

ANALISA PENURUNAN EFISIENSI PACKAGE BOILER TIPE PIPA AIR PADA PABRIK PUSRI IV PT PUPUK SRIWIDJAJA PALEMBANG

Fusito

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya
Jl.Raya Palembang Prabumulih km 32, Inderalaya-Ogan Ilir (30662)
Sumatera Selatan, Indonesia
Phone: +62-711-580272, FAX: +62-711-580272,

ABSTRAK

Penggunaan uap baik dalam pembangkit listrik maupun industri menyebabkan kebutuhan akan uap semakin besar. Untuk itu dibutuhkan suatu alat pengkonversi energi untuk mengubah energi bahan bakar menjadi energi potensial uap yang dalam hal ini alat yang digunakan adalah ketel uap.

Ketel uap adalah suatu bejana tertutup dimana uap diproduksi secara langsung dengan menyerap kalor yang diberikan oleh bahan bakar yang kemudian digunakan untuk menghasilkan uap air. Ketel uap dapat digolongkan berdasarkan fluida yang mengalir dalam ketel uap, yaitu : ketel uap pipa air dan ketel uap pipa api. PT. Pupuk Sriwidjaja dalam hal ini menggunakan ketel uap pipa air sebagai alat penghasil uap untuk keperluan industrinya. Ketel uap adalah alat yang dapat menggunakan berbagai jenis bahan bakar tergantung pada sumber daya yang ada, seperti batu bara, minyak bumi maupun gas alam. Yang dalam hal ini, bahan bakar yang digunakan oleh PT. Pupuk Sriwidjaja adalah gas alam. Komposisi yang terbesar yang dikandung oleh gas alam yang digunakan oleh PT. Pupuk Sriwidjaja adalah Metana (82.45% volume).

Performansi ketel uap dapat dilihat dari efisiensi pemakaian bahan bakarnya. Semakin besar efisiensinya berarti penggunaan energi akan semakin hemat, begitu pula sebaliknya.

PENDAHULUAN

I. 1. Latar Belakang

Peningkatan populasi penduduk dan makin meningkatnya kegiatan industri menyebabkan kebutuhan akan energi makin meningkat. Baik itu adalah pemakaian energi listrik maupun energi fosil. Oleh karena itu kebutuhan akan alat pengkonversi energi semakin meningkat. Salah satu alat yang banyak digunakan adalah ketel uap (*boiler*) yang digunakan untuk mengubah energi potensial pada bahan bakar fosil menjadi energi potensial uap.

Penemuan pembangkit uap, maupun penggunaan uap sebagai bagian dari industri menyebabkan kebutuhan akan uap semakin besar. Selain itu, penggunaan uap air sebagai bagian dari pembangkit energi maupun penggunaannya dalam industri menyebabkan makin dibutuhkannya ketel uap yang memiliki efisiensi yang tinggi. Karena hal itu berarti bahwa bahan bakar yang digunakan akan semakin sedikit. Namun kenyataan bahwa efisiensi ketel uap akan semakin menurun seiring dengan bergulirnya waktu bukanlah suatu hal yang dapat dipungkiri. Hal itu dapat disebabkan oleh karena

menurunnya kinerja komponen-komponen peralatan ketel uap yang semakin menurun.

I. 2. Tujuan dan Manfaat Penulisan

Tujuan dari penulisan skripsi ini adalah :

1. Menghitung penggunaan energi pada ketel uap dan energi yang dikandung oleh uap dengan menganalisa parameter-parameter yang digunakan alat tersebut.
2. Menghitung efisiensi ketel uap pada keadaan operasi.
3. Menghitung penurunan efisiensi ketel uap selama 10 tahun (1997-2007).

I. 3. Pembatasan Masalah

Dalam penulisan skripsi ini dibatasi hanya pada analisa teknik untuk mengetahui efisiensi ketel uap dan penurunan efisiensi ketel uap selama 10 tahun.

I. 4. Metode Penulisan

Metode yang penulis gunakan dalam penulisan skripsi ini adalah :



1. Metode observasi/survey, yaitu dengan melihat langsung ke lokasi, khususnya mengenai ketel uap pada pabrik PUSRI IV PT Pupuk Sriwidjaja Palembang.
2. Metode pengumpulan data, yaitu dengan mengambil langsung ke lapangan yaitu di pabrik PUSRI IV PT Pupuk Sriwidjaja Palembang.
3. Studi pustaka, yaitu dengan membahas dan mengkaji aspek-aspek yang ada di lapangan, kemudian mencari literatur-literatur yang menunjang pembahasan dan pengkajian tersebut.
4. Analisa data dan pembuatan kesimpulan, dilakukan setelah adanya kajian yang mendalam berdasarkan literatur yang menunjang dan masukan dari berbagai pihak yang berhubungan.

I. 5. Sistematika Penulisan

BAB I: PENDAHULUAN

Berisi latar belakang, pembatasan masalah, tujuan penulisan, metode penulisan, dan sistematika penulisan.

BAB II: TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tentang definisi ketel uap, komponen ketel uap, klasifikasi ketel uap, bahan bakar ketel uap, dan efisiensi ketel uap

BAB III: DATA SURVEI

Berisi tentang data-data survei ketel uap.

BAB IV: PERHITUNGAN DAN ANALISA DATA

Berisi tentang perhitungan energi uap, energi bahan bakar, efisiensi bahan bakar dan penurunan efisiensi ketel uap.

BAB V: KESIMPULAN

Berisi tentang kesimpulan dan saran-saran penting.

