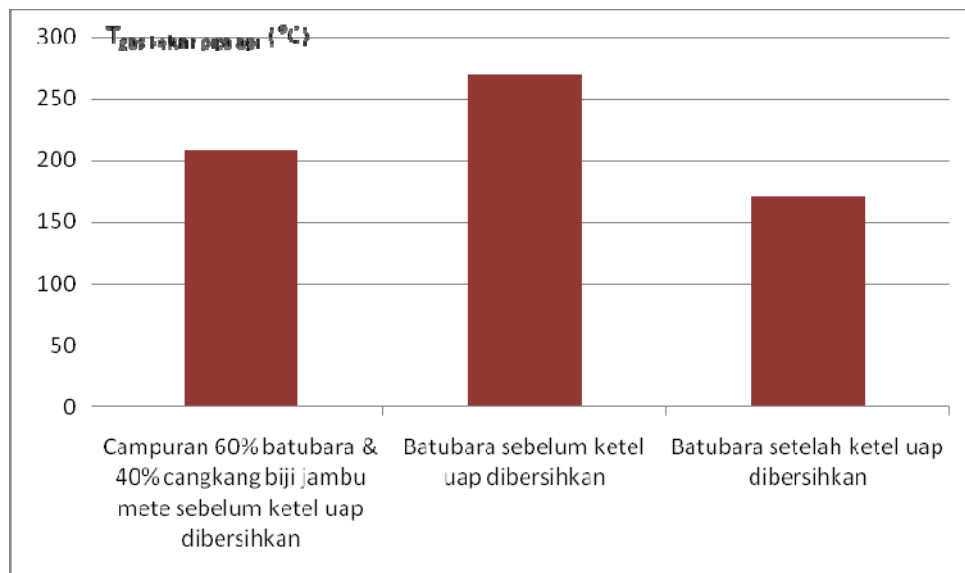
Temperatur gas keluar ruang bakar bila menggunakan campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete sebelum dibersihkan lebih rendah dibanding dengan temperatur pembakaran bila hanya menggunakan bahan bakar batubara lignit sebelum dibersihkan (temperatur gas keluar ruang bakar bila menggunakan bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete sebelum dibersihkan 838°C dan temperatur pembakaran bila menggunakan batubara lignit sebelum dibersihkan adalah 875°C dan bila menggunakan batubara lignit setelah dibersihkan adalah 846°C), hal ini

terjadi karena indeks slagging pada ketel uap bila menggunakan bahan bakar batubara lignit bernilai lebih tinggi dibandingkan indeks slagging bila ketel menggunakan bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete (indeks slagging bila bahan bakar menggunakan batubara 1,42% dan indeks slagging bila menggunakan campuran 60% batubara dan 40% cangkang biji jambu mete sebelum dibersihkan 0,86%). Karena indeks slagging pada ketel uap bila menggunakan bahan bakar batubara lebih tinggi maka transfer panas radiasi dari ruang bakar tidak begitu banyak yang tertransfer ke sisi air sehingga temperatur keluar dapur masih cukup tinggi, namun pada kondisi ketel uap setelah dibersihkan indeks slagging ini tidak terlalu berpengaruh, namun nilainya masih lebih tinggi dibandingkan bila menggunakan bahan bakar menggunakan campuran 60% batubara dan 40% cangkang biji jambu mete.

Dari kondisi yang telah dijelaskan, terlihat bahwa dengan memakai bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete telah mendekati dengan kondisi standar yang diberikan dari pihak pembuat ketel uap (ALSTOM), dimana temperatur pembakaran yang dipersyaratkan oleh ALSTOM adalah 1600°C sedangkan temperatur pembakaran campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete adalah 1543°C sementara untuk temperatur keluar ruang bakar yang dipersyaratkan oleh ALSTOM adalah 800°C sedangkan temperatur

pembakaran campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete adalah 838°C.

Temperatur gas keluar pipa api merupakan indikasi dari adanya fouling pada pipa, hubungan kondisi ketel uap terhadap temperatur gas keluar pipa api ditunjukkan pada gambar 12 berikut :

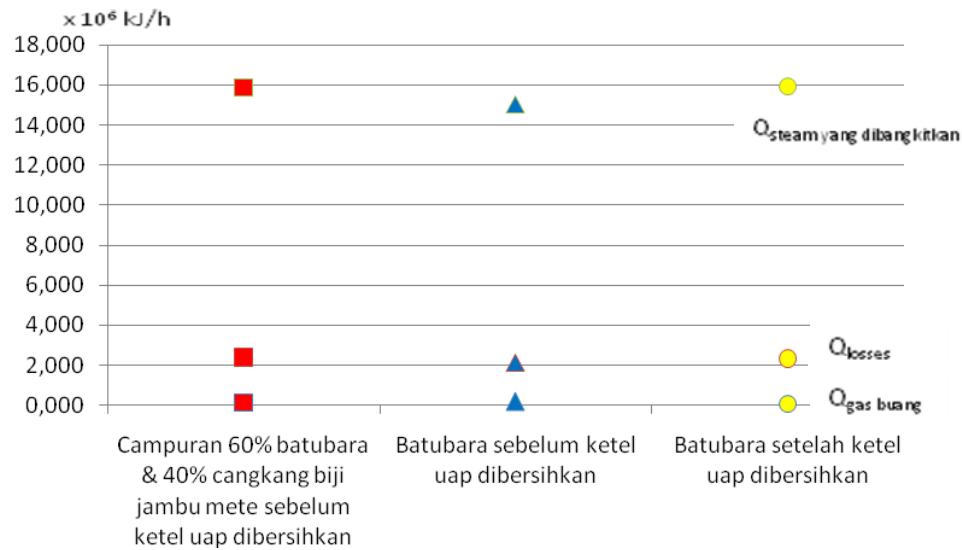


Gambar 12. Grafik hubungan kondisi ketel uap terhadap temperatur gas keluar pipa api

Dari gambar 12 terlihat bahwa temperatur gas keluar pipa api bila menggunakan campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete sebelum ketel uap dibersihkan lebih rendah dibanding dengan temperatur gas keluar pipa api bila hanya menggunakan bahan bakar batubara lignit (temperatur gas keluar pipa api bila menggunakan bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete sebelum dibersihkan 208°C dan temperatur pembakaran bila

menggunakan batubara lignit sebelum dibersihkan adalah 270°C dan bila menggunakan batubara lignit setelah dibersihkan adalah 171°C), hal ini terjadi karena indeks fouling pada ketel uap bila menggunakan bahan bakar batubara lignit bernilai lebih tinggi dibandingkan indeks slagging bila ketel menggunakan bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete(indeks fouling bila bahan bakar menggunakan batubara adalah Na_2O 0,34% dan indeks fouling bila menggunakan campuran 60% batubara dan 40% cangkang biji jambu mete adalah Na_2O 0,05%). Karena indeks fouling pada ketel uap bila menggunakan bahan bakar batubara lebih tinggi maka transfer panas dari gas didalam pipa api ke sisi air terhambat karena adanya fouling, namun pada kondisi ketel uap setelah dibersihkan indeks fouling ini tidak terlalu berpengaruh.

