

BAHAN AJAR

**SISTEM PEMBANGKIT DAN
TURBIN UAP**

HMKB760



Dr. Rachmat Subagyo, S.T., M.T.

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMBUNG MANGKURAT
2018

KATA SAMBUTAN

Dekan Universitas Lambung Mangkurat, menyambut sangat baik dengan telah selesaiya **Bahan Ajar Sistem Pembangkit Dan Turbin Uap**, pada Prodi Teknik Mesin Universitas Lambung Mangkurat Banjarbaru. Bahan Ajar ini sangat penting untuk membantu kelancaran dalam proses belajar mengajar, khususnya bagi para mahasiswa agar lebih mudah dalam memahami materi kuliah. Bagi para tenaga pengajar (dosen) akan memudahkan dalam menyampaikan materi.

Saya berharap pembuatan Bahan Ajar ini, bisa diteruskan dan diikuti oleh dosen-dosen mata kuliah yang lain, sehingga menambah perbendaharaan buku-buku referensi di perpustakaan Fakultas Teknik Universitas Lambung Mangkurat Banjarbaru.

Semoga Bahan Ajar ini dapat dimanfaatkan dengan sebaik-baiknya oleh para mahasiswa, para pelajar maupun praktisi.

Banjarbaru, 6 September 2018

Dekan,

Dr-Ing. Yulian Firmana Arifin, M.T.
NIP. 19750719 200003 1 001

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur hanya bagi Alloh SWT. semata, karena atas segala petunjuk, rahmat dan hidayah Nya jualah, penyusun dapat menyelesaikan **Bahan Ajar Sistem Pembangkit dan Turbin Uap**. Tujuan dari pembuatan diktat ini adalah untuk memudahkan para mahasiswa dalam memahami pelajaran. Bahan Ajar ini telah disesuaikan dengan silabus Prodi Teknik Mesin Universitas Lambung Mangkurat.

Bahan Ajar ini terdiri dari 6 bab yang membahas tentang ; sejarah ketel uap, air pengisi ketel, pembentukan uap, perpindahan panas ketel, bahan bakar, peralatan efisiensi ketel. Diktat ditulis dengan bahasa yang sederhana sehingga mudah dipahami bagi yang membacanya.

Dengan selesainya penyusunan Bahan Ajar ini penyusun mengucapkan terima kepada :

1. Ach. Kusairi, S.T., M.M., M.T. selaku Kaprodi Teknik Mesin Universitas Lambung Mangkurat Banjarbaru yang telah mendukung penyusun dalam menyelesaikan Bahan Ajar ini.
2. Rekan-rekan program Studi Teknik Mesin yang telah memberikan masukan dan kritik.
3. Istri dan anak-anak tercinta yang telah memberikan motivasi dan semangat dalam menyusun diktat bahan kuliah ini.

Penyusun menyadari bahwa materi bahan Ajar ini masih banyak kekurangan, untuk itu masukan dan kritik akan penyusun terima dengan senang hati, untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga diktat bahan Ajar ini bermanfaat bagi penulis sendiri, para pembaca khususnya Prodi Teknik Mesin Universitas Lambung Mangkurat.

Banjarbaru, 6 September 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
SAMBUTAN DEKAN.....	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	iv
 BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Sejarah Perkembangan Ketel Uap.....	1
1.2. Klasifikasi Ketel Uap.....	3
BAB II AIR DAN SISTEM PEGOLAHAN AIR PENGISI KETEL	
2.1. Air Pengisi Ketel.....	6
2.2. Sistem Pengolahan Air Pengisi Ketel	13
BAB III UAP DAN PROSES PEMBENTUKAN UAP	
3.1. Siklus Thermodinamika.....	25
3.2. Uap (Steam).....	27
3.3. Diagram Fase Uap.....	30
3.4. Proses Pembentukan Uap.....	31
3.5. Kualitas Steam.....	33
3.6. Entalpi.....	33
3.7. Penggunaan Tabel Uap.....	39
BAB IV PERPINDAHAN PANAS KETEL	
4.1. Perpindahan Panas Pancaran.....	44
4.2. Perpindahan Panas Aliran.....	46
4.1. Perpindahan Panas Rambatan.....	47
BAB V BAHAN BAKAR DAN PEMBAKARAN	
5.1. Bahan Bakar Cair.....	59
5.2. Bahan Bakar Padat.....	65
5.3. Bahan Bakar Gas.....	71
5.4. Prinsip-Prinsip Pembakaran.....	74
5.5. Sistem Draft.....	81
5.6. Pemanasan Awal Minyak Bakar.....	82
5.7. Kontrol Suhu Minyak Bakar.....	82
5.8. Persiapan Bahan Bakar Padat.....	83
BAB VI PERALATAN EFISIENSI KETEL	
6.1. Pemanas Uap Lanjut (Superheater).....	87
6.2. Pemanas Air (Ekonomiser).....	97
6.3. Pemanas Udara (Air Heater).....	101