TINJAUAN PUSTAKA

II. 1. Pengertian Umum

Ketel uap adalah suatu mesin pembakaran luar dan mengubah energi kimia yang dikandung bahan bakar menjadi panas uap dalam bejana tertutup dimana uap atau gas-gas lainnya diproduksi dengan penggunaan secara langsung kalor yang dihasilkan dari pembakaran. Baik itu bahan bakar padat, gas maupun cair. Yang mana kalor dari pembakaran tersebut pada akhirnya akan disimpan oleh uap air yang dipanaskan pada ketel uap tersebut. Uap tersebut pada umumnya digunakan untuk melakukan suatu kerja, seperti sebagai penggerak turbin-turbin yang kemudian akan digunakan sebagai penggerak pompa, kompressor maupun generator, ataupun sebagai media pemanas pada heater.

Dengan kata lain, ketel uap adalah salah satu unit peralatan yang dapat menghasilkan uap secara terus menerus pada kondisi tekanan dan temperatur tertentu, akibat pemanasan air yang berada dalam suatu tempat oleh pembakaran bahan bakar. Dalam hal ini ketel uap berfungsi

sebagai alat pemindah panas dimana air sebagai fluida kerjanya. Terdapat beberapa alasan mengapa air dipilih sebagai fluida kerja, antara lain :

1. Air dapat menyimpan sejumlah energi.
2. Air mudah diproduksi dalam jumlah besar sebab bahan bakunya mudah didapat dan murah.

Prinsip dasar dari ketel uap adalah untuk mempercepat penguapan yang diperoleh dengan jalan pemanasan, maka ketel ini harus mempunyai komponen-komponen utama yaitu dapur (furnace) dan evaporator. Kedua komponen diatas telah dapat untuk memungkinkan sebuah ketel uap berfungsi. Namun untuk mendapatkan kinerja ketel ketel yang lebih efektif maka diperlukan peralatan lain.

II. 2. Komponen Utama Ketel Uap

Sebuah sistem pembangkit uap mempunyai komponen utama yang diperlukan untuk sebuah operasi efisien, antara lain:

1. Ruang Bakar (*Incinerator*):
Yaitu alat yang berfungsi sebagai tempat berlangsungnya proses pembakaran bahan bakar atau tempat awal terbentuknya gas asap.
2. Bagian Penguapan (*Evaporating section*)
Bidang pemanas ini berfungsi sebagai tempat berlangsungnya perpindahan panas antara gas hasil pembakaran yang membawa energi panas dengan air ataupun uap. Alat penguapan ini terdiri dari susunan pipa yang berisi air panas yang berasal dari *economizer*, air tersebut diubah menjadi uap air pada *evaporating section*.
3. Alat Penguapan lanjut (*Steam superheater*)
Yaitu berfungsi sebagai alat penguap lanjut yang terdiri atas susunan pipa-pipa yang berisikan uap jenuh, yang kemudian dipanaskan oleh gas asap hasil pembakaran bahan bakar sehingga didapat panas lanjut yang uapnya sudah kering.
4. *Economiser*
Gas asap setelah meninggalkan superheater, temperaturnya masih sangat tinggi sehingga merupakan kerugian panas yang besar bila gas asap tersebut langsung begitu saja melalui cerobong. Gas asap yang masih panas ini dapat dimanfaatkan untuk memanasi air terlebih dahulu sebelum dimasukkan ke dalam drum ketel, sehingga air telah mengalami pemanasan terlebih dahulu, tempat pemanasan air awal ini biasa disebut *Economizer/Water PreHeater*. *Ekonomizer* sekaligus berfungsi sebagai alat untuk



pemanasan awal air ketel yang terdiri dari pipa-pipa air yang dipanaskan.

5. *Air Heater*

Ketel uap biasanya dilengkapi dengan suatu alat yang berfungsi sebagai pemanas udara yang digunakan untuk pembakaran, sehingga pembakaran dapat berlangsung lebih cepat.

6. Cerobong

Alat yang digunakan sebagai tempat keluar gas asap sisa pembakaran ke udara sekitar.

7. *Desuperheater*

Desuperheater adalah suatu alat yang digunakan untuk mencampur *steam* dengan air yang dikabutkan (disemprotkan). Banyaknya air yang akan disemprotkan dikontrol oleh valve sesuai dengan temperatur *steam* yang diperlukan. *Desuperheater* dibuat dari bahan Cr dan Mo. Alat ini terletak setelah *outlet superheater*, untuk mengontrol temperatur agar tetap pada kondisi yang diinginkan.

II. 3. Klasifikasi Ketel Uap

Ketel uap dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

- Berdasarkan lokasi pemakaiannya:
 - Ketel tetap/stasioner (*stationary boiler*).
 - Ketel tidak tetap (*mobile or portable boiler*).
- Berdasarkan fluida yang mengalir dalam pipa:
 - Ketel pipa api (*fire-tube boiler*).
 - Ketel pipa air (*water-tube boiler*).
- Berdasarkan sistem peredaran air ketel:
 - Ketel dengan peredaran air secara alamiah (*natural circulation steam boiler*).
 - Ketel dengan peredaran air secara paksa (*forced circulation steam boiler*).
- Berdasarkan jumlah lorong:
 - Ketel dengan lorong tunggal.
 - Ketel dengan lorong ganda.
- Berdasarkan letak dapur (*furnace position*):
 - Ketel dengan pembakaran di dalam (*internally fired steam boiler*).
 - Ketel dengan pembakaran di luar (*externally fired steam boiler*).
- Berdasarkan sumber kalor untuk pembentukan uap:
 - Ketel uap dengan bahan bakar alamiah.
 - Ketel uap dengan bahan bakar buatan.
 - Ketel uap dengan dapur listrik.
 - Ketel uap dengan energi nuklir.
- Berdasarkan bentuk dan letak pipa:
 - Ketel dengan pipa lurus, bengkok dan berlekuk (*straight, bent and sinuous tubular heating surface*).
 - Ketel dengan pipa miring-datar atau miring tegak (*horizontal- or vertical-inclined tubular heating surface*).
- Berdasarkan sumbu tutup drum (*shell*):
 - Ketel tegak (*vertical steam boiler*).

