

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Ketel Uap

Ketel Uap adalah suatu bejana tertutup yang bertekanan, dimana air diubah menjadi uap dengan pemberian panas (kalor). Ketel Uap pertama kali ditemukan pada abad pertama oleh bangsa Alexandria yang walaupun penggunaannya uapnya belum untuk keperluan yang berguna tetapi hanya untuk pergerakan sebuah mainan. Kemudian pada tahun 1698 seorang kebangsaan Inggris mempatentkan sebuah pompa yang digerakkan oleh tenaga uap.



Gambar 2.1 Hero Engine

Sumber: Fahmi Kurniawan (Sejarah Mesin Uap. 2010)

2.1.1 Pengertian Ketel Uap

Ketel uap adalah termasuk kedalam jenis mesin kalor pembakaran luar (*ECE*) dimana proses pembakaran bahan bakar dan udara terjadi diluar mesin, gas panas hasil pembakaran kemudian di pindahkan ke pipa-pipa yang berfungsi sebagai penyerap panas. Atau dengan kata lain ketel uap adalah sebuah tangki tertutup dan bertekanan yang berfungsi untuk mengubah air dari fase cair menjadi fase gas (uap air) dengan cara

pemberian panas hingga mencapai titik didihnya.

Bila air dipanaskan dalam suatu bejana tertutup (*boiler*) dengan penambahan sejumlah panas, maka akan terjadi perubahan fasa dari benda cair ke gas (proses penguapan). Seiring naiknya tekanan, maka temperatur didih air juga akan naik. Uap yang terbentuk selama proses pendidihan pada tekanan tertentu ini masih berupa uap basah. Apabila uap tersebut masih terus diberikan tambahan panas pada suatu titik tekanan yang konstan, maka volume uap akan meningkat dan temperturnya akan melewati titik jenuh. Uap inilah yang lazim disebut uap panas lanjut.

Uap panas lanjut memiliki banyak keunggulan karena dapat ditransmisikan pada jarak yang jauh dengan kerugian panas yang sedikit mengandung energi panas yang lebih tinggi, serta dapat mengurangi dampak erosi pada sudu-sudu turbin karena kandungan air pada uap telah dieliminir.

2.1.2 Klasifikasi Ketel Uap

Ada banyak klasifikasi ketel uap, berikut ini diberikan beberapa klasifikasi ketel uap yang penting.

1. Berdasarkan isi tube/pipa

a. Ketel Pipa Api Atau Pipa Asap

Pada ketel pipa api, gas-gas panas hasil proses pembakaran, mengalir melalui pipa yang dikelilingi oleh air. Panas dikonduksikan melalui dinding pipa dari gas panas ke air di sekeliling pipa tersebut.

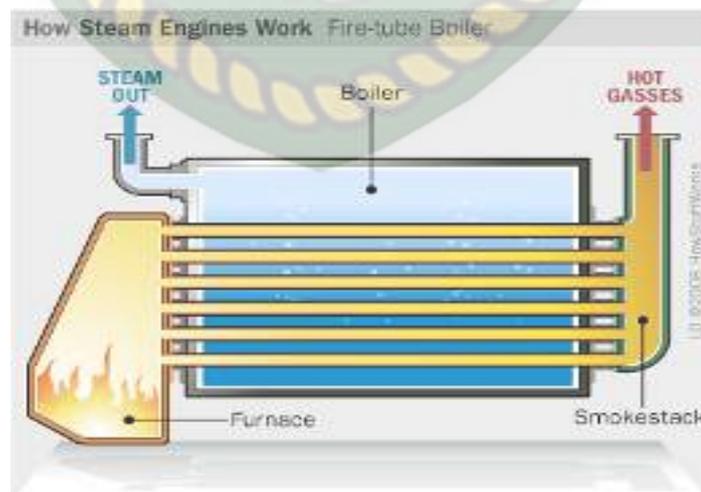
Cara kerja : proses pengapian terjadi didalam pipa, kemudian panas yang dihasilkan dihantarkan langsung kedalam boiler yang berisi air. Besar dan konstruksi boiler mempengaruhi kapasitas dan tekanan yang dihasilkan boiler tersebut.

Keuntungan:

1. Tidak membutuhkan setting khusus, sehingga proses pemasangannya mudah dan cepat.
2. Investasi awal untuk ketel uap pipa api lebih murah.
3. Bentuknya lebih *compact* dan *portable*.

Kerugian:

1. Tekanan operasi *steam* terbatas untuk tekanan rendah 18 bar.
2. Jika dibandingkan dengan ketel pipa air, kapasitas *steam* nya *relative* kecil (13,5 Ton/jam).
3. Tempat pembakarannya sulit dijangkau sehingga sulit untuk dibersihkan, diperbaiki, dan diperiksa kondisinya.



Gambar 2.2 Fire Tube Boiler

Sumber : Marshall Brain (How Steam Engine Work. 2008)

b. Ketel Pipa Air

Pada ketel ini yang mengalir didalam pipa adalah air ketel, sedangkan gas-gas panas hasil pembakaran berada diluar pipa. Pada ketel pipa air, air diupamakan *boiler* melalui pipa masuk kedalam drum. Air yang tersirkulasikan dipanaskan oleh gas hasil pembakaran sehingga membentuk uap.

Cara kerja : proses pengapian terjadi diluar pipa, kemudian panas yang dihasilkan memanaskan pipa yang berisi air dan sebelumnya air tersebut dikondisikan terlebih dahulu melalui economizer, kemudian uap yang dihasilkan terlebih dahulu dikumpulkan di dalam sebuah drum uap. Sampai tekanan dan temperatur sesuai, melalui tahap *secondary superheater* dan *primary superheater* untuk selanjutnya dilepaskan ke pipa utama distribusi. Didalam pipa air, air yang mengalir harus dikondisikan terhadap mineral atau kandungan lainnya yang larut.

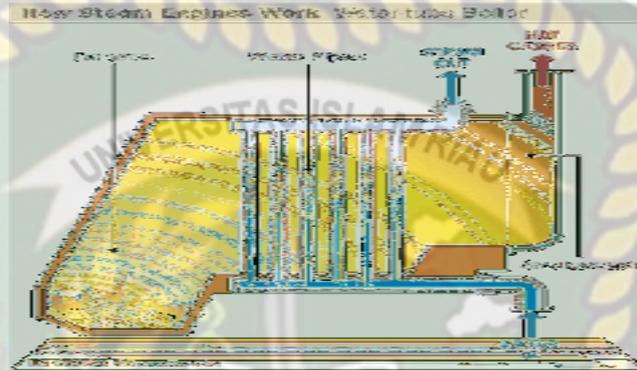
Keuntungan:

1. Kapasitas *steam* besar (\pm 450 Ton/Jam).
2. Tekanan operasi mencapai 100 Bar.
3. Untuk melakukan pemeriksaan, pembersihan, dan perbaikan tungku lebih mudah dilakukan jika dibandingkan dengan keel uap pipa api.

Kerugian:

1. Ketel uap pipa air ini proses konstruksinya lebih detail.

2. Investasi awal relative lebih mahal.
3. Konstruksinya membutuhkan area yang luas, karena mampu menghasilkan kapasitas dan tekanan steam yang lebih besar dibandingkan dengan ketel uap pipa api.



Gambar 2.3 Water Tube Boiler
Sumber : Marshall Brain (*How Steam Engine Work*. 2008)

2. Berdasarkan penggunaannya
 - a. *Stasioner*

Ketel uap stasioner digunakan di pusat pembangkit tenaga dan di industri proses. Ketel ini disebut *stasioner* karena ketel tidak berpindah dari satu ke tempat lainnya.
 - b. *Mobile*

Ketel uap *mobile* adalah ketel yang bergerak dari satu tempat ke tempat lainnya. Ketel jenis ini seperti ketel lokomotif dan ketel *marine*.
3. Berdasarkan letak dapur
 - a. Ketel dengan pembakaran didalam (*internally fired steam boiler*), dalam hal ini dapur berada (pembakaran terjadi) dibagian dalam ketel. Kebanyakan ketel pipa api memakai sistem ini.
 - b. Ketel dengan pembakaran diluar (*outernally fired steam boiler*),

dalam hal ini dapur berada dibagian luar ketel dan kebanyakan sistem ini digunakan oleh ketel pipa air.