DAFTAR PUSTAKA

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Sejarah Perkembangan Ketel Uap

Uap (*steam*) dalam pembicaraan selanjutnya dimaksudkan uap air yaitu gas yang timbul akibat perubahan fase air (cair) menjadi uap (gas) dengan cara pendidihan (*boiling*). Untuk melakukan proses pendidihan diperlukan energi panas, yang diperoleh dari sumber panas, misalnya dari pembakaran bahan bakar (padat, cair, dan gas), tenaga listrik dan gas panas sebagai sisa proses kimia serta tenaga nuklir.

Penguapan bisa saja terjadi di sembarang tempat dan waktu pada tekanan normal (atm mutlak), bila di atas permukaan zat cair tekanan turun (atau diturunkan) di bawah tekanan mutlak. Uap yang terjadi (dihasilkan) dengan cara demikian tidak mempunyai energi potensial, jadi tidak dapat dipergunakan sebagai sumber energi.

Sudah beribu-ribu tahun manusia bersahabat dengan uap air, yaitu semenjak; manusia bisa melakukan pekerjaan merebus air (*boiling*), tetapi hanya baru dua abad ini mereka menemui bagaimana untuk mempergunakan uap bagi kepentingan mereka.

Para insinyur Yunani dan Romawi telah mempunyai pengetahuan yang menarik tentang sifat-sifat uap dan air panas, tetapi tidak mencoba untuk memakai ilmunya tersebut. Hero dari Iskandariah dengan *Whirling Aeolipyle*, mengembangkan prinsip turbin reaksi dan mesin jet seperti sekarang dalam bentuk yang sederhana, tetapi pada waktu itu direncanakan hanya sebagai permainan yang menggembirakan.

Tahun 1606 Giovanni Battista Porta merencanakan dua buah laboratorium percobaan yang memperlihatkan tenaga uap dan sistem kondensasi.

Tahun 1641 Galileo, seorang saintis besar terkenal dengan teleskopnya, pendulum dan percobaan dengan grafitasi, menyatakan bahwa air hanya dapat dipompa dari kedalamam 28 kaki (8,5344 m), tetapi dia meninggal di tahun berikutnya.

Tahun 1643, Evangelista Torrieelli, salah seorang murid Galileo, setelah dia wafat, meneruskan percobaan Galileo. Dia menemukan bahwa tekanan atmosfir dapat menahan kolom air setinggi 32 kaki (9,7536 m) bila di atas permukaan air tersebut keadaan vakum. Dia melakukan juga percobaan dengan air raksa; ternyata tekanan atmosfir dapat menahan 76 cm air raksa bila di atas permukaan air tersebut keadaan vakum, kalau dipakai kolom air maka dengan 10,336 m.

Tahun 1698, Thomas Savery memperoleh hak paten dari sebuah mesin pompa yang dengan sistem vakum, dengan memakai ketel uap dan pesawat kondensor. Boiler menghasilkan uap, uap dialirkan ke kondensor, air dalam tangki disiram kedalam kondensor, terjadi keadaan vakum, air dalam sumur naik mengisi ruang pompa. Bila tekanan dalam kondensor naik yaitu dengan mengalirkan uap baru pada boiler, maka air naik ke pipa transportasi. Dengan memakai safety valve (non return valve) air tak bisa kembali. Proses ini dapat dilakukan berulang-ulang, maka pekerjaan pemompaan air dapat dilakukan.