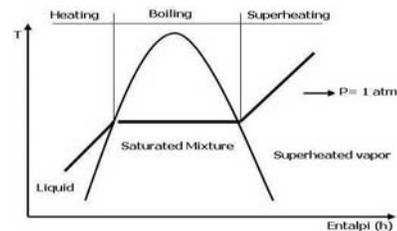
- Ketel mendatar (*horizontal steam boiler*).

II. 4. Proses Pembentukan Uap

Karena pembentukkan uap bergantung pada tekanan, maka proses pembentukkan uap diupayakan berada pada tekanan konstan. Bila 1 kg air dengan temperatur 20°C dipanaskan dalam sebuah bejana tertutup dengan tekanan konstan (1 atm), maka selama pemanasan tingkat pertama temperatur didih dicapai, uap mulai terbentuk. Uap ini dinamakan uap basah (*saturated liquid*), karena masih tercampur antara uap dengan butir – butir air.

Apabila semua uap termasuk butir – butir air yang tercampur dalam uap basah dipanaskan lagi maka akan didapatkan uap jenuh (*saturated vapour*) yaitu keadaan dimana uap tersebut dapat berwujud uap seluruhnya. Jumlah panas yang dibutuhkan untuk mengubah 1 kg air mendidih menjadi uap jenuh pada tekanan konstan dinamakan panas laten, bila pemanasan dilanjutkan maka temperatur uap jenuh itu menjadai naik dan uap itu dinamakan uap panas lanjut (*superheated vapour*).

Pada pembentukan uap pada ketel uap, udara dan bahan bakar dimasukkan kedalam dapur dan terjadi proses pembakaran. Gas – gas hasil pembakaran akan melewati *evaporator*, *superheater*, *air heater*, dan akhirnya dibuang ke atmosfer melalui cerobong asap. Sedangkan air pengisi, setelah mengalami pemanasan pada daerator, lalu dimasukkan kedalam evaporator dan selanjutnya uap jenuh dipanaskan lanjut pada alat yang dinamakan *superheater* dan akhirnya diperoleh uap panas lanjut atau *superheated steam*.



Gambar II. 1

Grafik T-s pada pembentukan uap

II. 5. Sirkulasi Air Pada Ketel Uap

Peredaran air dalam pipa-pipa pada suatu ketel uap adalah suatu hal yang sangat penting. Ketel uap harus dirancang sedemikian rupa sehingga dihindari terbentuknya uap dan keluar



dari pipa air yang berasal dari drum uap. Dengan kata lain, tidak boleh terjadi aliran balik.

Untuk mendapatkan pemanasan yang rata dari semua bagian-bagian ketel, terutama pada ketel uap pipa air, maka peredaran air yang sempurna harus dipertahankan agar tidak terjadi gelembung-gelembung udara dan uap pada dinding pipa serta penghentian pengeluaran uap dari pipa. Terjadinya gelembung-gelembung pada dinding pipa serta penghentian pengeluaran uap dapat menimbulkan korosi serta konsentrasi garam yang dapat merusak dinding pipa. Sirkulasi air dan uap dalam ketel uap terjadi karena :

1. Perbedaan berat jenis antara air dan uap.
2. Adanya campuran air dan uap.

Adapun jenis sirkulasi air pada ketel uap terdapat dua jenis, yaitu :

1. Sirkulasi Alamiah (*natural circulation*)
Pada sirkulasi ini, air mengalir dari drum atas melalui pipa-pipa turun (*downcomers*) yang terletak pada bagian ketel yang relatif dingin, turun ke bawah ke drum lumpur (*mud drum*). Dari sini, air atau uap mengalir kembali ke drum uap setelah melalui pipa-pipa evaporator atau pipa-pipa naik (*riser*).
2. Sirkulasi Paksa (*forced circulation*)
Pada sirkulasi paksa ini, fluida dipompakan melalui evaporator. Hal ini menyebabkan ketel dapat bekerja dengan tekanan yang sangat tinggi.

II. 6. Pengolahan Air Umpan Pada Boiler

Air yang digunakan pada boiler adalah air yang telah dibebasmineralkan (air demin) karena kandungan mineral pada air dapat meusak bagian-bagian pada boiler. Untuk menghilangkan kandungan mineral pada air, dapat menggunakan langkah Flokulasi dan penjernihan. Flokulasi adalah proses penghilangan partikel-partikel tersuspensi dalam air baik yang berukuran besar maupun senyawa koloidal yang tersuspensi dalam air. Kadar kandungan partikel-partikel ini dinyatakan sebagai kekeruhan (*turbidity*). Adapun langkah-langkah flokulasi adalah :

1. Proses filtrasi
Filtrasi adalah proses penyaringan kotoran berukuran besar. Pengotor yang disaring adalah senyawa-senyawa organik, partikel-partikel halus, senyawa warna dan mikroorganisme.
2. Koagulasi
Hal ini dilakukan untuk menghilangkan kotoran-kotoran berupa senyawa-senyawa yang bersifat ionik.