4. Berdasarkan bentuk dan letak pipa
 - a. Ketel dengan pipa lurus, bengkok, dan berlekak-lekuk.
 - b. Ketel dengan pipa miring-datar dan miring-tegak .
5. Berdasarkan sistem peredaran air ketel
 - a. Ketel dengan peredaran alam (*natural circulation steam boiler*)
 - b. Ketel dengan peredaran paksa (*forced circulation steam boiler*)

Pada *natural circulation steam boiler*, peredaran air dalam ketel terjadi secara alami, dimana air panas atau uap yang berat jenisnya lebih rendah akan naik keatas sedangkan air yang memiliki berat jenisnya yang lebih tinggi akan turun dan terkumpul dibagian bawah drum uap (*steam drum*).

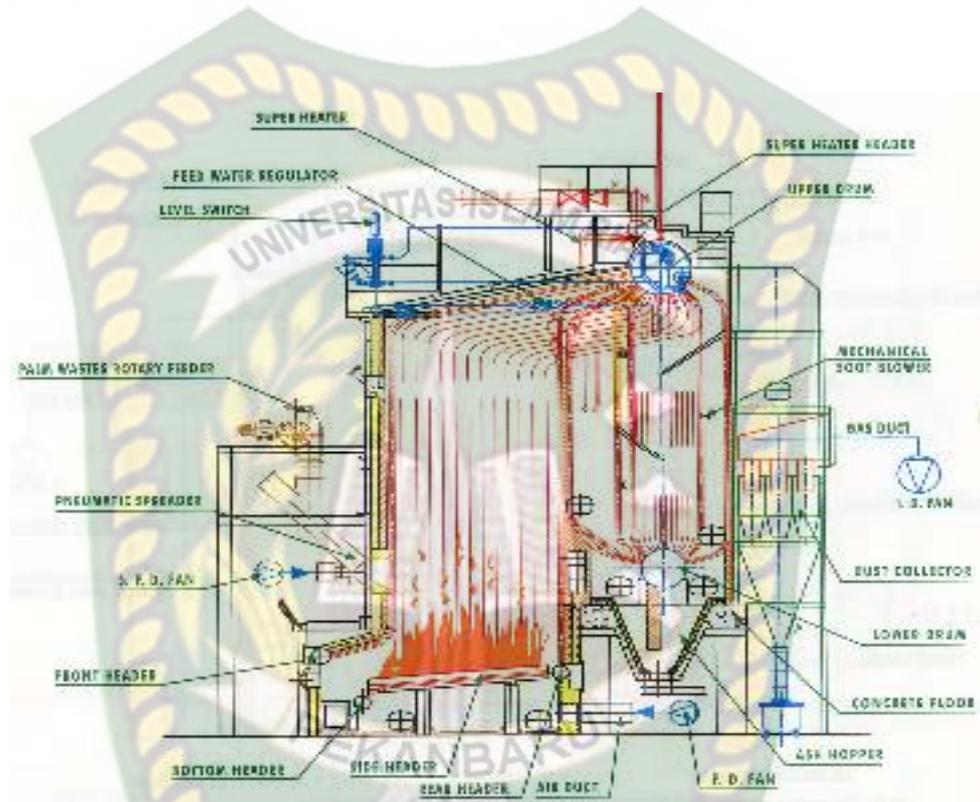
Pada ketel dengan aliran paksa (*forced circulation steam boiler*), peredaran air dalam ketel diperoleh dari sebuah pompa sentrifugal yang digerakkan dengan elektrik motor, dan biasanya sistem jenis ini banyak digunakan oleh ketel uap yang memiliki tekanan tinggi seperti: *La-Mont Boiler, Benson Boiler, Loeffler Boiler, dan Velcant Boiler*.

6. Berdasarkan sumber panas

Sumber panas bisa berupa pembakaran bahan bakar padat, cair atau gas-gas sisa. Panas yang dihasilkan dari proses kimia, energi listrik atau energi nuklir.

2.1.3 Komponen-komponen Utama Ketel Uap

Ketel uap terdiri dari beberapa komponen utama yaitu: kondensor, pompa, ekonomizer, *water wall tube*, steam drum, dan *superheater*.



Gambar 2.4 Takuma Water Tube Boiler
Sumber : Ares Wan (Industri Sawit. 2012)

Air dari kondensor (air kondensat hasil dari pendinginan uap yang keluar dari turbin) didistribusikan oleh pompa masuk ke *economizer* untuk dipanaskan (belum menjadi uap), dari *economizer* masuk ke pipa evaporator (*water wall tube*) untuk dipanaskan hingga menjadi uap jenuh, uap jenuh tersebut dipanaskan di *superheater* hingga menjadi uap panas lanjut, uap inilah yang digunakan untuk menggerakkan turbin.

Berikut fungsi dari komponen utama ketel uap :

1. Kondensor

Berfungsi untuk merubah uap yang keluar dari turbin menjadi air (*condensate water*) dengan proses pendinginan.

2. Pompa

Berfungsi untuk mendistribusikan air umpan ketel uap.

3. *Economizer*

Berfungsi untuk memanaskan air umpan ketel uap sebelum masuk ke pipa evaporator (*water wall pipe*).

4. *Water Wall Tube*

Berfungsi untuk memanaskan air hingga menjadi uap jenuh.

5. *Superheater*

Berfungsi untuk memanaskan uap jenuh menjadi uap panas lanjut, sehingga uap tersebut bias digunakan untuk menggerakkan turbin.



Gambar 2.5 Ketel Uap di PT. Perkebunan Nusantara V
Sumber : PT. Perkebunan Nusantara V Pks Sei Pagar

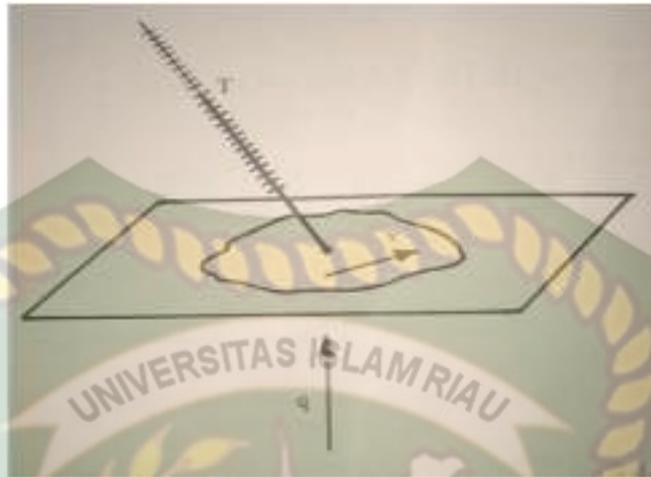
2.1.4 Prinsip Kerja Ketel Uap (*Boiler*)

Pada *boiler* pipa air sumber panas didapatkan dari pembakaran bahan bakar di dalam *furnace*. Energi panas ini sebagian akan terpancar secara radiasi ke pipa-pipa evaporator sehingga memanaskan pipa-pipa tersebut. Panas yang

terserap oleh permukaan pipa akan secara konduksi berpindah ke sisi permukaan dalam pipa. Didalam pipa, mengalir air yang terus-menerus menyerap panas tersebut. Proses penyebaran panas antar molekul air di dalam aliran ini terjadi secara konveksi. Perpindahan panas konveksi antar molekul air, seakan-akan menciptakan aliran fluida tersendiri terlepas dengan aliran air di dalam pipa-pipa *boiler*. Gas hasil pembakaran yang mengandung energi panas akan terus mengalir mengikuti bentuk *boiler* hingga ke sisi keluaran. Di sepanjang perjalanan, panas yang terkandung di dalam gas buang akan diserap oleh permukaan *boiler* dan diteruskan secara konduksi ke air di dalam pipa. Secara bertahap, air akan berubah fase menjadi uap basah (*saturated steam*) dan dapat berlanjut hingga menjadi uap kering (*superheated steam*).