Tahun 1712 Thomas Newcomen dan John Calley, membuat mesin Uap yang pertama dengan sukses seperti terlihat pada Gambar 1.3. Uap yang dihasilkan boiler dialirkan ke dalam mesin uap lalu mengangkat piston sampai puncak. Bila setelah itu diinjeksikan air ke dalam mesin uap, maka tekanan uap sekonyong-konyong menjadi turun (vakum) maka piston tertarik kebawah. Sistem ini akan menimbulkan gerak turun naik dari piston (reciprocating). Tenaga mesin uap ini dapat menggerakkan pompa yang terdapat di sebelah kiri gambar.

Tahun 1764 sebuah model mesin Newcomen direparasi oleh James Watt, seorang pembuat instrument dari Glasgow University. Tahun 1769 James Watt mendapatkan Hak paten dari mesin uap ciptaannya. Menurut teori James Watt, uap adalah suatu media yang elastic, dapat mengembang hingga vakum. James Watt merancang mesin uap dengan silinder (tabung) dan sebuah piston

(pengempa/penghisap) dengan sebuah kondensor dan sebuah pompa udara. Banyak rancangan mesin dibuat oleh James, sesudah itu, diantaranya *Mesin Tuas Putar Kerja Ganda* seperti terlihat dalam Gambar 1.6 dengan di perkenalkannya mesin ini maka berubahlah gerak vertikal menjadi gerak rotasi.

Revolusi Industri mulai kira-kira tahun 1750, ini merupakan tantangan terhadap kebutuhan tanaga penggerak (motive power). Pemakaian uap sebagai motive power, mantap (well establish).

1.2 Klasifikasi Ketel Uap

Ketel uap pada dasarnya terdiri dari bumbung (drum) yang tertutup pada ujung pangkalnya dan dalam perkembangannya dilengkapi dangan pipa api maupun pipa air. Banyak orang mengklasifikasikan ketel uap tergantung kepada sudut pandang masing-masing.

Ketel uap diklasifikasikan dalam kelas, antara lain :

1. Berdasarkan Fluida yang mengalir dalam pipa, maka ketel diklasifikasikan sebagai :

- a. Ketel pipa api (*fire tube boiler*).

Pada ketel pipa api, fluida yang mengalir dalam pipa adalah gas nyala (hasil pembakaran), yang membawa energi panas (*thermal energy*), yang segera mentransfer ke air ketel melalui bidang pemanas (*heating surface*). Tujuan pipa-pipa api ini adalah untuk memudahkan distribusi panas (kalori) kepada air ketel.

- b. Ketel pipa air (*water tube boiler*).

Pada ketel pipa air, fluida yang mengalir dalam pipa adalah air, sedangkan di luar pipa adalah gas nyala (hasil pembakaran), yang membawa energi panas (*thermal energy*), yang segera mentransfer ke air ketel melalui bidang pemanas (*heating surface*).

2. Berdasarkan pemakaianya, ketel dapat diklasifikasikan sebagai :

- a. Ketel stasioner (*stationary boiler*) atau ketel tetap.

Yang termasuk stasioner ialah ketel-ketel yang didudukkan di atas pondasi yang tetap, seperti boiler untuk pembangkit tenaga, untuk industry dan lain-lain yang sepertinya.

- b. Ketel Mobil (*Mobile Boiler*), ketel pindah atau *portable boiler*.

Yang termasuk ketel mobil, ialah ketel yang dipasang pada pondasi yang berpindah-pindah (*mobile*), seperti boiler lokomotif, loko mobil dan ketel panjang serta lainnya yang sepertinya termasuk juga ketel kapal (*marine boiler*).

3. Berdasarkan letak dapur (*furnace position*), ketel uap diklasifikasikan menjadi

- a. Ketel dengan pembakaran di dalam (*internally fired steam boiler*)

Dalam hal ini dapur berada (pembakaran terjadi) di bagian dalam ketel. Kebanyakan ketel pipa api memakai system ini.