Pengaruh slagging dan fouling terhadap besarnya nilai kalor terbuang ke gas buang/flue gas (Q_2), kalor uap/steam yang dibangkitkan (Q_4), kalor yang hilang/losses (Q_5), laju alir uap/steam dan efisiensi ketel uap diberikan pada gambar 13 berikut :



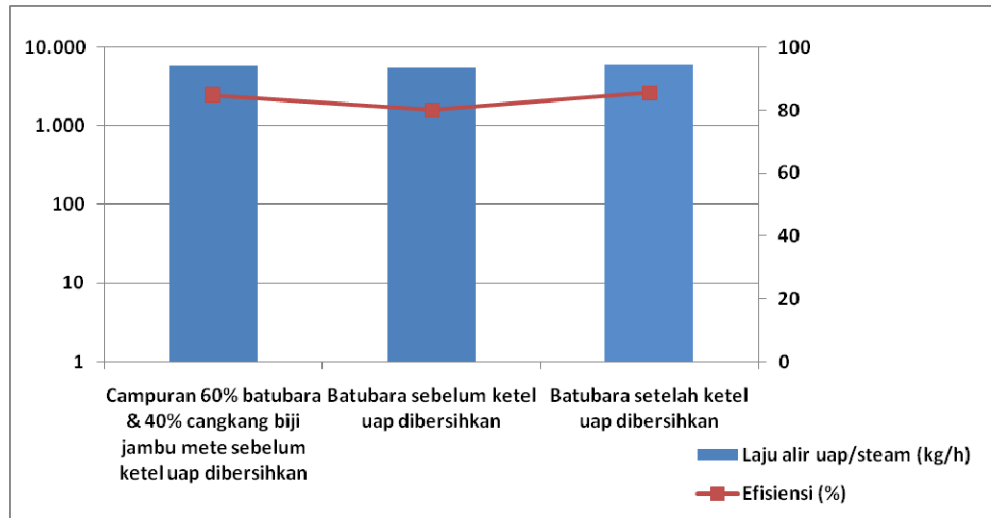
Gambar 13. Hubungan kondisi ketel uap terhadap Q_{steam} yang dibangkitkan, $Q_{\text{gas buang}}$ dan Q_{losses}

Dari gambar 13 terlihat bahwa nilai kalor steam yang dibangkitkan untuk kondisi ketel uap menggunakan batubara lignit sebelum dibersihkan ($15,033 \times 10^6$ kJ/h) lebih kecil dibanding nilai kalor steam yang dibangkitkan untuk kondisi ketel uap menggunakan bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete sebelum dibersihkan ($15,870 \times 10^6$ kJ/h) serta dibandingkan dengan nilai kalor steam yang dibangkitkan dengan kondisi ketel uap menggunakan bahan bakar batubara lignit setelah dibersihkan ($15,938 \times 10^6$ kJ/h), ini menunjukkan bahwa slagging dan fouling menghambat perpindahan kalor dari ruang bakar ke sisi air dan perpindahan kalor gas dari pipa api ke sisi air untuk menghasilkan steam, karena indeks slagging dan fouling pada kondisi ketel uap menggunakan bahan bakar batubara lignit sebelum dibersihkan lebih besar (indeks slagging 1,42% dan indeks fouling Na_2O

0,34%) dibanding kondisi ketel uap menggunakan bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete sebelum dibersihkan (indeks slagging 0,86% dan indeks fouling Na_2O 0,05%). Untuk kondisi ketel uap menggunakan bahan bakar batubara lignit setelah dibersihkan nilai kalor steam yang dibangkitkan lebih tinggi dengan nilai indeks slagging dan fouling yang sama dengan kondisi ketel uap menggunakan bahan bakar batubara lignit sebelum dibersihkan karena ketel uap telah dibersihkan dari slagging dan fouling yang ada.

Nilai kalor gas buang untuk kondisi ketel uap menggunakan batubara lignit sebelum dibersihkan ($0,167 \times 10^6$ kJ/h) lebih besar dibanding nilai kalor gas buang untuk kondisi ketel uap menggunakan bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete sebelum dibersihkan ($0,128 \times 10^6$ kJ/h), namun nilai kalor gas buang dengan kondisi ketel uap menggunakan bahan bakar batubara lignit setelah dibersihkan sangat rendah ($0,096 \times 10^6$ kJ/h), ini menunjukkan bahwa fouling menghambat perpindahan kalor dari gas pada pipa api ke sisi air. Nilai kalor gas buang untuk kondisi ketel uap menggunakan batubara lignit sebelum dibersihkan nilainya lebih tinggi karena nilai temperatur gas keluar pipa api masih sangat tinggi (270°C) yang disebabkan karena gas didalam pipa api terhambat transfer panasnya ke sisi air, sehingga temperatur keluar pipa api masih tinggi nilainya dan kalor gas buang pun juga besar nilainya.

Nilai kalor yang hilang/losses untuk kondisi ketel uap menggunakan bahan bakar batubara lignit sebelum dibersihkan lebih tinggi dibanding untuk kondisi ketel uap menggunakan bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete sebelum dibersihkan dan nilai kalor yang hilang/losses yang paling rendah adalah pada kondisi ketel uap setelah dibersihkan menggunakan bahan bakar batubara lignit. Nilai kalor losses ini dipengaruhi transfer panas yang terjadi dari ruang bakar ke sisi air dan transfer panas dari gas di pipa api ke sisi air. Tingginya nilai slagging dan fouling (indeks slagging 1,42% dan indeks fouling Na_2O 0,34%) pada kondisi ketel uap sebelum dibersihkan menggunakan bahan bakar batubara lignit ini mengakibatkan kecilnya nilai kalor yang terserap, bila nilai kalor yang dimanfaatkan/terserap rendah maka nilai kalor losses akan meningkat, namun untuk kondisi ketel uap menggunakan bahan bakar batubara lignit setelah dibersihkan yang mempunyai nilai indeks slagging dan fouling yang sama nilai persentase kalor yang hilang/losses bisa nilainya lebih rendah karena slagging dan fouling yang ada telah dibersihkan. Untuk kondisi ketel uap menggunakan bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete sebelum dibersihkan nilai persentase kalor yang hilang/losses lebih rendah dibanding kondisi ketel uap kondisi sebelum dibersihkan menggunakan bahan bakar batubara lignit karena indeks slagging dan foulingnya lebih rendah (indeks slagging 0,86% dan indeks fouling Na_2O 0,05%).