2.1.5 Proses Pembentukan Uap

Bila diatas sekeping logam terdapat beberapa tetes air, dan kita perhatikan molekul-molekul air tersebut, temperatur air pada saat itu ialah T_0 Kelvin atau t_0 °Celcius. Molekul-molekul air tersebut bergerak bebas dalam lingkungannya (dalam lingkungan air) dengan kecepatan v_0 meter/detik. Molekul-molekul tersebut dalam gerakannya yang bebas tidak akan dapat meninggalkan lingkungannya, yaitu lingkungan air karena adanya gaya tarik-menarik antara molekul-molekul air itu sendiri.



Gambar 2.6 Air Dipanaskan di Atas Kepingan Logam
Sumber: Ir.M.J.Djokosetyardjo (Ketel Uap Chapter I. 2006)

Apabila dibawah kepingan logam tersebut dipasang api (api dari sebatang lilin, korek api,dan sebagainya), sedemikian sehingga api tersebut memanasi kepingan logam yang diatasnya terdapat beberapa tetes air, maka temperatur air tersebut akan naik menjadi T_1 Kelvin, dan ternyata kecepatan gerak dari molekul-molekul air tersebut akan bertambah menjadi v_1 meter/detik, namun belum mampu melepaskan diri dari lingkungannya.

Dan apabila api yang dipasang dibawah kepingan logam tersebut senantiasa ditambah besarnya, sedemikian sehingga temperatur air diatas kepingan logam tersbut mencapai T_d Kelvin, sedangkan kecepatan gerak molekul-molekul air tersebut telah mencapai v_d m/detik, sehingga molekul-molekul air tersebut mampu untuk melepaskan diri dari gaya tarik-menarik antara molekul-molekul air tersebut.

Molekul-molekul air yang melepaskan diri dari lingkungannya tersebut akan berubah menjadi molekul uap yang kecepatan gerakannya melebihi kecepatan gerak molekul-molekul air semula. Dan proses yang sedemikian tadi

disebut “Proses Penguapan”. Molekul-molekul air berubah menjadi molekul uap, atau disebut juga bahwa air tersebut sedang “mendidih”, karena permukaan air menjadi bergejolak. Temperatur air pada saat itu mencapai “temperatur mendidih” yaitu T_d Kelvin. Dan bila api masih saja ditambah besarnya, ternyata temperatur mendidih T_d Kelvin tidak akan berubah atau konstan, selama tekanan yang ada di atasnya dipertahankan secara konstan. Didalam ketel uap terdapat dua jenis uap yaitu uap kenyang (*saturated steam*) dan uap panas lanjut (*superheated steam*).

1. Uap kenyang (*saturated steam*)

Uap kenyang adalah uap yang senantiasa mempunyai pasangan-pasangan harga antara tekanan (P) dengan temperatur mendidihnya (T). Bila tekanan dinaikan, temperatur mendidih akan naik, dan sebaliknya, bila tekanan diturunkan, maka temperatur mendidihnya juga akan turun.

Ciri-ciri uap kenyang adalah sebagai berikut :

- a) Uap kenyang adalah uap yang dalam keadaan seimbang dengan air yang ada di bawahnya.
- b) Uap kenyang adalah uap yang mempunyai tekanan dan temperatur mendidih yang sama dengan tekanan dan temperatur mendidih air yang ada dibawahnya.
- c) Uap kenyang adalah uap yang mempunyai pasangan-pasangan harga antara tekanan dan temperatur mendidihnya.
- d) Uap kenyang adalah uap yang apabila didinginkan akan segera mengembun menjadi air.

- e) Uap kenyang adalah uap yang bila melakukan ekspansi atau dibiarkan mengembang akan mengembun menjadi air.

2. Uap panas lanjut (*superheated steam*)

Uap panas lanjut adalah uap kenyang yang dipanaskan lagi, uap panas lanjut bila tekanan berubah namun temperaturnya tidak akan berubah.

Ciri-ciri uap panas lanjut adalah sebagai berikut :

- a) Uap yang temperaturnya jauh lebih tinggi di atas temperatur air mendidih pada tekanan (P).
- b) Uap yang tidak bisa seimbang dengan air.
- c) Uap yang tidak mempunyai pasangan-pasangan antara tekanan dan temperaturnya.
- d) Uap yang apabila didinginkan tidak akan mengembun.
- e) Uap yang bila melakukan ekspansi tidak akan mengembun.
- f) Tidak dapat membuat uap yang dipanaskan lanjut dari uap kenyang selama uap tersebut masih bersinggungan dengan air yang ada dibawahnya.

2.2 Sistem Pengolahan Air Umpa *Boiler*

Memproduksi steam yang berkualitas tergantung pada pengolahan air yang benar untuk mengendalikan kemurnian steam, endapan dan korosi. Sebuah *boiler* merupakan bagian dari sistim boiler, yang menerima semua bahan pencemar dari sistim didepannya. Kinerja *boiler*, efisiensi, dan umur layanan merupakan hasil langsung dari pemilihan dan pengendalian air umpa yang digunakan dalam *boiler*. Dimana kenaikan suhu dan tekanan dari air

umpan *boiler* dapat menyebabkan kandungan dan sifat yang dimiliki air pun menjadi berbeda. Walau demikian, dibawah kondisi panas dan tekanan hampir seluruh komponen terlarut keluar dari larutan sebagai padatan partikel, kadang-kadang dalam bentuk kristal dan pada waktu yang lain sebagainya tidak terbentuk. Jika kelarutan komponen spesifik dalam air terlewati, maka akan terjadi pembentukan kerak dan endapan. Air *boiler* harus cukup bebas dari pembentukan endapan padat supaya terjadi perpindahan panas yang cepat dan efisien dan harus tidak korosif terhadap logam *boiler*. Adapun parameter dari air umpan yang perlu diperhatikan yaitu : temperatur, tekanan, dan kualitas.

Temperatur air umpan adalah temperatur air sebelum melewati nosel dan memasuki tabung evaporasi, sedangkan tekanan air umpan adalah tekanan yang dihasilkan oleh pompa diafragma kepada air sebelum melewati nosel dan memasuki tabung evaporasi. (Iswandi,dkk. 2009: 74-75)

2.2.1 Pengolahan Air Umpan

Didalam sistem air umpan terdapat dua jenis pengolahan air umpan yaitu pengolahan internal dan pengolahan eksternal.

1. Pengolahan Internal

Pengolahan internal adalah penambahan bahan kimia ke *boiler* untuk mencegah pembentukan kerak. Senyawa pembentuk kerak diubah menjadi lumpur yang mengalir bebas, yang dapat dibuang dengan *blowdown*. Metode ini terbatas pada *boiler* dimana air umpan mengandung garam sadah yang rendah, dengan tekanan rendah, kandungan TDS tinggi dalam *boiler* dapat ditoleransi, dan jika jumlah airnya kecil. Jika kondisi tersebut tidak terpenuhi

maka laju *blowdown* yang tinggi diperlukan untuk membuang lumpur. Hal tersebut menjadi tidak ekonomis sehubungan dengan kehilangan air dan panas. Jenis sumber air yang berbeda memerlukan bahan kimia yang berbeda pula. Senyawa seperti sodium karbonat, sodium aluminat, sodium fosfat, sodium sulfit dan komponen sayuran atau senyawa inorganik seluruhnya dapat digunakan untuk maksud ini. Untuk setiap kondisi air diperlukan bahan kimia tertentu. Harus dikonsultasikan dengan seorang spesialis dalam menentukan bahan kimia yang paling cocok untuk digunakan pada setiap kasus. Pengolahan air hanya dengan pengolahan internal tidak direkomendasikan. (Sumber: Badan Produktivitas Nasional).

Tujuan pengolahan ini untuk mengatur atau mengontrol zat-zat padat, alkalinitas, kelebihan fosfat, gas-gas korosif, menghindarkan timbulnya endapan-endapan yang dapat melekat dan mengeras pada dinding atau pipa-pipa *boiler* dan membuat lapisan *boiler* lebih tahan terhadap korosi. Beberapa mekanisme yang terjadi dalam *internal treatment*, antara lain:

1. Mereaksikan kesadahan dengan bahan kimia, agar kerak *calcium carbonate* yang keras berubah menjadi endapan yang lunak berlumpur sehingga bisa dibuang melalui *blowdown*.
2. Mengkondisikan pH air *boiler* untuk menghindari terjadinya pengerakan *silica*.
3. Penggunaan anti-busa (anti *foam*) untuk mencegah potensi pembusaan yang akan mengakibatkan terjadinya *carry-over* dan menurunkan kemurnian uap.