- b. Ketel dengan pembakaran di luar (*outternally fired steam boiler*)

Dalam hal ini dapur berada (pembakaran terjadi) di bagian luar ketel, kebanyakan ketel pipa air memakai system ini.

4. Menurut jumlah lorong (*boiler tube*), ketel diklasifikasikan sebagai:

- a. Ketel dengan lorong tunggal (*single tube steam boiler*).

Pada *single tube steam boiler*, hanya terdapat satu lorong saja, apakah itu lorong api atau saluran air saja. *Cornish boiler* adalah *single file tube boiler* dan *simple vertical boiler* adalah *water tube boiler*.

- b. Ketel dengan lorong ganda (*multi tubeler steam boiler*).

Multi file tube boiler misalnya ketel scotch dan *muti water tube boiler* misalnya ketel B dan W dan lain-lain.

5. Tergantung kepada poros tutup drum (shell), ketel diklasifikasikan sebagai :

- a. Ketel tegak (*Vertikal steam boiler*)

Seperi ketel Cochran, ketel Clarkson dan lain-lain sebagainya.

- b. ketel mendatar (*horizontal steam boiler*),

Seperti ketel Cornish, Lancashire, Scotcth dan lain-lain.

6. Menurut bentuk dan letak pipa, ketel uap diklasifikasikan sebagai :
 - a. Ketel dengan pipa lurus, bengkok dan berlekak-lekuk (*straight, bent, and sinus tubeler heating suface*).
 - b. Ketel dengan pipa miring-datar dan miring tegak (*horizontal, inclined or vertical tubeler heating suface*).
7. Menurut system peredaran air ketel (*water circulation*), ketel uap diklasifikasikan sebagai :
 - a. Ketel dengan peredaran alam (*natural circulation steam boiler*).

Pada *natural circulation boiler*, peredaran air dalam ketel terjadi secara alami, yaitu air yang ringan naik sedang air yang berat turun, sehingga terjadilah aliran conveksi alami. Umumnya ketel beroperasi secara aliran alami, seperti ketel Lancashire, Babcock dan Willcox dan lain-lain.
 - b. Ketel dengan peredaran paksa (*forced circulation steam boiler*).

Pada ketel dengan aliran paksa (*forced circulation steam boiler*), aliran paksa diperoleh dari sebuah pompa centrifugal yang digerakkan dengan electric motor misalnya. System aliran paksa dipakai pada ketel-ketel yang bertekanan tinggi seperti La-Mont Boiler, Benson Boiler, Loeffler Boiler dan Velcan Boiler.
8. Berdasar sumber panasnya (*heat source*) untuk pembuatan uap, ketel uap dapat diklasifikasikan sebagai :
 - a. Ketel uap dengan bahan bakar alami.
 - b. Ketel uap dengan nahan bakar buatan
 - c. Ketel uap dengan dapur listrik.
 - d. Ketel uap dengan energi nuklir.

BAB II

AIR DAN SISTEM PENGOLAHAN AIR PENGISI KETEL

2.1. Air Pengisi Ketel

Setiap sumber air mengandung zat-zat kimia yang berbeda tergantung pada struktur geologi yang kontak dengan air itu. Air yang dipakai untuk proses dalam industri harus memenuhi syarat kwalitas air sesuai dengan penggunaannya. Karena pemakaian air yang tidak memenuhi syarat dapat merugikan industri itu sendiri. Air pengisi ketel uap yang tidak memenuhi syarat dapat menimbulkan kerak-kerak ketel yang mengganggu penghantaran panas. Hal ini menyebabkan pemborosan bahan bakar dan produksi uap. Juga zat-zat tertentu dapat menyebabkan dinding ketel uap menjadi korosi, rapuh dan lemah yang dapat mengakibatkan peledakan.