Air yang dihasilkan dari proses di atas disebut dengan air demineral (air demin). Namun pada air demin masih terdapat gas-gas terlarut seperti karbon dioksida dan oksigen yang dapat menyebabkan korosi pada pipa dan tube. Untuk menghilangkan larutan gas-gas tersebut dilakukan proses deaerasi. Proses deaerasi dilakukan pada deaerator dalam dua tahap, yaitu :

1. Secara mekanis

Proses deaerasi secara mekanis dilakukan dengan melakukan proses stripping dengan low steam (LS). Hal ini dapat menghilangkan larutan oksigen dan karbon dioksida dengan hingga 0.007 ppm.

2. Secara kimia

Proses deaerasi secara kimia dilakukan dengan menginjeksikan larutan hydrazine (N_2H_4).

Hasil akhir dari proses deaerasi disebut dengan *Boiler Feed Water* (BFW) yang kemudian digunakan sebagai air umpan pada ketel uap.

II. 7. Bahan Bakar Pada Ketel Uap

Secara teknis yang dimaksud dengan bahan bakar adalah semua material yang dapat terbakar. Sedangkan secara komersial, yang disebut dengan bahan bakar adalah setiap material yang memiliki nilai kalor tertentu dan mampu bereaksi dengan oksigen dalam udara untuk menghasilkan kalor. Umumnya bahan bakar diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama, yaitu :

1. Bahan bakar padat (*solid fuel*)
2. Bahan bakar cair (*liquid fuel*)
3. Bahan bakar gas (*gaseous fuel*)

Berdasarkan proses terjadinya, bahan bakar dapat dibedakan menjadi bahan bakar alami dan bahan bakar buatan. Selengkapnya dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel II. 1 Jenis bahan bakar pada ketel uap

No.	Jenis bahan bakar	Alami	Buatan
1	Bahan bakar padat	Wood, peat, lignite, bituminous, antrasit	Arang kayu, kokas, briket, ampas tebu, ampas kelapa sawit, tempurung kelapa
2	Bahan bakar cair	Minyak mentah	Bensin, kerosin, fuel oils
3	Bahan bakar gas	Gas methane (CH_4), gas ethane (C_2H_6), karbon monoksida (CO), LNG, LPG	Coal gas, water gas, mond gas, gas dapur tinggi, coke oven gas, produser gas.



Suatu ketel membutuhkan suatu sumber kalor pada tingkat temperatur yang cukup tinggi untuk memproduksi uap. Bahan bakar fosil yang digunakan untuk pembangkit uap biasanya dibakar langsung dalam dapur ketel, meskipun kalor untuk pembangkit uap tersebut dapat juga dalam bentuk kalor pembuangan (kalor sisa) dari proses lain.

Pembakaran dapat didefinisikan sebagai perpaduan kimia yang cepat antara oksigen dengan elemen-elemen yang dapat terbakar dari suatu bahan bakar. Terdapat hanya tiga elemen kimia yang penting yang dapat terbakar yaitu karbon (C), hidrogen (H) dan sulfur (S). Sulfur biasanya mempunyai arti yang kecil sebagai sumber kalor tetapi dapat merupakan unsur utama dalam hal masalah-masalah korosi dan polusi.

Setiap bahan bakar yang mengandung hidrogen akan menghasilkan air (H₂O) sebagai salah satu produk hasilnya. Air yang dihasilkan dapat berbentuk cair, gas maupun campuran dua fasa. Jika air yang dibentuk saat pembakaran hidrogen dalam bahan bakar dapat terkondensasi, jumlah kalor yang dapat diperoleh akan lebih besar dibandingkan dengan jika air yang terbentuk dalam bentuk gas.

Karena itu, dikenal dua macam nilai pembakaran atau nilai kalor :

1. Nilai pembakaran atas/*Higher Heating Value* (HHV)

Bila uap air suatu pembakaran terkondensasi sehingga harus memperhitungkan panas laten dari penguapan tersebut. Nilai pembakaran atas pada liquid fuel yang berguna untuk perhitungan kerugian kalor dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$HHV = 14500 C + 62000 \left(H_2 - \frac{O}{8} \right) + 4000 S$$

Dimana :

- HHV = Nilai pembakaran atas/*Higher Heating Value* (HHV)
- C = % karbon dalam bahan bakar
- H = % hidrogen dalam bahan bakar
- O = % oksigen dalam bahan bakar
- S = % sulfur dalam bahan bakar

2. Nilai Pembakaran Bawah/*Lower Heating Value* (LHV)

Bila uap air suatu pembakaran tidak terkondensasi dan muncul seluruhnya dalam bentuk gas sehingga tidak memperhitungkan panas laten dari penguapan tersebut. Nilai pembakaran bawah pada liquid fuel yang berguna untuk perhitungan kerugian kalor dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$LHV = HHV - 9720 H_2 - 1110W$$

Dimana :

LHV = nilai pembakaran bawah/*Lower*

Heating Value (LHV)

- H₂ = persentase hidrogen di dalam bahan bakar
- W = kadar uap air yang terkandung di dalam udara

II. 9. Kerugian-Kerugian Kalor

Panas yang dihasilkan pada pembakaran tidak semuanya digunakan untuk menguapkan air. Sedangkan dari panas ini terpakai untuk penguapan air yang terdapat pada bahan bakar dan sebagian lagi hilang terbuang bersama gas asap. Kehilangan panas ini biasanya dinyatakan sebagai kerugian-kerugian panas. Dalam perhitungan, kerugian-kerugian panas utama yang perlu dipertimbangkan adalah :