Beberapa jenis bahan kimia yang umum dipergunakan dalam Internal treatment adalah sebagai berikut:

1. Fosfat : bereaksi kesadahan *calcium* untuk menetralsir kesadahan air dengan membentuk *hydrat tricalcium fosfat* yang berbentuk lumpur dan dapat dibuang melalui *blowdown* secara terus-menerus atau secara berkala melalui bawah ketel.
2. *Natural and synthetic dispersants* : meningkatkan sifat dispersif air *boiler*. Beberapa contoh *polymeric* dispersant adalah:
 - a.) Polimer Alam : *lignosulphonates*, tannin
 - b.) Polimer sintetik : *polyacrylates*, *maleat acrylate copolymer*, *maleat styrene copolymer*, dan sebagainya.
3. *Sequestering agents* (anti scale) seperti *phosphate organic* (phosphonates), *Polymaleic Acid* (PMA), *sulfonated co-polymer*, dan sebagainya.
4. *Oxygen scavengers* (Pemakan Oksigen) : seperti natrium sulfit, tannis, *hidrazin*, *hidroquinon/progallol* berbasis *derivatif*, *hydroxylamine derivatif*, asam askorbat *derivatif*, dan lain-lain. *Oxygen scavengers* ini, dikatalisasi ataupun tidak, akan mengurangi kadar oksigen terlarut dalam *feedwater*. Beberapa jenis dari *oxygen scavenger* ini juga berfungsi sebagai *passivator* untuk mem-passivasi permukaan logam seperti *hydrazine*, *hydroxylamine derivate*, dan lain-lain. Pilihan produk dan dosis yang diperlukan akan tergantung pada jenis alat mekanis yang digunakan (*deaerator* atau *heating tank*).

5. *Anti-foaming/anti-priming agents* : campuran bahan aktif permukaan yang mengubah tegangan permukaan cairan, menghilangkan busa dan mencegah terbawa air halus partikel.

2. Pengolahan Eksternal

Pengolahan eksternal digunakan untuk membuang padatan tersuspensi, padatan terlarut (terutama ion kalsium dan magnesium yang merupakan penyebab utama pembentukan kerak) dan gas- gas terlarut (oksigen dan karbon dioksida). Adapun proses perlakuan eksternal yang dilakukan yaitu :

1. Pertukaran ion

Pada proses pertukaran ion, adalah dihilangkan dengan melewati air pada *bed* zeolit alam atau resin sintetik dan tanpa pembentukan endapan. Jenis paling sederhana adalah ‘pertukaran basa’ dimana ion kalsium dan magnesium ditukar dengan ion sodium. Setelah jenuh, dilakukan *regenerasi* dengan sodium klorida. Garam sodium mudah larut, tidak membentuk kerak dalam *boiler*. Dikarenakan penukar basa hanya menggantikan kalsium dan magnesium dengan sodium, maka tidak mengurangi kandungan TDS, dan besarnya *blowdown*. Penukar basa ini juga tidak mendemineralisasi merupakan penghilangan lengkap seluruh garam. Hal ini dicapai dengan menggunakan resin “kation”, yang menukar kation dalam air baku dengan ion *hydrogen* menghasilkan asam hidroklorida, asam sulfat dan asam karbonat. Asam karbonat dihilangkan dalam menara *degassing* dimana udara dihembuskan melalui air asam. Berikutnya, air melewati resin “anion”, yang menukar anion dengan asam mineral (misalnya asam sulfat) dan membentuk

air. Regenerasi kation dan anion perlu dilakukan pada jangka waktu tertentu dengan menggunakan asam mineral dan soda kaustik. (Sumber: Badan Produktivitas Nasional).

2. Deaerasi (mekanis dan kimia)

Dalam de-aerasi, gas terlarut, seperti oksigen dan karbon dioksida, dibuang dengan pemanasan awal air umpan sebelum masuk ke *boiler*. Seluruh air alam mengandung gas terlarut dalam larutannya. Gas-gas tertentu seperti karbon dioksida dan oksigen, sangat meningkatkan korosi. Bila dipanaskan dalam sistem *boiler*, karbon dioksida (CO_2) dan oksigen (O_2) dilepaskan sebagai gas dan bergabung dengan air (H_2O) membentuk asam karbonat (H_2CO_3). Penghilangan oksigen, karbon dioksida dan gas lain yang tidak dapat terembunkan dari air umpan *boiler* sangat penting bagi umur peralatan *boiler* dan juga keamanan operasi. Asam karbonat mengkorosi logam menurunkan umur peralatan dan pemipaan. Asam ini juga melarutkan besi (Fe) yang jika kembali ke *boiler* akan mengalami pengendapan dan menyebabkan terjadinya pembentukan kerak pada *boiler* dan pipa. Kerak ini tidak hanya berperan dalam penurunan umur peralatan tapi juga meningkatkan jumlah energi yang diperlukan untuk mencapai perpindahan panas. De-aerasi dapat dilakukan dengan de-aerasi mekanis, de-aerasi kimiawi, atau dua-duanya.

3. Osmosis balik

Osmosis balik menggunakan kenyataan bahwa jika larutan dengan konsentrasi yang berbeda-beda dipisahkan dengan sebuah membran semi-

permeable, air dari larutan yang berkonsentrasi lebih kecil akan melewati membran untuk mengencerkan cairan yang berkonsentrasi tinggi. Jika cairan yang berkonsentrasi tinggi tersebut diberi tekanan, prosesnya akan dibalik dan air dari larutan yang berkonsentrasi tinggi mengalir ke larutan yang lebih lemah. Hal ini dikenal dengan osmosis balik.

Kualitas air yang dihasilkan tergantung pada konsentrasi larutan pada sisi tekanan tinggi dan perbedaan tekanan yang melintasi membran. Proses ini cocok untuk air yang memiliki TDS yang sangat tinggi, seperti air laut. (Sumber: Badan Produktivitas Nasional).

4. Penghilangan mineral/ demineralisasi

Sebelum digunakan cara diatas, perlu untuk membuang padatan dan warna dari bahan baku air, sebab bahan tersebut dapat mengotori resin yang digunakan pada bagian pengolahan berikutnya.

Metode pengolahan awal adalah sedimentasi sederhana dalam tangki pengendapan atau pengendapan dalam *clarifiers* dengan bantuan koagulan dan flokulan. Penyaring pasir bertekanan, dengan aerasi untuk menghilangkan karbon dioksida dan besi, dapat digunakan untuk menghilangkan garam-garam logam dari air sumur. Tahap pertama pengolahan adalah menghilangkan garam sadah dan garam non-sadah. Penghilangan hanya garam sadah disebut pelunakan, sedangkan penghilangan total garam dari larutan disebut penghilangan mineral atau demineralisasi.

2.3 Sirkulasi Air dan Uap Dalam Ketel Uap

Ada tiga jenis sirkulasi air dan uap dalam ketel uap yaitu sirkulasi paksa, sirkulasi alami dan sirkulasi perbedaan tekanan.

1. Sirkulasi Paksa

Pada sirkulasi paksa, fluida (*feedwater*) dipompakan melalui bagian evaporator ketel. Air pengisi (*feedwater*) dapat dipompakan dengan hanya menggunakan pipa yang kecil namun dengan tekanan yang sangat tinggi. Tekanan tinggi memaksa aliran fluida memaksa masuk melalui *control valve* ke *economizer* untuk diteruskan ke dalam steam drum.

2. Sirkulasi Alami

Energi panas yang diberikan pada ruang bakar akan menyebabkan terjadinya penguapan. Uap yang mempunyai berat jenis lebih rendah akan naik keatas, sedangkan air yang lebih berat akan terkumpul dibagian bawah drum uap (*steam drum*). Air inilah yang nantinya turun dari *steam drum* melalui *downcomer* dan memasuki *wall tube* (pipa dinding *boiler*) secara alami (gaya gravitasi).