Ketel uap (boiler) adalah suatu bejana tertutup yang bisa menghasilkan uap, yang didalamnya terjadi banyak reaksi kirniawi yang rumit dan kompleks yang langsung berada dibawah tekanan, dan unsur-unsur yang menyebabkan timbulnya macam-macam endapan, kerak dan lain sebagainya. Ada pula yang mengakibatkan terjadinya berbagai jenis korosi, pembusaan, priming, carry over (ian coustik embrittlement). Sesuatu unsur dalam air baru menarik perhatian sesudah di dalam ketel timbul gangguan-gangguan. Air yang baik untuk ketel tekanan rendah belum tentu dapat digunakan dengan baik untuk ketel tekanan tinggi. Air yang baik untuk air minum belum tentu baik untuk air ketel uap dan sebaliknya air yang baik untuk ketel uap belum tentu baik untuk air minum.

Oleh karena di alam ini sebenarnya tidak ada air yang secara langsung dapat memenuhi syarat sebagai air pengisi ketel yang baik, maka air umpan (pengisi ketel) harus terlebih dahulu diperiksa di laboratorium pemeriksaan air agar dapat mengetahui komposisi yang terkandung didalamnya, sehingga lebih dapat ditentukan cara-cara pengolahannya. Jadi kesimpulannya adalah *jangan sekali-kali memakai air sebagai pengisi ketel/pesawat uap sebelum kita mengetahui*

komposisi-komposisi yang terkandung didalamnya.

Problem yang memungkinkan timbulnya bahaya-bahaya didalam pembuatan uap dengan menggunakan air yang tidak memenuhi syarat antara lain :

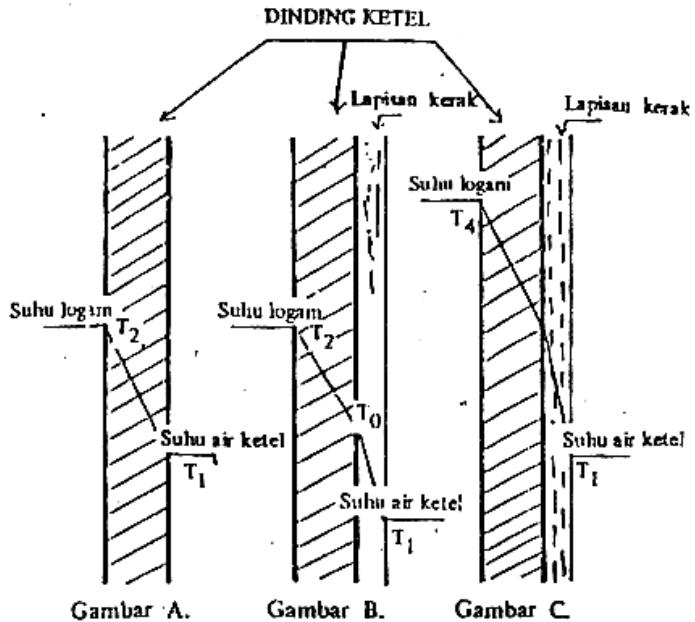
- a. Pembentukan **kerak** dan **endapan** (didalamnya termasuk akibat sampingan).
- b. Terjadinya macam-macam **korosi** pada dinding-dinding/ pipa-pipanya.
- c. Timbulnya proses-proses pembusahan (foaming), priming, carry over.
- d. Terjadinya caustic embrittlement.

2.1.1. Kerak dan Endapan

Terbentuknya kerak dan endapan pada dinding-dinding ataupun pada pipa-pipa ketel uap adalah merupakan suatu hal yang serius didalam produksi uap. Sebab utama terjadinya kerak adalah menurunnya daya larut garam-garam yang membentuk kerak-kerak pada suhu yang tinggi. Oleh karena itu lebih tinggi suhu ketel uap, maka makin rendahlah daya larut garam-garam itu sehingga mempercepat terjadinya kerak pada dinding-dinding ketel.

Adapun mekanisme pembentukan kerak pada dinding ketel uap adalah bahwa lapisan air yang herada di dekat dinding ketel (berupa film tipis) menjadi lebih pekat dibandingkan dengan air yang berada di sebelah dalamnya, sehingga lama kelamaan akan **menebal pengeras** dan terjadilah apa yang disebut kerak yang menempel pada dinding-dinding tersebut.