1. Kerugian cerobong
2. Kerugian akibat penguapan air pada bahan bakar
3. Kerugian akibat penguapan air yang berasal dari pembakaran hidrogen
4. Kerugian akibat kandungan air dalam udara
5. Kerugian radiasi
6. Kerugian akibat pembakaran tidak sempurna

II. 9. Efisiensi Ketel Uap

Efisiensi ketel uap merupakan perbandingan antara energi yang diberikan sebagai kerja (energi uap) terhadap energi yang diserap sistem (energi bahan bakar). Dapat dihitung dengan persamaan :

$$\eta_k = \frac{Q_{uap}}{Q_{bb}} \times 100\%$$

Dimana :

- η_k = efisiensi ketel uap
- Q_{uap} = energi uap yang dihasilkan (MW)
- Q_{bb} = energi bahan bakar (MW)

DATA SURVEI

Data Ketel Uap

Adapun data spesifikasi ketel uap adalah :

- Merk : Keystone Packaged Steam Boiler
- Jenis ketel uap : Ketel uap pipa air
- Kapasitas uap desain : 100 T/H
- Tekanan desain : 47.18 kg/cm²
- Temperatur uap : 400 °C
- Temperatur udara (*ambient*) : 25 °C



- Kelembaban udara relatif: 85%

h_{fw} = Entalphi Feed Water (kJ/kg)

Data Mekanis

	Ekonomizer	Superheater	Evaporator
Panjang	5'2" x 2		6'1-9/16" x 2
Tebal	0.105"	0.165"	0.12"
Diameter	2.0" OD	2-1/2" OD	2.0" OD
Jumlah tube	16	3 x 17	15 x 115
Bahan	Carbon steel SA-178 GR A	Carbon steel SA 213 T-22	Carbon steel SA 178 GR A

Data Bahan Bakar

Adapun data bahan bakar adalah :

- Bahan bakar : Gas alam (*Natural Gas*)
- Jenis bahan bakar : bahan bakar fosil
- Komposisi bahan bakar
 - Metana (CH₄) : 82.45 %
 - Etana (C₂H₆) : 6.15 %
 - Propana (C₃H₈) : 3.74 %
 - Iso Butana (Iso-C₄H₁₀) : 0.66 %
 - Normal Butana (n- C₄H₁₀) : 0.78 %
 - Iso Pentana (Iso-C₅H₁₂) : 0.29 %
 - Normal pentana (n- C₅H₁₂): 0.20 %
 - Heksana (C₆H₁₄) : 0.13 %
 - Karbon Dioksida : 5.60 %
- Specific Gravity : 0.7079
- Supply pressure : 0.88 kg/cm²
- Laju aliran : 5963,9 Nm³/H

Data Gas Hasil Pembakaran

- Karbon dioksida (CO₂) : 10.8 %
- Karbon Monoksida (CO) : 0.06 %
- Uap air (H₂O) : 15.2 %
- Nitrogen (N₂) : 70.18 %
- Oksigen (O₂) : 3.76 %

PERHITUNGAN DAN ANALISA DATA

IV. 1. Perhitungan Energi Uap

Untuk menghitung besarnya energi uap yang dihasilkan pada ketel uap, dapat digunakan persamaan di bawah ini :

$$Q_{uap} = \dot{m}_{uap} (h_u - h_{fw})$$

Dimana :

- Q_{uap} = Energi uap yang dihasilkan (MW)
- \dot{m}_{uap} = Laju aliran massa uap (kg/s)
- h_u = Entalphi uap (kJ/kg)

Dari perhitungan dengan menggunakan persamaan di atas, di dapat :

Data tahun 1997

Tabel IV. 1 Energi uap

Jam	P (bar)	\dot{m}_{uap}	Q _{uap}
00.00	43.2	76.6	35.959
02.00	43.3	76.6	35.941
04.00	43.3	76.8	36.034
06.00	43.4	76.8	36.041
08.00	43.4	76.5	35.901
10.00	43.4	76.6	35.949
12.00	43.4	76.4	35.854
14.00	43.3	76.4	35.847
16.00	43.4	76.8	36.041
18.00	43.2	76.6	35.959
20.00	43.4	76.6	35.959
22.00	43.2	76.5	35.912
Rata-rata			35.950

Data tahun 2007

Tabel IV. 2 Energi uap

Jam	P (bar)	\dot{m}_{uap}	Q _{uap}
00.00	43.2	76.0	35.675
02.00	43.3	76.8	36.029
04.00	43.2	77.2	36.233
06.00	43.4	77.0	36.115
08.00	43.4	76.4	35.865
10.00	43.5	78.0	36.568
12.00	43.4	76.3	35.785
14.00	43.2	75.9	35.630
16.00	43.2	76.9	36.100
18.00	43.6	77.3	36.222
20.00	43.9	76.2	36.502
22.00	44.0	76.7	35.878
Rata-rata			36.050

IV. 2. Perhitungan Pembakaran

IV. 2. 1. Reaksi Kimia Pembakaran

Untuk mengetahui nilai pembakaran bahan bakar, maka harus diketahui komposisi kimia bahan bakar yang digunakan. Dalam hal ini bahan bakar yang digunakan adalah gas alam (*natural gas*). Dan komposisi kimia dari bahan bakar yang digunakan dapat dilihat pada tabel dibawah ini :