3. Sirkulasi Perbedaan Tekanan

Seperti pada hukum grafitasi dan aliran panas, uap selalu mengalir dari suatu area yang bertekanan lebih tinggi ke area yang bertekanan rendah. Uap selalu mengalir dari suatu area yang bertekanan lebih tinggi dari tekanan *steam header* turbin. Beda tekanan ini yang menyebabkan uap mengalir ke pipa-pipa uap panas lanjut.

2.4 Bahan Bakar

Bahan bakar adalah suatu materi apapun yang bisa diubah menjadi energi panas. Kebanyakan bahan bakar digunakan manusia melalui proses pembakaran (reaksi redoks) dimana bahan bakar tersebut akan melepaskan panas setelah direaksikan dengan oksigen. Bahan bakar yang digunakan di dalam ketel uap pada umumnya diklasifikasikan sebagai berikut yaitu:

1. Bahan bakar padat (*solid fuel*)

Bahan bakar padat yang terdapat di bumi kita ini berasal dari zat-zat organik. Bahan bakar padat mengandung unsur-unsur antara lain : zat arang atau karbon (C), Hidrogen (H), zat asam atau oksigen (O), zat lemas atau nitrogen (N), belerang (S), abu dan air, yang kesemuanya itu terikat dalam satu persenyawaan kimia.

Bahan bakar padat sendiri terdapat dua jenis, yaitu:

- a) Bahan bakar padat alami, seperti: bahan bakar kayu (*wood*), tanah gemuk (*peat*), batu bara (*lignite*), batu bara bituminous (aspal), batu bara jenis antrasit (*antrasit coal*).
- b) Bahan bakar padat buatan, seperti: bahan bakar arang kayu (*wood charcoal*), kokas (*coke*), briket, tepung batu bara, tempurung kelapa, serabut dan cangkang kelapa sawit.

2. Bahan bakar cair (*liquid fuel*)

Bahan bakar cair berasal dari minyak bumi. Minyak bumi di dapat dari dalam tanah dengan jalan mengebornya di ladang-ladang minyak, dan memompanya sampai ke atas permukaan bumi, untuk selanjutnya diolah

lebih lanjut menjadi berbagai jenis minyak bakar.

3. Bahan bakar gas (*gass fuel*)

Didalam tanah banyak terkandung : gas bumi (petrol gas) atau sering pula disebut gas alam, yang timbul pada saat proses pembentukan minyak bumi, gas tambang dan gas rawa (CH_4 atau metan). Seperti halnya dengan minyak bumi, gas alam tersebut diperoleh dengan jalan pengeboran dari dalam tanah, baik di daratan maupun di lepas pantai terhadap lokasi-lokasi yang diduga terdapat kandungan gas alam.

Adapun bahan bakar untuk ketel uap (*boiler*) yang digunakan di PT. Pekebun Nusantara V yaitu bahan bakar serabut dan cangkang sawit. Dan alasan mengapa digunakan cangkang dan serabut sebagai bahan bakar ketel uap adalah :

1. Bahan bakar cangkang dan serabut cukup tersedia dan mudah diperoleh di pabrik.
2. Cangkang dan serabut merupakan limbah dari pabrik kelapa sawit apabila tidak digunakan.
3. Nilai kalor bahan bakar cangkang dan serabut memenuhi persyaratan untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan.
4. Harga lebih ekonomis

Cangkang adalah bahan bakar padat yang berwarna hitam dan agak bulat, terdapat pada bagian buah sawit antara daging buah dan serabut.. Pada bahan bakar cangkang ini terdapat berbagai unsur kimia antara lain : Carbon (C), Hidrogen (H_2), Nitrogen (N_2), Oksigen (O_2), dan Abu. Dimana

unsur kimia yang terkandung pada cangkang mempunyai persentase (%) yang berbeda jumlahnya, dan bahan bakar cangkang ini setelah mengalami proses pembakaran akan berubah menjadi arang, kemudian arang tersebut dengan adanya udara pada dapur akan terbang sebagai ukuran partikel kecil yang dinamakan partikel pijar.

Apabila pemakaian cangkang ini terlalu banyak dari *fiber* akan menghambat proses pembakaran akibat penumpukan arang dan nyala api kurang sempurna, dan jika cangkang digunakan sedikit, panas yang dihasilkan akan rendah, karena cangkang apabila dibakar akan mengeluarkan panas yang besar.

Serabut (*fiber*) adalah bahan bakar padat yang berbentuk rambut, apabila telah mengalami proses pengolahan akan berubah warna menjadi coklat muda, serabut ini terletak dibagian luar dari buah sawit, didalam serabut dan daging buah sawitlah minyak CPO terkandung. Panas yang dihasilkan *fiber* jumlahnya lebih kecil dari yang dihasilkan oleh cangkang. Disamping *fiber* lebih cepat habis menjadi abu apabila dibakar, pemakaian *fiber* yang berlebihan akan berdampak buruk pada proses pembakaran karena dapat menghambat proses perambatan panas pada pipa *water wall*, akibat abu hasil pembakaran beterbangan dalam ruang bakar dan menutupi *water wall*, disamping mempersulit pembuangan dari pintu *eksponion door* (pintu keluar untuk abu dan arang) akibat terjadinya penumpukan yang berlebihan.



Gambar 2.7 Serabut dan Cangkang Buah Sawit
Sumber : PT. Perkebunan Nusantara V Pks Sei Pagar

2.4.1 Proses Pembakaran Bahan Bakar

Pembakaran bahan bakar merupakan reaksi kimia antara bahan bakar dengan oksigen yang menghasilkan perubahan temperatur. Oksigen biasanya berupa udara atau oksigen murni. Pembakaran sebagai proses oksidasi, cairan atau zat padat yang menghasilkan panas (kalor). Didalam prosesnya, terdapat tiga syarat yang harus dipenuhi agar proses pembakaran bahan bakar dapat terjadi, yaitu : (1) adanya bahan bakar, (2) adanya udara/oksigen dalam jumlah yang memadai sebagai reaksi oksidasi, (3) adanya panas sebagai pemicu proses pembakaran bahan bakar.

Jika salah satu dari syarat tersebut tidak terpenuhi maka pembakaran tidak akan terjadi. Jadi proses pembakaran adalah reaksi oksidasi bahan bakar oleh oksigen dari udara yang menghasilkan energi panas api, dan hasil samping berupa karbondioksida dan uap air.

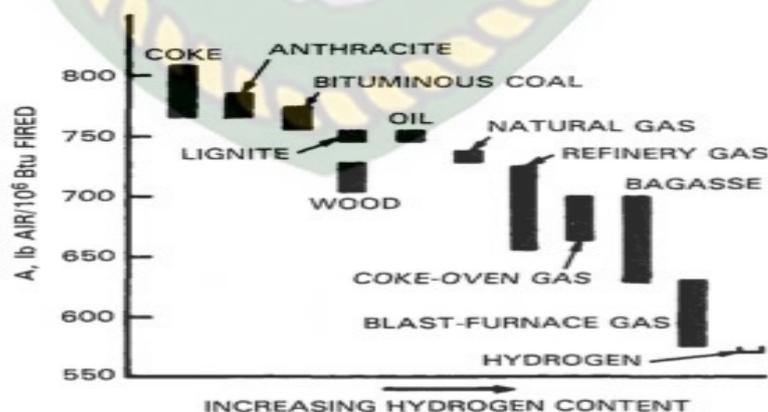
Secara teoritis, pembakaran dapat diartikan sebagai reaksi kimia berantai antara oksigen dengan elemen yang mudah terbakar (*combustible elemen*). Proses pembakaran digunakan pada berbagai kebutuhan manusia.

Rekayasa konversi energi memanfaatkan proses pembakaran untuk sistem pembangkit tenaga listrik, kendaraan bermotor, dan kebutuhan-kebutuhan lainnya.

Untuk mendapatkan manfaat yang maksimal dari proses pembakaran, dibutuhkan proses pembakaran yang sempurna. Adapun syarat-syarat yang harus dipenuhi agar proses pembakaran dapat terjadi secara sempurna yaitu:

1. Kuantitas udara (oksigen) yang disuplai ke bahan bakar cukup.
2. Oksigen dan bahan bakar benar-benar tercampur.
3. Campuran bahan bakar-udara terjaga diatas temperatur pengapiannya.
4. *Volume furnance* cukup luas sehingga memberikan waktu yang cukup bagi campuran bahan bakar-udara untuk terbakar sempurna.