Kerak ini merupakan lapisan isolasi yang mempunyai daya hantar yang rendah sekali. sehingga sangat mengurangi efisiensi terhadap pembentukan uap. Dapat kita gambarkan disini bahwa kerak dengan tebal 2 mm, dapat menurunkan efisiensi sampai mencapai 10% (sepuluh perseratus) yang berarti merupakan pemborosan bahan bakar. Tetapi yang lebih berbahaya lagi dalam hal ini adalah terjadinya pemanasan berlebih (**overheating**) dinding-dinding ketel yang akhirnya dapat merusak system ketel uap secara keseluruhan. Terjadinya pemanasan berlebih dapat digambarkan seperti dalam gambar dibawah ini, yaitu ilustrasi mengenai pengaruh kerak terhadap panas sehingga dapat merusak dinding ketel.



Gambar 2.1 : Pembentukan kerak dan endapan

Keterangan :

Gambar A

Dinding ketel tanpa ada kerak sedikitpun, sehingga suhu logam akan diteruskan ke air ketel menjadi suhu air ketel meskipun ada penurunan suhu, dalam hal ini untuk mudahnya terlihat dalam gambar suhu dianggap turun dari suhu logam (T_2) menuju kesuhu air ketel (T_1).

Gambar B

Dinding ketel dengan adanya kerak, disini tampak dengan jelas bahwa disaniping adanya penurunan suhu logam yaitu T_2 ke suhu air ketel yaitu T_1 . Maka dengan terdapatnya kerak pada dinding ketel yang merupakan suatu isolasi terhadapnya terdapatlah penurunan suhu tersendiri yaitu suhu logam (T_2) yang akan diteruskan menjadi suhu air ketel yang sebelumnya sudah mengalami penurunan akibat adanya kerak, jadi disini terjadi penurunan suhu dua kali. Pada gambar nampak dengan jelas suhu logam (T_2) turun ke (T_0) dan mengalami penurunan lagi ke suhu air ketel (T_1).

Gambar C

Digambar ini memperlihatkan kenaikan suhu pada logam (T_4) mana kenaikan suhu ini sangat di butuhkan untuk dapat mempertahankan suhu air ketel itu sendiri (T_1). Sebelumnya sudah dibahas bahwa setiap ada penambahan tebal kerak maka diperlukan penambahan panas pada logamnya, sedangkan logam yang merupakan dinding ketel itu sendiri mempunyai batas aman didalam menerima panas, adapun batas aman itu lebih kurang adalah sekitar 485°C . Jika batas aman itu dilampaui, maka mengakibatkan tersuket atau retaknya pada pelat ketel pada bagian sisi api. Tidak heran lagi kalau sering menjumpai penggantian pelat ketel uap ataupun pipa-pipa karena retak, melengkung dan lain sebagainya, ini tidak ada lain akibat kualitas air yang digunakan untuk mengisi ketel kurang baik.

2.1.1.1. Jenis-Jenis Kerak Yang Timbul

Penggunaan bahan baku air pengisi ketel yang kurang baik, sangat berpengaruh terhadap komponen boiler, khususnya yang bersentuhan langsung dengan air umpan. Jadi jangan menggunakan air untuk mengisi ketel jika belum mengetahui mengenai komposisi kimiai yang dikandungnya secara jelas. Jenis-jenis kerak yang ditimbulkan oleh air umpan yang kurang baik, antara lain :

- a. Kerak karbonat (CaCO_3) .
- b. Kerak gips (CaSO_4) .
- c. Keraksilikat (CaSiO_3) .
- d. Kerak analciet $(\text{Na}_2\text{O AL}_2\text{O}_34\text{SiO}_2 2\text{H}_2\text{O})$ dsb.
- e. Endapan atau kerak lumpur.

2.1.1.2. Ciri-Ciri Jenis Kerak

- a. Kerak/endapan kalsium karbonat

Ciri-ciri kerak jenis ini adalah :

- keras dan padat.
- kristalnya halus.
- rapuh
- larut dalam asam.

b. Kerak/endapan silikat

Ciri-ciri kerak jenis ini adalah :

- keras seperti porselin.
- tidak larut dalam asam.

c. Kerak/endapan analciet

Ciri-ciri kerak jenis ini adalah :

- keras seperti porselin.
- kristalnya lebih halus.
- keraknya sangat padat.
- melekat sangat kuat sekali pada logam (dinding/pipa ketel).
- mempunyai daya hantar yang sangat rendah sekali.
- tidak larut dalam asam:

d. Kerak/endapan besi

Ciri-ciri kerak jenis ini adalah :

- warna coklat kehitam-hitaman.
- larut dalam asam.