Gambar 14. Grafik hubungan kondisi ketel uap terhadap laju alir uap/steam yang dihasilkan dan efisiensi ketel uap

Dari gambar 14 menunjukkan bahwa ketel uap menggunakan bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete sebelum menghasilkan laju massa steam yang lebih besar dibandingkan bila ketel uap menggunakan batubara lignit sebelum dibersihkan (bila menggunakan bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete 5.750 kg/h dan laju massa steam bila menggunakan bahan bakar batubara 5.449 kg/h), ini terjadi karena transfer kalor menggunakan campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete bisa tertransfer dengan baik dibandingkan dengan bila ketel uap menggunakan batubara lignit, karena hambatan slangging dan fouling yang lebih tinggi. Kecenderungan ini juga terbukti dengan tingginya nilai efisiensi ketel bila menggunakan bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete

sebelum dibersihkan dibandingkan dengan efisiensi ketel bila menggunakan bahan bakar batubara lignit sebelum dibersihkan (efisiensi ketel bila menggunakan bahan bakar campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete sebelum dibersihkan adalah 84,76% dan bila menggunakan bahan bakar batubara lignit sebelum dibersihkan efisiensi ketel bernilai 80,00%). Untuk kondisi ketel uap setelah dibersihkan laju alir massa steam lebih besar yaitu 6.250 kg/h dengan nilai indeks slagging dan fouling yang sama dengan pemakaian batubara lignit sebelum ketel uap dibersihkan, kondisi ini bisa terjadi karena sudah adanya pemberian slagging pada ruang bakar dan fouling pada pipa api saat proses pembersihan sehingga transfer panas bisa terjadi dengan baik, terlihat juga pada hasil efisiensi ketel uap yaitu sebesar 85,54%. Terlihat bahwa kondisi ketel uap setelah dibersihkan efisiensinya mendekati efisiensi yang dipersyaratkan dari ALSTOM yaitu untuk bahan bakar bernilai 6.692 kcal/kg untuk ukuran batubara peas adalah 97%, sehingga bila dikonversi ke nilai kalor batubara yang dipakai oleh ketel uap PT. Indofood CBP, Tbk Cabang Makassar bernilai 6.200 kcal seharusnya efisiensi yang diperoleh adalah 89,86%.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisa yang telah dilakukan pada ketel uap PT. Indofood CBP Sukses Makmur, Tbk Cabang Makassar dengan tiga kondisi, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Penggunaan campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete bisa menurunkan indeks slagging dan fouling pada ketel uap pipa api.
2. Penggunaan campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete lebih baik dibanding menggunakan batubara lignit tanpa dicampur dengan cangkang biji jambu mete bila ditinjau dari sisi penghematan energi.

B. SARAN

Adapun saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut :

1. Karena kalor yang hilang (Q_{losses}) masih cukup tinggi ($2,294 \times 10^6$ kJ/h) untuk kondisi ketel uap setelah dibersihkan saat menggunakan bahan bakar batubara), maka perlu pemanfaatan kalor yang hilang (Q_{losses}) untuk keperluan yang lain seperti untuk memanaskan batubara di gudang penyimpanan agar kadar air yang terbawa dari proses pengangkutan dari tambang ke gudang penyimpanan bisa dikurangi dan berdampak pada penghematan pada kalor input yang dibutuhkan oleh ketel uap).
2. Perlu penelitian tambahan untuk lebih memvariasikan persentase campuran antara batubara lignit dan cangkang biji jambu mete hingga didapatkan efisiensi yang sesuai dengan kondisi efisiensi saat ketel uap habis dibersihkan menggunakan bahan bakar 100% batubara lignit (data tanggal 27 Pebruari 2013)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Nierop V.G. 2002. *Thompson Afripac Coal Fired Boiler Operating & Maintenance Manual*. Alstom John Thompson (Pty)nLimited, South Africa.
- [2] Anup industries manufacturers of CNS Liquid. (2010). *Cashew Nut Shell Cake*. (<http://www.anupinindustries.net/cashew-net-shell-cake.html>).
- [3] *Fuel Analysis Conversion*. Available from : (http://www.myvistasource.com/files/tech_papers/prox2utl.php).
- [4] Belkin H.E; Tewalt S.J. 2010. *Geochemistry of Selected Coal Samples from Sumatera, Kalimantan, Sulawesi and Papua, Indonesia*, Science for a charging word, Balcanica.
- [5] Gondosari, Irwan. and Rumawan, Yoseph. 2009. *Training Coal Boiler*, HO Manufacturing PT. Indoofood Sukses Makmur, Jakarta
- [6] Kitto J.B; C, Stevan; Stultz. 2005. *Steam*. The Babcock and Wilcox Company Barbeton, Ohio USA. Edisi 41.
- [7] Wiley, John. and Sons, 1993. *Encyclopedia of Chemical Technology*. A WileyInterscience Publication, New York. Edisi 6.
- [8] Lesmana, Ridwan. 1993. *Proses Pembuatan Mie Instant*. HO Manufacturing PT. Indoofood Sukses Makmur, Jakarta.

- [9] Risfahri. 2004.*Pemisahan Kardanol Dari Minyak Kulit Biji Mete Dengan Metode Destilasi Vakum*. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pascapanen Pertanian Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- [10] JU R.S; Ahamed; Masjuki H.H. 2010.*Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers*. Department of Mechanical Engineering, University of Malaya. Kuala Lumpur Malaysia.

Lampiran 1

**Hasil Analisa Proximate Batubara Pada Pemakaian Ketel Uap
Sebelum Dibersihkan**



Certificate No. 00067/CDDBAG
Date: January 9, 2013



Issuing Office:
Jl. Urip Sumoharjo No. 90 A, Makassar 90232, Indonesia
Phone/Fax: +62 411 451890/451795
Email: amiharja@sucofindo.co.id

REPORT OF ANALYSIS

PRINCIPAL : PT. INDOFOOD CBP SUKSES MAKMUR Tbk
JL. KIMA X KAV. A3 BIRINGKANAYA
MAKASSAR

TYPE OF SAMPLE : COAL

TESTED FOR : Total Moisture, Proximate Analysis, Total Sulfur and Gross
Calorific Value

DESCRIPTION OF SAMPLE : FORM : Boulder
WEIGHT SAMPLE : ± 10.84 KG
TOP SIZE : ± 100 mm
PACKING : Unsealed Plastic Bag