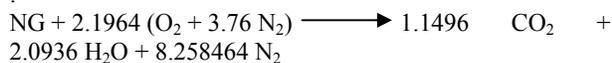


Tabel IV. 3 Komposisi kimia gas alam

Unsur	% volume
Metana (CH ₄)	82.45
Etana (C ₂ H ₆)	6.15
Propana (C ₃ H ₈)	3.74
Iso Butana (Iso-C ₄ H ₁₀)	0.66
Normal Butana (n-C ₄ H ₁₀)	0.78
Iso Pentana (Iso-C ₅ H ₁₂)	0.29
Normal pentana (n-C ₅ H ₁₂)	0.20
Heksana (C ₆ H ₁₄)	0.13

Jumlah udara yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna adalah % udara teoritis dikalikan dengan udara yang dibutuhkan untuk pembakaran. Dimana udara teoritis adalah jumlah 100% udara dan *excess air*.

Untuk reaksi pembakaran dengan 100% udara teoritis dari bahan bakar gas alam, jumlah udara yang dibutuhkan dapat dihitung dengan persamaan reaksi berikut :



IV.2. 2. Perhitungan Nilai Pembakaran Atas (*Higher Heating Value*)/LHV Bahan Bakar

Dengan menggunakan persamaan :

$$HHV = 14500 C + 6200 \left(H_2 - \frac{O}{8} \right) + 4000 S \text{ (Btu/lb)}$$

Maka dapat dihitung nilai pembakaran atas bahan bakar. Dari perhitungan di dapat nilai persentase C dan H pada bahan bakar adalah :

$$\begin{aligned} \% C &= 71.5275\% \\ \% H &= 22.8728\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} HHV &= 14500 (71.5275\%) + 62000 (22.8728\% \\ &\quad - \frac{0}{8}) + 4000 (0) \\ &= 10371.48 + 14181.136 + 0 \\ &= 24552.616 \text{ Btu/lb} \end{aligned}$$

IV. 2. 3. Perhitungan Jumlah Uap Air Dalam Udara

Untuk pembakaran ideal, biasanya udara diasumsikan dalam keadaan kering (tidak terdapat uap air dalam udara). Namun pada kenyataan, udara di atmosfer bumi bukanlah udara kering karena masih mengandung uap air dengan kadar tertentu yang tergantung pada tingkat kelembaban dan temperatur udara.

Jumlah kandungan uap air dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$W =$$

Dimana :

M = jumlah uap air per jumlah udara kering

P_w = tekanan parsial uap air dalam udara (psi)

Dari *Properties Of Saturated Water Temperature Table*, tekanan parsial uap air pada suhu 25 °C adalah 0.03169 bar. Sehingga di dapat: $W = 0.017$ lb uap air/lb udara kering

IV. 2. 4. Perhitungan Nilai Pembakaran Bawah (*Lower Heating Value*)/LHV Bahan Bakar

Nilai pembakaran bawah bahan bakar (LHV) dapat ditentukan dengan persamaan :

$$LHV = HHV - 9720 H_2 - 1110W \text{ (Btu/lb)}$$

Dimana :

HHV = nilai pembakaran atas bahan bakar (Btu/lb)

H_2 = persentase Hidrogen dalam bahan bakar

W = kadar uap air yang terkandung dalam udara

Jadi,

$$\begin{aligned} LHV &= 24552.616 - 9720 (0.228728) - 1110 \\ &\quad (0.017) \\ &= 24552.616 - 2223.24 - 18.87 \\ &= 22310.506 \text{ Btu/lb} \end{aligned}$$

Jadi nilai LHV bahan bakar adalah 22310.506 Btu/lb.

IV. 2. 5. Perhitungan Energi Bahan Bakar

Jumlah keseluruhan energi bahan bakar dapat dihitung dengan persamaan :

$$Q_{bb} = \dot{m}_{gas} \times LHV$$

Dimana :

Q_{bb} = energi bahan bakar yang digunakan (MW)

\dot{m}_{gas} = jumlah aliran massa gas (kg/s)

LHV = nilai pembakaran bawah (*Lower Heating Value*) bahan bakar (Btu/lb)

Dari perhitungan di atas di dapat :



Data tahun 1997

Tabel IV. 4 Energi Bahan Bakar

Jam	\dot{V}_{gas}	\dot{m}_{gas}	Q_{bb}
00.00	5893	1.403	72.870
02.00	5882	1.400	72.714
04.00	5880	1.399	72.633
06.00	5870	1.397	72.559
08.00	5880	1.399	72.663
10.00	5878	1.399	72.663
12.00	5886	1.401	72.766
14.00	5892	1.403	72.870
16.00	5888	1.402	72.818
18.00	5870	1.397	72.559
20.00	5860	1.395	72.455
22.00	5866	1.396	72.507
Rata-rata			72.673

Data tahun 2007

Tabel IV. 5 Energi Bahan Bakar

Jam	\dot{V}_{gas}	\dot{m}_{gas}	Q_{bb}
00.00	6201	1.476	76.662
02.00	6205	1.477	76.714
04.00	6196	1.475	76.610
06.00	6199	1.476	76.662
08.00	6177	1.471	76.402
10.00	6177	1.471	76.402
12.00	6172	1.469	76.298
14.00	6173	1.470	76.350
16.00	6192	1.474	76.557
18.00	6200	1.476	76.662
20.00	6198	1.475	76.661
22.00	6199	1.476	76.662
Rata-rata			76.554