2.1.2. Korosi

Korosi adalah merupakan suatu materi tersendiri yang memerlukan pembahasan lebih mendalam, sebab-sebab terjadinya korosi pada pesawat uap, yaitu :

- a. pH yang terkandung didalam air terlalu rendah.
- b. Gas-gas yang masih ada didalam air seperti oksigen, karbondioksida dan sebagainya.
- c. Garam-garam magnesium Klorida dan besi sulfat yang agak terlalu tinggi kadarnya.
- d. Aliran lisirik lokal.
- e. Reaksi antara besi/bahan dan uap yang terjadi karena sirkulasi uap dan air yang kurang sempurna (design fault).
- f. Tegangan tegangan pada las-lasan kelingan-kelingan, sambungan-sambungan dan lain-lain.

2.1.3. Pembusaan (Foaming), Priming dan Carry Over

Pembusaan (Foaming) ini kadang-kadang disertai dengan loncatan-loncatan air ketel bersama-sama dengan uap, maka kejadian-kejadian itu disebut priming. Dan jika proses tadi dilanjutkan dengan loncatan-loncatan kecil air ketel dengan uap disebut carry over. Ketiga proses diatas memang sebenarnya dapat diistilahkan proses carry over saja, yang diawali dengan foaming selanjutnya baru terjadi priming dan yang terakhir adalah carry over.

2.1.4. Caustic Embrittlement

Caustic embrittlement atau dapat disebut dengan Crackin terkristalen adalah karena rusaknya (failure) pelat ketel oleh karena :

- a. Adanya rongga-rongga halus pada tempat-tempat las atau kelingan-kelingan.
- b. Adanya tegangan pada bahan pesawat uap.
- c. Konsentrasi larutan alkali hidroksida yang tinggi sekali yaitu antara 75.000 ppm - 500.000 ppm. Jadi caustic embrittlement itu berarti bisa terjadi bila dari ketiga faktor itu ada.

2.1.5. Usaha Pencegahan Terhadap Akibat Buruk Dari Pemakaian Air

Usaha yang harus dilakukan untuk mencegah terhadap akibat buruk yang ditimbulkan dari pemakaian air pengisi yang tidak baik adalah :

- a. **Usaha pencegahan terhadap timbulnya kerak**
 - melaksanakan pengolahan air secara baik dan teliti sesuai dengan petunjuk yang diberikan oleh Laboratorium.
 - hindari pemakaian air untuk mengisi ketel tanpa mengetahui komposisi kimia yang dikandungnya.
 - hindari pemakaian air tanpa pengolahan terlebih dahulu
 - melaksanakan pengurusan sewaktu-waktu/kontinue.
 - hindari adanya garam yang berbahaya dalam air pengisi ketel.
- b. Usaha pencegahan terhadap timbulnya korosi.
 - pH air tidak boleh terlalu rendah (sesuai petunjuk dari Laboratorium).

- pH air harus disesuaikan dengan tekanan kerja yang dibutuhkan, pH serendah-rendahnya 7 dan setinggi-tingginya 10.
 - Mengurangi garam-garam Magnesium Clorida dan besi sulfat yang disesuaikan dengan syarat kwalitas dari air pengisi ketel.
 - Menghindari/mengurangi gas-gas yang larut dalam air pengisi seperti Oksigen dan karbon dioksida dsb.
 - Menghindari terjadinya sirkulasi uap dan air yang kurang sempurna didalam ketelnya karena kesadahan desain.
 - Pemeliharaan ketelnya terutama hal ketelnya sedang tidak di pakai.
- c. Usaha pencegahan terhadap timbulnya carry over
- Membatasi/menghilangkan minyak dalam air.
 - Mengurangi zat-zat paciat yang terlarut dalam air.
 - Melaksanakan peugurasan
- d. Usaha pencegahan terhadap timbulnya caustic embrittlement
- Hindari adanya ronggga-rongga halus pada tempat las/ kelingan.
 - Hindari terjadinya tegangan pada bahan ketel/pesawat uap.
 - Hindari konsentrasi larutan alkali yang terlalu tinggi (75.000 - 500.000 ppm).