DATE RECEIVED : 04/01/2013

DATE OF TESTING : 04/01/2013 to 09/01/2013

SAMPLE MARK : OBBW228.122

STANDARD METHOD : ASTM STANDARD

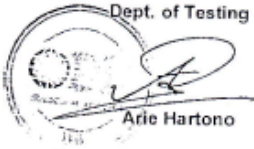
Result:

PARAMETER	UNIT	TEST RESULTS	METHODS
• Total Moisture, AR	% wt	12.5	ASTM D - 3302
• Moisture In Analysis the Sample, ADB	% wt	9.2	ASTM D - 3173
• Ash Content, ADB	% wt	10.9	ASTM D - 3174
• Volatile Matter, ADB	% wt	42.8	ISO 562
• Fixed Carbon, ADB	% wt	37.1	By difference
• Total Sulfur, ADB	% wt	3.10	ASTM D - 4239
• Gross Calorific Value, ADB	Kcal/kg	6239	ASTM D - 5865

THE RESULT OF TESTING ANALYSIS ONLY REFERS TO THE SAMPLE SUBMITTED AND DOES NOT REPRESENT ANY CONSIGNMENT AS THE SAMPLE WAS NOT TAKEN BY PT SUCOFINDO

This Certificate/report is issued under our General Terms and Conditions, copy of which is available upon request or may be accessed at www.sucofindo.co.id


MKSOP3201300024

Dept. of Testing

 Arie Hartono

Lampiran 2

Hasil Analisa Cangkang Biji Jambu Mete

03/04/2013 Cashew Nut Shell Cake,Crushed Cash...




ANUP Industries
 MANUFACTURERS OF CNS LIQUID
 S.NO. 757-1510 PUTTHIGE
 PERDOR- 574124
 PHONE: 0820-3542345, 3625750
 CELL : 94484 09800

[Home](#) | [Profile](#)

[Test Report](#) [CNSL Main](#) [CNSL Properties](#) [Contact Us](#) [Inquiry](#)


PRODUCTS

- Cashew Nut Shell Liquid
- Cashew Nut Shell Cake



Cashew Nut Shell Cake
[Home > Products > Cashew Nut Shell Cake](#)

Empowered with robust infrastructural base and qualified team, we bring forth an ample assortment of high quality cashew nut shell cake. We are well reckoned as one of the supreme De-Oiled cashew shell cake exporters and manufacturers in the national and international market. Crushed cashew nut shell cake provided by us is highly acclaimed for quality and performance.



Widely used by tile manufacturing, cashew and many more industries, our cashew nut shell cake is the perfect blend of long lasting shelf life with efficiency. We deliver crushed cashew nut shell cake within the stipulated time frame and that too at very reasonable price.

It is one of the best fuels. It is mainly used by cashew industries, tile manufacturing units and others. The chemical analysis of the cashew shell oil cake is as follows.

1	Gross Calorific Value	5056 Koal / Kg
2	Proximate analysis (% weight)	
	Moisture	8.85
	Volatile matter	68.03
	Ash	2.00
	Fixed Carbon	21.12
3	Ultimate Analysis	
	Carbon	46.08
	Hydrogen	3.88
	Nitrogen	0.21
	Sulphur	NIL
	Moisture	8.85
	Ash	2.00
	Oxygen	38.98
4	Bulk density	0.4430g/cc
5	Ash Chemical composition (% by weight)	

03/04/2013 Cashew Nut Shell Cake,Crushed Cash...

Silica (SiO ₂)	61.83
Iron Oxide (as Fe ₂ O ₃)	3.99
Aluminium Oxide	1.99
Calcium Oxide (as CaO)	25.64
Magnesium Oxide (as MgO)	1.88
Sodium Oxide (as Na ₂ O)	0.65
Potassium (as P ₂ O ₅)	Traces
Sulphate (as P ₂ O ₅)	Traces
Phosphate (as P ₂ O ₅)	Traces
6 Ash Fusion Characteristics	
Initial deformation temperature (T1)	840
Hemispherical temperature (T2)	920
Fusion temperature (T3)	1010


Home - Test Report - CNSL Main - CNSL Properties - Contact Us - Inquiry - Site Map

© Copyright 2009 - 2010, M/s Anup Industries India Business Directory - B2B Network of ExportersIndia.com

Lampiran 3

Hasil Analisa Kimia Abu Batubara

Certificate No. 01655/CDDBAG
Date: May 17, 2013


SUCOFINDO
Issuing Office:
Jl. Urip Sumoharjo No. 90 A, Makassar 90232, Indonesia
Phone/Facs: +62 411 451890/451796
Email: amiharja@sucofindo.co.id

REPORT OF ANALYSIS

PRINCIPAL : NOVARINI
TAMAN BUNGA SUDIANG BLOK B 22
MAKASSAR

TYPE OF SAMPLE : COAL

TESTED FOR : CaO, MgO, Fe₂O₃, Na₂O, K₂O, SiO₂, Al₂O₃ and TiO₂

DESCRIPTION OF SAMPLE : FORM : Boulder
WEIGHT SAMPLE : ± 5.8 KG
PACKING : Unsealed Plastic Bag

DATE RECEIVED : 14/05/2013

DATE OF TESTING : 14/05/2013 to 17/05/2013

SAMPLE MARK : OBBW

STANDARD METHOD : ASTM STANDARD

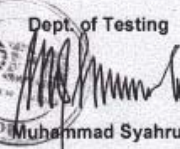
Result:

PARAMETER (DB)	UNIT	TEST RESULTS
• CaO	%	3.48
• MgO	%	1.32
• Fe ₂ O ₃	%	24.50
• Na ₂ O	%	0.34
• K ₂ O	%	1.10
• SiO ₂	%	41.07
• Al ₂ O ₃	%	25.27
• TiO ₂	%	0.97

THE RESULT OF TESTING ANALYSIS ONLY REFERS TO THE SAMPLE SUBMITTED AND DOES NOT REPRESENT ANY CONSIGNMENT AS THE SAMPLE WAS NOT TAKEN BY PT SUCOFINDO

This Certificate/report is issued under our General Terms and Conditions, copy of which is available upon request or may be accessed at www.sucofindo.co.id