Bahan bakar yang bermacam-macam memiliki spesifikasi campuran dengan udara yang berbeda pula. Jumlah udara yang dibutuhkan secara ideal pada setiap bahan bakar ditunjukkan oleh grafik dibawah ini:



Gambar 2.8 Grafik Kebutuhan Udara Bahan Bakar
 Sumber : Hendra Yudisaputro (Sistem Pembakaran *Boiler*. 2015)

Pada kondisi ideal, proses pembakaran dapat terjadi apabila jumlah bahan bakar dan udara pada proporsi tertentu yang berdasarkan prinsip kimia (stoikiometrik). Namun kenyataan yang terjadi adalah campuran bahan bakar dengan udara didalam *furnance* (ruang bakar) sangat mustahil untuk mencapai kondisi sempurna.

Untuk itulah dibutuhkan adanya *excess air* yang disuplai ke dalam proses pembakaran untuk memastikan terjadinya pembakaran yang sempurna. Jumlah dari *excess air* tergantung bahan bakar yang digunakan pada proses pembakaran.

2.4.2 Reaksi Pembakaran

Reaksi pembakaran dari bahan bakar dapat terjadi jika syarat-syarat kimia berikut tercapai:

1. Terjadi kombinasi yang sempurna antara dua atau lebih reaktan berdasarkan rasio stoikiometrik.
2. Massa elemen reaktan harus sama dengan massa hasil reaksi (hukum kekekalan massa).
3. Senyawa kimia terbentuk dari elemen-elemen kombinasi dengan hubungan massa yang tetap.
4. Formasi dari senyawa yang menghasilkan panas ataupun yang membutuhkan panas, berdasarkan atas perubahan energi bebas dari reaksi.

Combustible	Molecular Weight	Reaction	Heat Release (Btu/lb)
Carbon	12	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	14,100
Hydrogen	2	$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$	61,000
Sulfur	32	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	4,000
Hydrogen sulfide	34	$H_2S + 1.5O_2 \rightarrow SO_2 + H_2O$	7,100
Methane	16	$CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	23,900
Ethane	30	$C_2H_6 + 3.5O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$	22,300
Propane	44	$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$	21,500
Butane	58	$C_4H_{10} + 6.5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O$	21,300
Pentane	72	$C_5H_{12} + 8O_2 \rightarrow 5CO_2 + 6H_2O$	22,000

Source: *Combustion*, edited by Joseph G. Singer, ©1991. Used by permission from Combustion Engineering, Inc.

Gambar 2.9 Reaksi Kimia Pada Berbagai Jenis Bahan Bakar
Sumber : Hendra Yudisaputro (Sistem Pembakaran Boiler. 2015)

2.5 Pengaruh Variasi Temperatur *Feedwater* Terhadap *Performance Boiler*

Menurut Iswandi, dkk (2013:74-75) didalam penelitiannya yang berjudul “Analisis Kinerja *Boiler* Pada PLTU Unit 1 PT. Semen Tonasa” mengatakan bahwa didalam menentukan kinerja suatu *boiler* terdapat beberapa faktor yang mempegaruhi nilai dari *performance* ketel uap salah satunya adalah temperatur air umpan (*feedwater*), temperatur air umpan merupakan faktor yang sangat penting pada proses penguapan (evaporasi). Proses penguapan (evaporasi) tidak akan terjadi apabila tidak terdapat perbedaan temperatur antara fluida dalam hal ini air dengan lingkungannya.

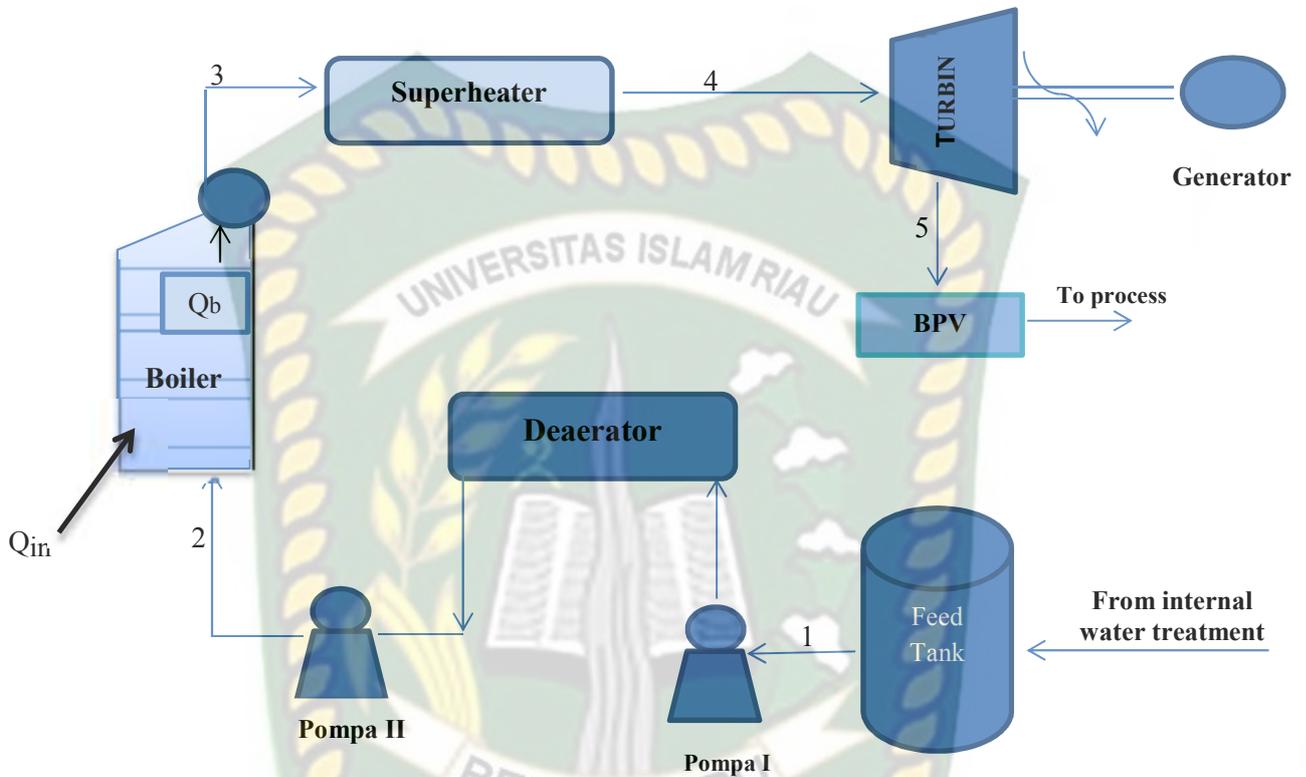
Pada analisis ini, metode yang digunakan dalam menganalisa *performance* dari ketel uap (*boiler*) adalah metode analisa termodinamika, dimana kerugian panas yang terjadi antara fluida kerja dan peralatan instalasi ketel uap diabaikan. Dan hal tersebut dapat terlihat dari hasil penelitian yang didapatkan oleh Iswandi, dkk (2013). Dimana saat temperatur air umpan 80°C diperoleh efesiensi termal terendah sebesar 68,05%, dan pada saat temperaur air umpan 110°C diperoleh efesiensi termal tertinggi sebesar 79,49%.

Berdasarkan pernyataan tersebut maka dapat diketahui bahwa temperatur *feedwater* sangat berperan penting untuk menunjang kinerja dari *boiler* dalam usaha meningkatkan produksi uap. Dimana semakin tinggi temperatur *feedwater* yang masuk ke dalam *boiler* maka akan semakin meningkat nilai *performance* yang dimiliki *boiler*, begitu pula sebaliknya semakin rendah temperatur air umpan (*feedwater*) yang masuk ke dalam *boiler* maka akan semakin turun nilai *performance* yang dimiliki oleh *boiler* tersebut. Sehingga dapat dianalisis perbandingan unjuk kerja ketel uap (*boiler*) saat memiliki temperatur air umpan (*feedwater*) yang tinggi maupun rendah.