IV. 3. Efisiensi Ketel Uap

Efisiensi ketel uap adalah perbandingan antara energi yang diserap oleh sistem (energi uap) terhadap energi yang diberikan pada sistem (energi bahan bakar). Energi ketel uap dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$\eta = \frac{Q_{uap}}{Q_{sistem}} \times 100\%$$

Dimana :

η = efisiensi ketel uap (%)

Q_{uap} = energi uap (MW)

Q_{bb} = energi bahan bakar (MW)

Berdasarkan perhitungan di atas di dapat :

Data tahun 1997

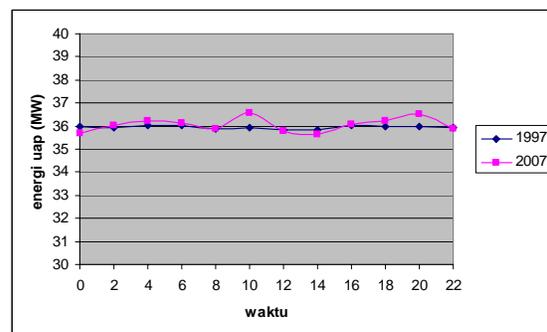
Tabel IV. 6 Efisiensi Ketel Uap

Jam	Q_{uap} (MW)	Q_{bb} (MW)	η (%)
00.00	35.959	72.870	49.35
02.00	35.941	72.714	49.43
04.00	36.034	72.633	49.61
06.00	36.041	72.559	49.67
08.00	35.901	72.663	49.41
10.00	35.949	72.663	49.47
12.00	35.854	72.766	49.27
14.00	35.847	72.870	49.19
16.00	36.041	72.818	49.50
18.00	35.959	72.559	49.56
20.00	35.959	72.455	49.63
22.00	35.912	72.507	49.53
Rata-rata			49.47

Data tahun 2007

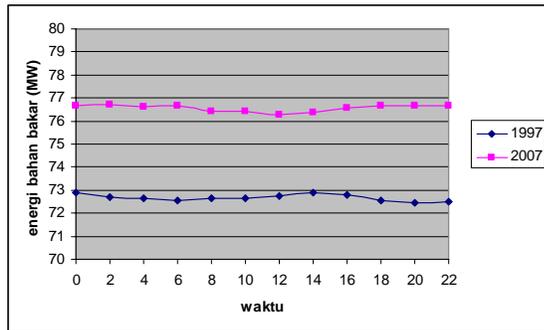
Tabel IV. 7 Efisiensi Ketel Uap

Jam	Q_{uap} (MW)	Q_{bb} (MW)	η (%)
00.00	35.675	76.662	46.54
02.00	36.029	76.714	46.97
04.00	36.233	76.610	47.30
06.00	36.115	76.662	45.81
08.00	35.865	76.402	46.94
10.00	36.568	76.402	47.86
12.00	35.785	76.298	46.90
14.00	35.630	76.350	46.67
16.00	36.100	76.557	47.15
18.00	36.222	76.662	47.25
20.00	36.502	76.661	47.61
22.00	35.878	76.662	46.31
Rata-rata			46.94

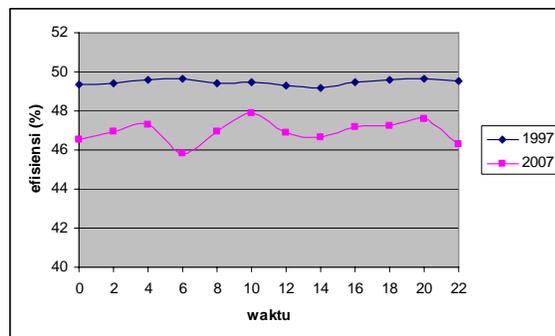


Gambar IV. 1
Grafik perbandingan energi uap tahun 1997 dan 2007





Gambar IV. 2
Grafik perbandingan energi bahan bakar yang diberikan Tahun 1997 dan 2007



Gambar IV. 3
Grafik perbandingan efisiensi tahun 1997 dan 2007

IV. 4. Analisa dan Pembahasan

IV. 4. 1. Energi Uap

Dari hasil perhitungan di atas, dapat dianalisa bahwa pada tabel IV. 2 dan IV. 5 rata-rata energi yang diberikan pada uap adalah 35.950 MW pada tahun 1997 dengan energi maksimum adalah 36.041 MW dan energi minimum adalah 35.901 MW. Sedangkan untuk tahun 2007, rata-rata energi yang diberikan pada uap adalah 36.050 MW dengan energi maksimum adalah 36.568 MW dan energi minimum adalah 35.630 MW. Perbandingan energi yang diberikan pada uap pada tahun 1997 dan 2007 dapat dilihat pada tabel IV.1 dan IV.2.

IV. 4. 2. Energi Bahan Bakar

Pada tabel IV. 3 dan IV. 6 dapat diketahui bahwa energi rata-rata yang dikandung bahan bakar adalah 72.673 MW dengan energi maksimum adalah 72.870 MW dan energi minimum adalah 72.455 MW. Sedangkan untuk tahun 2007 energi rata-rata yang dikandung bahan bakar adalah 76.554 MW dengan energi maksimum adalah 76.714 MW dan energi minimum adalah 76.350 MW. Perbandingan energi yang dimiliki bahan bakar pada tahun 1997 dan 2007 dapat dilihat pada tabel IV.4 dan IV. 5

IV. 4. 3 Efisiensi

Pada tabel IV. 4 dan IV. 7 dapat diketahui bahwa efisiensi rata-rata pada tahun 1997 adalah 49.47% dengan efisiensi maksimum adalah 49.67% dan efisiensi minimum adalah 49.19%. sedangkan pada tahun 2007, efisiensi rata-ratanya adalah 46.94% dengan efisiensi maksimum adalah 47.86% dan efisiensi minimum adalah 46.31%.