MKSOP3201300635

Dept. of Testing

Muhammad Syahrul

Lampiran 4

Perhitungan Konversi Analisa Proximate ke Ultimate Batubara^[3]

$$\text{DMMFC} = \frac{\text{FC}}{(\text{FC} + \text{VOL})} \times 100\% = \frac{37,1}{(37,1 + 42,8)} \times 100\% = 46,43$$

$$\text{DMMVOL} = \frac{\text{VOL}}{(\text{FC} + \text{VOL})} \times 100\% = \frac{42,8}{(37,1 + 42,8)} \times 100\% = 53,57$$

$$\begin{aligned} C &= \frac{((\text{DMMFC} + 0,9(\text{DMMVOL} - 14)) \times (\text{VOL} + \text{FC}))}{100} \\ &= \frac{((46,43 + 0,9(53,57 - 14)) \times (42,8 + 37,1))}{100} \\ &= 65,55 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_2 &= \frac{((2,1 - 0,012 \times \text{DMMVOL}) \times (\text{VOL} + \text{FC}))}{100} \\ &= \frac{((2,1 - 0,012 \times 53,57) \times (42,8 + 37,1))}{100} \\ &= 1,16 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_2 &= \frac{((DMMVOL \times \frac{7,35}{(DMMVOL + 10)} - 0,013) \times (VOL + FC))}{100} \\
 &= \frac{((53,57 \times \frac{7,35}{(53,57 + 10)} - 0,013) \times (42,8 + 37,1))}{100} \\
 &= 4,94
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 O_2 &= 100 - \text{Ash} - S - H_2 - C - \text{Moisture} - N_2 \\
 &= 100 - 10,9 - 3,10 - 4,94 - 65,55 - 9,20 - 1,16 \\
 &= 5,20
 \end{aligned}$$

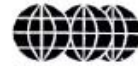
$$HHV = 6239 \text{ Kcal/kg} = 11.230 \text{ Btu/lb}$$

Lampiran 5

Hasil Analisa Proximate Batubara Pada Pemakaian Ketel Uap Setelah Dibersihkan



Certificate No. 00325/CDDBAG
Date: February 1, 2013



SUCOFINDO

Issuing Office:
Jl. Urip Sumoharjo No. 90 A, Makassar 90232, Indonesia
Phone/Fax: +62 411 451890/451796
Email: aminaraja@sucofindo.co.id

REPORT OF ANALYSIS

PRINCIPAL : PT. INDOFOOD CBP SUKSES MAKMUR Tbk
JL. KIMA X KAV. A3 BIRINGKANAYA
MAKASSAR

TYPE OF SAMPLE : COAL

TESTED FOR : Total Moisture, Proximate Analysis, Total Sulfur and Gross
Calorific Value

DESCRIPTION OF SAMPLE : FORM : Boulder
WEIGHT SAMPLE : ± 9.49 KG
TOP SIZE : ± 60 mm
PACKING : Unsealed Plastic Bag

DATE RECEIVED : 29/01/2013

DATE OF TESTING : 29/01/2013 to 01/02/2013

SAMPLE MARK : OBBR119013

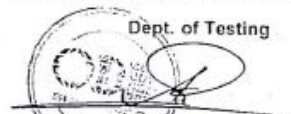
STANDARD METHOD : ASTM STANDARD

Result:

PARAMETER	UNIT	TEST RESULTS	METHODS
• Total Moisture, AR	% wt	11.6	ASTM D – 3302
• Moisture In Analysis the Sample, ADB	% wt	8.1	ASTM D – 3173
• Ash Content, ADB	% wt	12.7	ASTM D – 3174
• Volatile Matter, ADB	% wt	42.1	ISO 562
• Fixed Carbon, ADB	% wt	37.1	By difference
• Total Sulfur, ADB	% wt	1.16	ASTM D – 4239
• Gross Calorific Value, ADB	Kcal/kg	6216	ASTM D – 5865

THE RESULT OF TESTING ANALYSIS ONLY REFERS TO THE SAMPLE SUBMITTED AND DOES NOT REPRESENT ANY CONSIGNMENT AS THE SAMPLE WAS NOT TAKEN BY PT SUCOFINDO

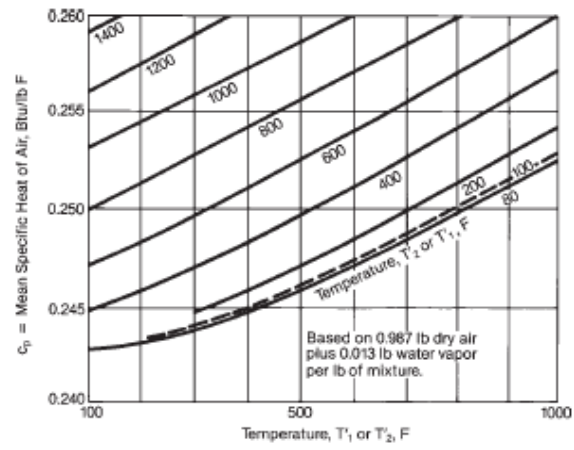
This Certificate/report is issued under our General Terms and Conditions, copy of which is available upon request or may be accessed at www.sucofindo.co.id

Dept. of Testing

Arie Hartono
DB

MKSOP3201300150

Lampiran 6

Grafik Nilai Kapasitas Panas



Lampiran 7

Tabel Hasil Perhitungan Keseimbangan Energi dan Prestasi Kerja Ketel Uap Sebelum Dibersihkan Menggunakan Bahan Bakar Campuran 60% Batubara Lignite dan 40% Cangkang Biji Jambu Mete

No	Parameter	Bahan bakar : 60% Batubara Lignite dan 40% cangkang biji jambu mete			
		Hasil Perhitungan	Satuan SI	Hasil Perhitungan	Satuan British
1	Kalor hot product (input), Q_1	$16,424 \times 10^9$	kJ/h	$15,577 \times 10^9$	Btu/h
2	Kalor air umpan ketel (input), Q_6	$1,949 \times 10^9$	kJ/h	$1,849 \times 10^9$	Btu/h
3	Kalor uap/steam yang dibangkitkan (output), Q_4	$15,870 \times 10^9$	kJ/h	$15,052 \times 10^9$	Btu/h
4	Kalor gas buang/flue gas (output), Q_2	$0,128 \times 10^9$	kJ/h	$0,121 \times 10^9$	Btu/h
5	Kalor yang hilang/losses (output), Q_5	$2,375 \times 10^9$	kJ/h	$2,253 \times 10^9$	Btu/h
6	Kalor yang dimanfaatkan, Q_3	$16,296 \times 10^9$	kJ/h	$15,456 \times 10^9$	Btu/h
7	Persentase Kalor yang hilang/losses, Q_5	14,46	%	14,46	%
8	Efisiensi ketel, η	84,76	%	84,76	%
9	Laju aliran uap (m_s)	5.750	kg/h	12.677	lb/h
10	Laju aliran gas (m_g), BTU no 56	7.121	kg/h	15.700	lb/h
11	Temperatur Pembakaran pada ruang bakar	1.543	°C	2.810	°F
12	Temperatur gas keluar ruang bakar/ Temperatur gas masuk pipa api	838	°C	1.540	°F
13	Temperatur gas keluar pipa api	208	°C	406	°F
14	Temperatur air umpan ketel	81	°C	178	°F
15	Konsumsi bahan bakar, BTU no 55	680,388	kg/h	1.500	lb/h
16	Kebutuhan udara pembakaran, BTU no 56	7.121	kg/h	15.700	lb/h
17	Indeks slagging	0,86% (sedang)			
18	Indeks fouling	Na ₂ O = 0,05% (rendah-sedang)			