2.6 Siklus Rankine

Siklus Rankine adalah siklus teoritis yang mendasari siklus kerja dari suatu pembangkit daya uap. Siklus Rankine berbeda dengan siklus-siklus udara ditinjau dari fluida kerjanya yang mengalami perubahan fase selama siklus pada saat evaporasi dan kondensasi. Perbedaan lainnya secara termodinamika siklus uap jika dibandingkan dengan siklus gas adalah bahwa perpindahan panas (kalor) pada siklus uap dapat terjadi secara isothermal. Proses perpindahan kalor pada siklus Rankine hampir sama dengan siklus Carnot, perpindahan kalor dapat dicapai pada daerah uap basah, dimana perubahan entalpi pada fluida kerja akan menghasilkan penguapan atau kondensasi, akan tetapi tidak pada perubahan temperatur. Temperatur hanya dapat diatur pada tekanan uap fluida. Kerja pompa pada siklus Rankine akan menyebabkan naiknya tekanan fluida kerja dalam fase cair jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan pemanfaatan campuran uap dalam tekanan yang sama pada siklus Carnot. Adapun siklus rankine terbuka pada *boiler* yang

digunakan di PT. Perkebunan Nusantara V Sei Pagar dapat dilihat pada gambar dibawah ini yaitu :



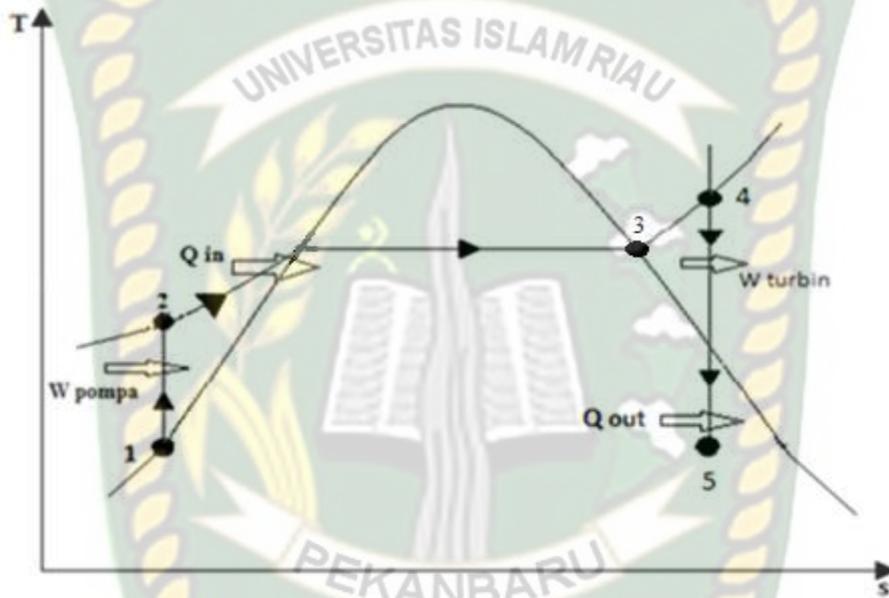
Gambar 2.10 Diagram Alir Siklus Rankine Terbuka

Keterangan :

- Proses 1-2 : Air umpan akan dipompakan ke dalam *deaerator* untuk dinaikkan temperaturnya.
- Proses 2-3 : Selanjutnya air dari *deaerator* akan dialirkan ke dalam *boiler* untuk dilakukan pemanasan mula di *economizer* hingga temperatur dari air umpan (*feedwater*) tersebut mendekati titik didihnya. Air umpan (*feedwater*) hasil dari *economizer* selanjutnya akan dialirkan ke dalam drum atas *boiler* untuk dipanaskan hingga berubah menjadi uap jenuh (*saturated steam*).
- Proses 3-4 : Uap jenuh (*saturated steam*) akan dipanaskan kembali

didalam pipa *superheater* hingga menjadi uap panas lanjut (*superheated steam*) untuk kemudian diinjeksikan ke dalam turbin uap sehingga dapat menggerakkan sudu-sudu turbin.

- Proses 4-5 : Uap sisa dari turbin selanjutnya akan digunakan untuk proses pendukung produksi.



Gambar 2.11 Diagram T-s Siklus Rankine Terbuka

2.7 Parameter *Performance* Ketel Uap (*Boiler*)

Prestasi ketel uap (*boiler*) menunjukkan kinerja suatu mesin/peralatan. Dalam analisa ketel uap (*boiler*) ada beberapa *performance* yang harus dihitung, diantaranya: jumlah kalor yang dibutuhkan ketel (Q_b), temperatur pembakaran bahan bakar (T_a), *heating surface* (F), *specific boiler load* (L_e), kebutuhan bahan bakar (W_{fuel}), *evaporation factor* (E_v), panas yang dihasilkan proses pembakaran bahan bakar (Q_{in}), kebutuhan udara pembakaran (U_{ov}), jumlah gas asap yang terbentuk, volume gas asap yang terbentuk, dan efisiensi *boiler* (η_b).

2.7.1 Jumlah Panas Yang Dibutuhkan *Boiler*

Besarnya jumlah panas yang dibutuhkan oleh ketel uap dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini :

$$Q_b = \dot{m}_u (h_{s_2} - h_a) \text{ (kJ/jam)} \dots\dots\dots \text{Pers 2.1 (Lit.4 hal.54)}$$

Dimana :

Q_b = Jumlah panas yang dibutuhkan ketel uap (kJ/jam)

\dot{m}_u = Laju aliran massa uap = 20000 kg_{uap}/jam

h_{s_2} = Entalpi uap saat keluar *superheater* (kJ/kg)

h_a = Entalpi air umpan saat masuk *boiler* (kJ/kg)

2.7.2 Temperatur Pembakaran Bahan Bakar

Jika susunan dan jumlah gas asap diketahui, maka dapat pula menghitung temperatur pembakaran yaitu dengan mengasumsikan jumlah kehilangan panas didalam tungku (3%) dan jumlah panas yang dipancarkan langsung dari bunga api, gas-gas rangka bakar, ke bidang yang dipanaskan (20%).

Setiap kg bahan bakar membentuk 8,3 nm³ gas asap kering diantaranya 0,83 nm³ CO₂

Susunan gas asap dengan demikian terdiri :

$$\begin{aligned}
 (N_2 + O_2) &= (11,7 - 1,28) \text{ nm}^3 \\
 &= 10,42 \text{ nm}^3
 \end{aligned}$$

$$\text{Berat 1 nm}^3 \text{ uap air} = 18 \text{ kg} \div 22,4 = 0,80 \text{ kg}$$

$$\text{Sehingga uap air yang terbentuk per kg bahan bakar} = 0,48 \div 0,804 = 0,6 \text{ nm}^3$$

Untuk sementara temperatur api dianggap 1000°C, maka panas jenis rata-rata antara 0 – 1000°C adalah sebagai berikut :

$$\text{Panas jenis CO}_2 \text{ dan SO}_2 = 2,135 \text{ kJ/kg.K}$$

$$\text{Panas jenis O}_2 \text{ dan N}_2 = 1,382 \text{ kJ/kg.K}$$

$$\text{Panas jenis H}_2\text{O} = 1,675 \text{ kJ/kg.K}$$

Sehingga setiap kenaikan temperatur gas asap K membutuhkan panas sebanyak :

$$= P.J. \text{ CO}_2 \text{ dan SO}_2 \times \text{Jumlah kadar O}_2 \times \text{Jumlah kadar gas asap} + P.J. \text{ H}_2\text{O} \times \text{Jumlah kadar uap air (kJ/kg.K}_{\text{bahan bakar}})$$

Setiap kg bahan bakar akan memberikan panas kepada gas asap sebanyak :

$$= (100\% - 20\%) \times (100\% - 3\%) \times LHV \text{ (kJ/kg)}$$

Bahan bakar dan udara yang masuk ke dalam tungku dengan temperatur 30°C atau

303 K. Kenaikan temperatur sebanyak :

$$= \text{Kenaikan temperatur gas asap} \div \text{Panas gas asap (Kelvin)}$$

Sehingga didapat temperatur didalam tungku menjadi :

$$T_t = \text{Kenaikan temperatur dalam tungku} + \text{Temperatur bahan bakar dan udara saat masuk tungku (Kelvin)} \dots\dots\dots \text{Pers 2.2 (Lit.3 hal.81)}$$