Nilai efisiensi adalah sebanding dengan energi uap yang dihasilkan dan berbanding terbalik dengan energi bahan bakar yang diberikan. Hal itu berarti bahwa bila semakin besar energi yang dikandung uap maka efisiensi akan semakin besar, dan bila energi bahan bakar yang diberikan semakin besar, maka nilai efisiensi akan semakin kecil.

Pada gambar IV. 1, IV. 2, dan IV. 3 dapat dilihat bahwa energi uap yang dihasilkan oleh ketel uap mempunyai kisaran yang tidaklah terlalu jauh, 35.950 MW pada tahun 1997 dan 35,050 MW pada tahun 2007 (gambar IV. 7). Tetapi pada gambar IV. 8 terlihat bahwa energi bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan uap mempunyai kisaran yang signifikan, 72.673 MW pada tahun 1997 dan 76.554 MW pada tahun 2007 (gambar IV. 8). Hal ini menyebabkan efisiensi yang terjadi pada ketel uap antara tahun 1997 dan 2007 mengalami penurunan yaitu 49.47% pada tahun 1997 dan 46.94% pada tahun 2007. Penurunan efisiensi yang terjadi selama 10 tahun dari tahun 1997 hingga tahun 2007 adalah sebesar 2,53%.

Penurunan efisiensi disebabkan karena semakin banyaknya kerugian-kerugian kalor (*heat losses*) yang terjadi, sehingga energi bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan energi yang sama pada uap akan semakin besar. Dengan kata lain pemakaian energi akan semakin boros, karena dalam hal ini energi uap yang dihasilkan tidak memiliki rentang yang terlalu tinggi sedangkan energi bahan bakar memiliki rentang yang tinggi.



Yang kemudian dapat disimpulkan bahwa energi uap tidak begitu berpengaruh pada efisiensi tapi yang berpengaruh besar adalah pemakaian energi bahan bakar.

Kerugian-kerugian kalor pada ketel uap disebabkan antara lain :

1. Kerugian cerobong

Kerugian ini adalah yang paling dominan di antara kerugian-kerugian kalor lainnya. Kerugian ini disebabkan karena sebagian panas hasil pembakaran ikut keluar bersama gas asap.

2. Kerugian akibat penguapan air pada bahan bakar

Kerugian ini disebabkan karena sebagian panas digunakan atau dipakai untuk menguapkan air pada bahan bakar.

3. Kerugian akibat penguapan air yang berasal dari pembakaran hidrogen

Hidrogen pada bahan bakar setelah melalui proses pembakaran akan membentuk H₂O. Air ini diuapkan oleh panas yang terjadi dan mengurangi panas yang digunakan untuk memproduksi uapnya.

4. Kerugian akibat kandungan air dalam udara

Kerugian ini disebabkan oleh kandungan air yang dibawah oleh udara yang disuplai untuk proses pembakaran.

5. Kerugian radiasi

Adalah semua panas yang hilang akibat perpindahan panas dari hasil pembakaran menuju bagian-bagian ketel yang bukan berfungsi sebagai pemanas (penguap). Perpindahan panas ini dapat juga terjadi secara konveksi maupun konduksi.

6. Kerugian akibat pembakaran tidak sempurna

Kerugian ini terjadi disebabkan karena adanya unsur-unsur dalam bahan bakar yang tidak terbakar.

Disamping faktor-faktor *heat losses* yang terjadi, penurunan efisiensi dapat juga terjadi karena faktor umur dari ketel uap, sehingga kinerja komponen-komponen ketel akan semakin menurun. Oleh karena itu, perawatan ketel uap secara periodik adalah hal yang sangat penting.

2. Perlu pengawasan terhadap kondisi operasi ketel uap secara teliti dan seksama seperti pengukuran dan penulisan data-data operasi sehingga kinerja ketel uap dapat dilihat dan dipantau setiap waktu.

DAFTAR PUSTAKA

1. Annual Book Of ASTM Standard, "Gaseous Fuels, Coal and Coke",
2. Cengel, Yunus A, "Heat Transfer", Mc Graw Hill Company, Singapore, 2004
3. Djokosetyarjo, M.J, "Ketel Uap", cetakan keempat, PT. Pradya Paramitah, Jakarta, 1999
4. Ganapathy, V, "Steam Plant Calculation Manual", marcel Dekker Inc, 1904.
5. Li, Kam W and Priddy, A. Paul, "Steam Plant System Design", John Wiley and Sons Inc, 1985
6. Nag, PK, "Power Plant Engineering", Mc Graw Hill Company, Singapore, 2002

KESIMPULAN DAN SARAN

V. 1 KESIMPULAN

Dari perhitungan dan analisa pada bab IV dapat disimpulkan bahwa :

1. Efisiensi rata-rata ketel uap adalah 49.47% pada tahun 1997 dan 46.94% pada tahun 2007.
2. Penurunan efisiensi ketel uap selama 10 tahun dari tahun 1997 hingga tahun 2007 adalah sebesar 2.53%.

V. 2. SARAN

1. Perawatan terhadap ketel uap adalah hal yang sangat penting, jadi perawatan ketel uap haruslah secara berkala dan terencana agar performansi ketel uap tetap baik.