Lampiran 8

Tabel Kondisi Proses BTU-Method Sebelum Ketel Uap Dibersihkan
Menggunakan Bahan Bakar Batubara Lignit

Kondisi Operasi			
<i>Bahan bakar: batubara lignit, Mallawa</i>			
<i>(tanggal 11 januari 2013)</i>			
Ultimate, % by wt		Proximate, % by wt	
<hr/>		<hr/>	
C	65,55	Moisture	9,20
H2	4,94	Volatiles	42,80
S	3,10	Fixed carbon	37,10
O2	5,20	Ash	10,90
N2	1,16		<hr/>
H2O	9,20		100
Ash	<hr/>		
	10,90		
	100		
Higher heating value (HHV) : 11.230 Btu/lb			
Excess air		31,0 % by wt	
Unburned carbon loss		0,23 % by wt	
Unaccounted loss		1,5 % by wt	
ABMA radiation loss (see Chapter 22)		0,4 % by wt	
Furnace exit gas temperature		1.607 F	

Lampiran 9

BTU-Method Sebelum Ketel Uap Dibersihkan Menggunakan Bahan Bakar
Batubara Lignit

Perhitungan pembakaran - metode BTU batubara lignit Mallawa (11 januari 2013)											
INPUT CONDITION - BY TEST OR SPESIFICATION					FUEL - Lignite coal,						
1	Excess air, at burner/leaving boiler/econ, % by weight	31	31		15	Ultimate Analysis	16	Theo air, lb/100 lb fuel	17	H ₂ O, lb/100 lb fuel	
2	Entering air temperature, F	80	80			Constituent % by weight	K1	[15] x K1	K2	[15] x K2	
3	Reference temperature, F	80	A	C	65,55		11,51	754,5			
4	Fuel temperature, F	80	B	S	3,10		4,32	13,4			
5	Air temperature leaving air heater, F		C	H ₂	4,94		34,29	169,4	8,94	44,1636	
6	Flue gas temperature leaving (excluding leakage), F	518	D	H ₂ O	9,20				1,00	9,20	
7	Moisture in air, lb/lb dry air	0,013	E	N ₂	1,16						
8	Additional moisture, lb/100 lb fuel	0	F	O ₂	5,20		-4,32	-22,5			
9	Residue leaving boiler/economiser, % total		G	Ash	10,90						
10	Output, 1,000,000 Btu/h	12,6	H	Total	100,05			Air	914,8	H ₂ O	53,3636
Corrections for sorbent (from table 14, Chapter 9 if used)											
11	Additional theoretical air, lb/10,000 Btu	Table 14, Item [21]	0	18	Higher heating value (HHV), Btu/lb fuel					11230	
12	CO ₂ from sorbent, lb/10,000 Btu	Table 14, Item [19]	0	19	Unburned carbon loss, % fuel input					0,23	
13	H ₂ O from sorbent, lb/10,000 Btu	Table 14, Item [20]	0	20	Theoretical air, lb/10,000 Btu			[16H] x 100 / [18]		8,146	
14	Spent sorbent, Lb/10,000 Btu	Table 14, Item [24]	0	21	Unburned carbon, % of fuel			[19] x [18] / 14.500		0,18	
COMBUSTION GAS CALCULATION, Quantity / 10,000 Btu Fuel Input											
22	Theoretical air (corrected), lb/10,000 Btu		[20] - [21] x 1151 / [18] + [11]							8,128	
23	Residue from fuel, lb/10,000 Btu		[(15G) + [21]] x 100 / [18]							0,099	
24	Total residue, lb/10,000 Btu		[23] + [14]							0,099	
25	Excess air, % by weight		A	At Burners	B	Infiltration	C	Leaving Furnace	D	Leaving Blr/Econ	
26	Dry air, lb/10,000 Btu			31,0		0,0		31,0		31,0	
27	H ₂ O from air, lb/10,000 Btu		(1 + [25] / 100) x [22]					10,647		10,647	
28	Additional moisture, lb/10,000 Btu		[8] x 100 / [18]					0,138	0,138	0,138	
29	H ₂ O from fuel, lb/10,000 Btu		[17H] x 100 / [18]					0,000	0,000	0,000	
30	Wet gas from fuel, lb/10,000 Btu		(100 - [15G] - [21]) x 100 / [18]					0,475		0,475	
31	CO ₂ from sorbent, lb/10,000 Btu		[12]							0,000	
32	H ₂ O from sorbent, lb/10,000 Btu		[13]					0,000	0,000	0,000	
33	Total wet gas, lb/10,000 Btu		Summation [26] through [32]					0,000	0,000	0,000	
34	Water in wet gas, lb/10,000 Btu		[33] - [34]					0,614	0,614	0,614	
35	Dry gas, lb/10,000 Btu		[33] - [34]					10,964		10,964	
36	H ₂ O in gas, % by weight		100 x [34] / [33]					5,30		5,30	
37	Residue, % by weight		[9] x [24] / [33]					0,00		0,00	
EFFICIENCY CALCULATIONS, % Input from Fuel											
Losses											
38	Dry gas, %		0.0024 x [35D] x ([6] - [3])							11,53	
39	Water from fuel as fired	Enthalpy of steam at 1 psi, T=[6]	H ₁ = (3.958E - 5 x T + 0.4329) x T + 1062.2					1297,1			
40	%	Enthalpy of water at T=[3]	H ₂ = [3] - 32					48,0			
41	Moisture in air, %		[29] x ([39] - [40]) / 100							5,94	
42	Unburned carbon, %		0.0045 x [27D] x ([6] - [3])							0,27	
43	Radiation and convection, %		[19] or [21] x 14.500 / [18]							0,23	
44	Anaccounted for and manufacturers margin, %		ABMA curve, Chapter 22							0,40	
45	Sorbent net losses, % if sorbent in used		From table 14 Item [41, Chapter 9]							1,50	
46	Summation of losses, %		Summation [38] through [46]							19,86	
Credits											
48	Heat in dry air, %		0.0024 x [26D] x ([2] - [3])							0,00	
49	Heat in moisture in air, %		0.0045 x [27D] x ([2] - [3])							0,00	
50	Sensible heat in fuel, %		(H at T[4] - H at T[3]) x 100 / [18]					0,00		0,00	
51	Other, %									0,00	
52	Summation of credits, %		Summation [48] through [51]							0,00	
53	Efficiency, %		100 - [47] + [52]							80,14	
KEY PERFORMANCE PARAMETERS								Leaving Furnace	Leaving Blr/Econ		
54	Input from fuel, 1,000,000 Btu/h		100 x [10] / [53]							15,7	
55	Fuel rate, 1000 lb/h		1000 x [54] / [18]							1,4	
56	Wet gas weight, 1000 lb/h		[54] x [33] / 10					18,2		18,2	
57	Air to burner (wet), lb/10,000 Btu		(1 + [7]) x (1 + [25A] / 100) x [22]					10,8			
58	Air to burner (wet), 1000 lb/h		[54] x [57] / 10					16,9			
59	Heat available, 1,000,000 Btu/h		[54] x ([18] - 10.30 x [17H]) / [18] - 0.005								
	H _a = 66.0 Btu/lb		x ([44] + [45]) + H _a at T[5] x [57] / 10.000					13,7			
60	Heat available/lb wet gas, Btu/lb		1000 x [59] / [56]					751,8			
61	Adiabatic flame temperature, F		From fig. 3, Chap. 10 at H = [60], % H ₂ O = [36]					2600			