2.7.3 Heating Surface

Heating surface (luas bidang) yang dipanaskan dari sebuah ketel uap yaitu luas bidang dimana panas dari api diserahkan melewati bidang tersebut, baik kepada air maupun kepada uap. Dan untuk menghitung besarnya nilai *heating surface* yang diperoleh ketel uap, maka digunakanlah persamaan berikut :

$$F = \frac{Q_b}{k \times \Delta T_{\text{rata-rata}}} \text{ (m}^2\text{)} \dots\dots\dots \text{Pers 2.3 (Lit.4 hal.54)}$$

dengan :

$$\Delta T_{\text{rata-rata}} = \frac{(T_t - T_{s2}) - (T_c - T_a)}{\ln \frac{(T_t - T_a)}{(T_c - T_a)}}$$

Dimana :

$$Q_b = \text{Jumlah panas yang dibutuhkan ketel uap (kJ/jam)}$$

- T_t = Temperatur pembakaran bahan bakar ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{s_2} = Temperatur uap saat keluar *Superheater* ($^{\circ}\text{C}$)
- T_c = Temperatur asap yang keluar dari cerobong ($^{\circ}\text{C}$)
- T_a = Temperatur air umpan saat masuk *boiler* ($^{\circ}\text{C}$)
- F = *Heating surface* = 834 m^2 (Berdasarkan spesifikasi *boiler* yang digunakan di PTPN V)
- k = Koefisien perpindahan panas konveksi ($\text{kJ}/\text{m}^2 \text{ jam } ^{\circ}\text{C}$)
- $\Delta T_{\text{rata-rata}}$ = Selisih temperatur rata-rata antara gas asap terhadap uap ($^{\circ}\text{C}$)

2.7.4 *Specific Boiler Load*

Specific boiler load yaitu perbandingan antara uap yang dihasilkan oleh ketel uap (s) terhadap luas bidang yang dipanaskan (F). Dan untuk mendapatkan nilai *specific boiler load* dari ketel uap tersebut maka dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$L_e = \frac{S}{F} \text{ (kg uap}/\text{m}^2\text{)} \dots\dots\dots \text{Pers 2.4 (Lit.4 hal.55)}$$

Dimana :

- S = Produksi uap = 20000 $\text{kg}_{\text{uap}}/\text{jam}$
- F = *Heating surface* (m^2)
- L_e = *Specific boiler load* ($\text{kg uap}/\text{m}^2$)

2.7.5 *Kebutuhan Bahan Bakar*

Banyaknya pemakaian bahan bakar yang dibutuhkan ketel uap untuk menghasilkan uap dengan kondisi yang diinginkan dapat dihitung dengan rumus :

$$W_{fuel} = \frac{\dot{m}_u (h_{s_2} - h_a)}{\eta_b \cdot LHV} \text{ (kg}/\text{jam)} \dots\dots\dots \text{Pers 2.5 (Lit.7 hal.163)}$$

Dimana :

- \dot{m}_u = Laju aliran massa uap = 20000 $\text{kg}_{\text{uap}}/\text{jam}$
- h_{s_2} = Entalpi uap saat keluar *superheater* (kJ/kg)

h_a = Entalpi air umpan saat masuk boiler (kJ/kg)

η_b = 0,73 (Berdasarkan spesifikasi boiler yang digunakan di PTPN V)

LHV = *Low Heating Value* = 10173,92 kJ/kg

2.7.6 Evaporation Factor

Evaporation factor adalah perbandingan antara jumlah uap yang dihasilkan oleh ketel uap (s) terhadap pemakaian bahan bakar (W_f). Dan untuk mendapatkan nilai *evaporation factor* dari boiler maka dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$E_v = \frac{S}{W_f} \text{ (kg uap/kg bb)} \dots\dots\dots \text{Pers 2.6 (Lit.4 hal.55)}$$

Dimana :

S = Produksi uap = 20000 kg uap /jam

W_f = Pemakaian bahan bakar (kg bb/jam)

E_v = *Evaporation factor* (kg uap/kg bb)

2.7.7 Jumlah Panas Yang Dihasilkan Proses Pembakaran Bahan Bakar

Banyaknya jumlah panas yang dihasilkan proses pembakaran bahan bakar dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$Q_{in} = W_f \cdot LHV \text{ (kJ/jam)} \dots\dots\dots \text{Pers 2.7 (Lit.7 hal.49)}$$

Dimana :

Q_{in} = panas yang diserap ruang bakar (kJ/jam)

W_f = Pemakaian bahan bakar (kg bb/jam)

LHV = *Lower Heating Value* = 10173,92 kJ/kg

2.7.8 Kebutuhan Udara Pembakaran

Jika susunan bahan bakar diketahui, maka dapat dihitung jumlah kebutuhan udara pembakaran untuk menghasilkan pembakaran yang sempurna.

Bila terhadap bahan bakar tertentu hanya diberikan sejumlah udara teoritisnya (U_o) saja, maka pembakaran tidak akan menjadi sempurna, karena dengan udara teoritis (U_{og}) tersebut butiran-butiran bahan bakar tidak seluruhnya dikelilingi oleh udara yang cukup, sehingga harus diberikan udara pembakaran yang lebih banyak dari udara teoritis yang menurut perhitungan, untuk mencegah penguraian kembali atau diasosiasi dari CO_2 dan H_2O yang terbentuk, maka jumlah udara yang dibutuhkan untuk pembakaran bahan bakar dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$U_{og} = \frac{100}{23,1} \times (2,67 C + 8H - O + S) \text{ kg udara/kg bb..... Pers 2.8.1 (Lit.3 hal.74)}$$

Untuk mendapatkan pembakaran yang sempurna dari bahan bakar dibutuhkan penambahan udara sebesar aktual dapat diperoleh :

$$U_{ov} = \frac{100}{29,8} \times (2,67 C + 8H - O + S) \text{ nm}^3_{\text{udara}} / \text{kg bb..... Pers 2.8.2 (Lit.3 hal.74)}$$

Dimana :

U_{og} = Jumlah udara teoritis (kg udara/kg bb)

U_{ov} = Jumlah udara pembakaran bahan bakar aktual (nm³udara/kg bb)

C = Carbon

H = Hidrogen

O = Oksigen

S = Sulfur

2.7.9 Jumlah Gas Asap Yang Terbentuk

Berat gas asap yang terbentuk dari hasil pembakaran 1 kg bahan bakar adalah sama dengan jumlah berat udara yang dibutuhkan ditambah dengan berat bahan bakar yang berubah menjadi gas asap kecuali abunya, agar dapat menghitung jumlah gas asap yang terbentuk maka digunakanlah persamaan berikut:

$$G_{ov} = U_{ov} + 5,6 \left(H - \frac{O}{8} \right) 1,24 W + 0,8 N \text{ m}^3/\text{kg bb} \dots\dots \text{Pers 2.9 (Lit 3 hal.77)}$$

Dimana :

G_{ov} = Jumlah gas asap yang terbentuk ($\text{m}^3/\text{kg bb}$)

H = Hidrogen

O = Oksigen

N = Nitrogen

W = Air

2.7.10 Efisiensi Termal *Boiler*

Efisiensi termal *boiler* adalah perbandingan antara jumlah panas yang berguna bagi *boiler* dengan panas yang dihasilkan proses pembakaran bahan bakar, sehingga untuk dapat menghitung nilai efisiensi termal *boiler* maka digunakan persamaan berikut:

$$\eta_b = \frac{Q_{berguna}}{Q_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots \text{Pers 2.10 (Lit.7 hal.223)}$$

atau

$$\eta_b = \frac{\dot{m}_u (h_{s_2} - h_a)}{W_f \cdot \text{LHV}} \times 100\%$$

Dimana :

\dot{m}_u = Laju aliran massa uap = 20000 $\text{kg}_{\text{uap}}/\text{jam}$

η_b = Efisiensi *boiler* (%)

h_{s_2} = Entalpi uap saat keluar *superheater* (kJ/kg)

h_a = Entalpi air umpan saat masuk *boiler* (kJ/kg)

W_f = Jumlah bahan bakar yang digunakan ($\text{kg}_{\text{bb}}/\text{jam}$)

LHV = *Lower Heating Value* = 10173,92 kJ/kg