Lampiran 10

Tabel Hasil Perhitungan Kesetimbangan Energi dan Prestasi Kerja Ketel Uap Sebelum Dibersihkan Menggunakan Bahan Bakar Batubara Lignit

No	Parameter	Bahan bakar : Batubara Lignite			
		Hasil Perhitungan	Satuan SI	Hasil Perhitungan	Satuan British
1	Kalor hot product (input), Q_1	$16,588 \times 10^6$	kJ/h	$15,733 \times 10^6$	Btu/h
2	Kalor air umpan ketel (input), Q_6	$1,762 \times 10^6$	kJ/h	$1,671 \times 10^6$	Btu/h
3	Kalor uap/steam yang dibangkitkan (output), Q_4	$15,033 \times 10^6$	kJ/h	$14,258 \times 10^6$	Btu/h
4	Kalor gas buang/flue gas (output), Q_2	$0,167 \times 10^6$	kJ/h	$0,158 \times 10^6$	Btu/h
5	Kalor yang hilang/losses (output), Q_5	$3,150 \times 10^6$	kJ/h	$2,988 \times 10^6$	Btu/h
6	Kalor yang dimanfaatkan, Q_3	$16,421 \times 10^6$	kJ/h	$15,575 \times 10^6$	Btu/h
7	Persentase Kalor yang hilang/losses, Q_5	18,99	%	18,99	%
8	Efisiensi ketel, η	80	%	80	%
9	Laju aliran uap (m_s)	5.449	kg/h	12.013	lb/h
10	Laju aliran gas (m_g), BTU no 56	8.255	kg/h	18.200	lb/h
11	Temperatur Pembakaran pada ruang bakar	1.427	°C	2.600	°F
12	Temperatur gas keluar ruang bakar/ Temperatur gas masuk pipa api	875	°C	1.607	°F
13	Temperatur gas keluar pipa api	270	°C	518	°F
14	Temperatur air umpan ketel	77	°C	171	°F
15	Konsumsi bahan bakar, BTU no 55	635,029	kg/h	1.400	lb/h
16	Kebutuhan udara pembakaran, BTU no 56	8.255	kg/h	18.200	lb/h
17	Indeks slagging	1,42% (sedang)			
18	Indeks fouling	Na ₂ O = 0,34% (rendah-sedang)			

Lampiran 11

Tabel Kondisi Proses BTU-Method Setelah Ketel Uap Dibersihkan
Menggunakan Bahan Bakar Batubara Lignit

Kondisi Operasi			
<i>Bahan bakar: batubara lignit, Mallawa (tanggal 27 pebruari 2013)</i>			
Ultimate, % by wt		Proximate, % by wt	
C	65,01	Moisture	8,10
H2	4,90	Volatiles	42,10
S	1,16	Fixed carbon	37,10
O2	6,97	Ash	12,70
N2	1,16		100
H2O	8,10		
Ash	12,70		
	100		
Higher heating value (HHV) :		11.189	Btu/lb
Excess air			30,0 % by wt
Unburned carbon loss			0,23 % by wt
Unaccounted loss			1,5 % by wt
ABMA radiation loss (see Chapter 22)			0,4 % by wt
Furnace exit gas temperature		1.555	F

Lampiran 13

Tabel Hasil Perhitungan Keseimbangan Energi dan Prestasi Kerja Ketel Uap Setelah Dibersihkan Menggunakan Bahan Bakar Batubara Lignit

No	Parameter	Bahan bakar : Batubara Lignite			
		Hasil Perhitungan	Satuan SI	Hasil Perhitungan	Satuan British
1	Kalor hot product (input), Q_1	$16,527 \times 10^9$	kJ/h	$15,675 \times 10^9$	Btu/h
2	Kalor air umpan ketel (input), Q_6	$1,801 \times 10^9$	kJ/h	$1,708 \times 10^9$	Btu/h
3	Kalor uap/steam yang dibangkitkan (output), Q_4	$15,938 \times 10^9$	kJ/h	$15,115 \times 10^9$	Btu/h
4	Kalor gas buang/flue gas (output), Q_2	$0,096 \times 10^9$	kJ/h	$0,093 \times 10^9$	Btu/h
5	Kalor yang hilang/losses (output), Q_5	$2,294 \times 10^9$	kJ/h	$2,175 \times 10^9$	Btu/h
6	Kalor yang dimanfaatkan, Q_3	$16,431 \times 10^9$	kJ/h	$15,584 \times 10^9$	Btu/h
7	Persentase Kalor yang hilang/losses , Q_5	13,88	%	13,88	%
8	Efisiensi ketel, η	85,54	%	85,54	%
9	Laju aliran uap (m_s)	5.800	kg/h	12.787	lb/h
10	Laju aliran gas (m_g), BTU no 56	7.983	kg/h	17.600	lb/h
11	Temperatur Pembakaran pada ruang bakar	1.360	°C	2.480	°F
12	Temperatur gas keluar ruang bakar/ Temperatur gas masuk pipa api	846	°C	1.555	°F
13	Temperatur gas keluar pipa api	171	°C	339	°F
14	Temperatur air umpan ketel	74,2	°C	166	°F
15	Konsumsi bahan bakar, BTU no 55	635,029	kg/h	1.400	lb/h
16	Kebutuhan udara pembakaran, BTU no 56	7.983	kg/h	17.600	lb/h
17	Indeks slagging	1,42% (sedang)			
18	Indeks fouling	Na ₂ O = 0,34% (rendah-sedang)			

Lampiran 14

Tabel Hasil Perhitungan Keseimbangan Energi dan Prestasi Kerja Ketel Uap Sebelum dan Setelah Dibersihkan

No	Parameter	Menggunakan 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete sebelum ketel uap dibersihkan	Menggunakan batubara lignit sebelum ketel uap dibersihkan	Menggunakan batubara lignit setelah ketel uap dibersihkan
1	Temperatur pembakaran (°C)	1.543	1.427	1.360
2	Temperatur gas keluar ruang bakar (°C)	838	875	846
3	Temperatur gas keluar pipa api (°C)	208	270	171
4	Laju alir massa uap/steam (kg/h)	5.750	5.449	5.800
5	Efisiensi ketel uap (%)	84,76	80	85,54
6	Kalor hot product (input), Q_1 (kJ/h)	$16,424 \times 10^6$	$16,588 \times 10^6$	$16,527 \times 10^6$
7	Kalor air umpan ketel (input), Q_6 (kJ/h)	$1,949 \times 10^6$	$1,762 \times 10^6$	$1,801 \times 10^6$
8	Kalor uap/steam yang dibangkitkan (output), Q_4 (kJ/h)	$15,870 \times 10^6$	$15,033 \times 10^6$	$15,938 \times 10^6$
9	Kalor gas buang/flue gas (output), Q_2 (kJ/h)	$0,128 \times 10^6$	$0,167 \times 10^6$	$0,096 \times 10^6$
10	Kalor yang hilang/losses (output), Q_5 (kJ/h)	$2,375 \times 10^6$	$3,150 \times 10^6$	$2,294 \times 10^6$
11	Kalor yang dimanfaatkan, Q_3 (kJ/h)	$16,296 \times 10^6$	$16,421 \times 10^6$	$16,431 \times 10^6$
12	Indeks slagging (%)	0,86%	1,42%	1,42%
13	Indeks fouling Na_2O (%)	0,05%	0,34%	0,34%

Lampiran 15

Hasil Perhitungan Indeks Slagging dan Fouling

No	Bahan Bakar yang Digunakan	Indeks slagging	Kategori	Indeks fouling	Kategori
1	Batubara	1,42%	sedang	CaO + MgO + Fe ₂ O ₃ > 20% Na ₂ O = 0,34% Na ₂ O < 3	rendah - sedang
2	60% batubara dan 40% cangkang biji jambu mete	0,86%	sedang	CaO + MgO + Fe ₂ O ₃ > 20% Na ₂ O = 0,05% Na ₂ O < 3	rendah - sedang

Lampiran 16

Perhitungan Ekonomi

Data pembiayaan :

- Harga batubara = Rp. 650/kg
- Harga cangkang biji jambu mete = Rp. 700/kg
- Biaya transport bahan bakar yg tidak terbakar ke PPLI = Rp. 1.520/kg
- Biaya pengemasan bahan bakar yg tidak terbakar = Rp. 30/kg

Bila menggunakan batubara lignit

- Uap yang dihasilkan = 5.449 kg/h
- Bahan bakar yang digunakan = 635,029 kg/h
- Bahan bakar yang tidak terbakar = 0,23%

Biaya harga bahan bakar perjam = 635,029 kg x Rp. 700/kg
= Rp. 444.520,3

Biaya penanganan bahan bakar yang tidak terbakar :

- Jh bahan bakar yang tidak terbakar perjam = 0,23% x 635,029 kg = 1,46 kg

- Biaya transport bahan bakar yg tidak terbakar ke PPLI = 1,46kg x Rp.1.520/kg
= Rp. 2.219,2

-Biaya pengemasan bahan bakar yang tidak terbakar = 1,46 kg x Rp.30/kg
= Rp. 43,8

Total biaya penanganan bahan bakar yg tidak terbakar = Rp.2.219,2 + Rp.43,8
= Rp. 2.263

Biaya perjam bila menggunakan batubara lignit = Rp. 444.520,3 + Rp. 2.263
= Rp. 446.783,3

Bila menggunakan campuran 60% batubara lignit dan 40% cangkang biji jambu mete

- Uap yang dihasilkan = 5.750 kg/h
- Bahan bakar yang digunakan = 680,338 kg/h
- Bahan bakar yang tidak terbakar = 0,14%

Biaya harga bahan bakar perjam :

Jumlah bahan bakar perjam = $\frac{5.449\text{kg}}{5.750\text{kg}} \times 635,029\text{kg} = 601,787\text{kg}$

$$\text{Jumlah batubara lignit perjam} = \frac{60}{100} \times 601,787 \text{ kg} = 361,072 \text{ kg}$$

$$\text{Jumlah cangkang biji jambu mete perjam} = \frac{40}{100} \times 601,787 \text{ kg} = 240,715 \text{ kg}$$

$$\text{Biaya harga batubara lignit perjam} = 361,072 \text{ kg} \times \text{Rp. } 700/\text{kg} = \text{Rp. } 252.750,54$$

$$\begin{aligned} \text{Biaya harga cangkang biji jambu mete perjam} &= 240,715 \text{ kg} \times \text{Rp. } 650/\text{kg} \\ &= \text{Rp. } 156.464,62 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Biaya harga bahan bakar perjam} &= \text{Rp. } 252.750,54 + \text{Rp. } 156.464,62 \\ &= \text{Rp. } 409.215,16 \end{aligned}$$

Biaya penanganan bahan bakar yang tidak terbakar :

$$\text{- Jh bahan bakar yang tidak terbakar perjam} = 0,14\% \times 601,787 \text{ kg} = 0,84 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} \text{- Biaya transport bahan bakar yg tidak terbakar ke PPLI} &= 0,84 \text{ kg} \times \text{Rp. } 1.520/\text{kg} \\ &= \text{Rp. } 1.276,8 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{- Biaya pengemasan bahan bakar yang tidak terbakar} &= 0,84 \text{ kg} \times \text{Rp. } 30/\text{kg} \\ &= \text{Rp. } 25,2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Total biaya penanganan bahan bakar yg tidak terbakar} &= \text{Rp. } 1.276,8 + \text{Rp. } 25,2 \\ &= \text{Rp. } 1.302 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Biaya perjam bila menggunakan batubara lignit} &= \text{Rp. } 409.215,16 + \text{Rp. } 1.302 \\ &= \text{Rp. } 410.517,16 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Penghematan yang didapat perjam} &= \text{Rp. } 446.783,3 - \text{Rp. } 410.517,16 \\ &= \text{Rp. } 36.266,14 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Penghematan yang didapat untuk 1 ketel uap perhari} &= \text{Rp. } 36.266,14 \times 24 \\ &= \text{Rp. } 870.387,36 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Penghematan yang didapat untuk 3 ketel uap perhari} &= \text{Rp. } 870.387,36 \times 3 \\ &= \text{Rp. } 2.611.162,08 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Penghematan perbulan yang didapat untuk ketiga ketel uap} &= \text{Rp. } 2.611.162,08 \times 25 \\ &= \text{Rp. } 65.279.052 \end{aligned}$$