2.1.6. Syarat-Syarat Air Pengisi Ketel

Penggunaan air sebagai pengisi ketel uap, memerlukan persyaratan-persyaratan tertentu sehingga dengan ditaatinya persyaratan-persyaratan itu ketel lebih aman dan akibat-akibat negatif yang akan terjadi dapat dihindarkan. Persyaratan air pengisi ketel/pesawat uap pada dasarnya ditentukan oleh tipe dari pesawat dan tekanan kerjanya. Air pengisi ketel uap yang memenuhi syarat adalah air yang tidak merusak dinding ketel uap pada temperature tinggi dan tekanan tertentu.

Syarat-syaratnya adalah :

- a. Air tidak boleh membentuk kerak/endapan yang membahayakan (pada dinding ketel saluran uap dan lain-lain).
- b. Air tidak boleh bersifat korosif terhadap dinding ataupun pipa-pipa dari pesawat uapnya.

- c. Air tidak boleh menimbulkan terjadinya proses-proses pembusaan, priming dan carry over.
- d. Air tidak boleh menyebabkan dinding ketel menjadi rapuh (caustic embrittlement).

Satuan-satuan air ketel :

- a. ppm = part per million = mg/l
- b. epm = equivalen per million = $\frac{\text{ppm}}{\text{berat equivalen}}$
- c. GPG = Grains per US Gallon = GPG x 17,1 = ppm
- d. Pounds per 1000 gallon = 1 b per 1000 gal x 12 = ppm
- e. Gram per liter = g per liter : 1000 = ppm

2.2. Sistem Pengolahan Air Pengisi Ketel

Telah diuraikan diatas bahwa air yang tersedia selalu mengandung bermacam-macam garam, gas, lumpur dan lain sebagainya serta untuk mengetahui unsur-unsur kandungannya, harus melalui analisa-analisa kimia.

Kalau air masuk ke dalam ketel tanpa ada pengolahan terlebih dahulu maka garam-garam kalsium dan magnesium yang terkandung di dalamnya karena kena panas akan mengendap, endapan ini melekat pada dinding-dinding ketel menjadi kerak, makin lama air didalam ketel akan menjadi lebih kental dan reaksi lain timbul yang mengakibatkan mengendap dari silikat, aluminium, besi yang dapat membentuk kerak-kerak yang lebih berbahaya lagi.

2.2.1. Jenis-Jenis Pengolahan

Dalam mengadakan pengolahan air pengisi ketel/pesawat uap ada dua jenis pengolahan diantaranya adalah:

- External Treatment (Pengolahan luar)
- Internal Treatment (Pengolahan dalam)

2.2.1.1. Pengolahan Luar (External Treatment)

Pengolahan ini berupa pemberian obat-obatan atau pengolahan yang bersifat mekanis yang dilakukan terhadap air sebelum air masuk ke dalam pesawat uap, jadi jenis pengolahan ini dilakukan di luar pesawat (ketelnya). Tujuan pengolahan ini adalah untuk menghilangkan zat-zat padat yang terkandung didalamnya, menghilangkan zat-zat yang larut dan dapat membahayakan ketel uap. Serta menghilangkan gas-gas yang korosif. Pengolahan luar yang biasa dilakukan dapat memperoleh air-air yang memenuhi syarat didalam keperluan air pengisi ketel adalah : penjernihan, pelunakan, airasi dan deaerasi dan penurunan/menghilangkan kadar silikat.

a. Penjernihan.

Proses ini dapat berupa :

- Penjernihan biasa atau pengendapan dan penjernihan (clarification).
- Koagulasi atau pengendapan dan penyaringan koagulasi dilakukan terhadap air yang keruh yang disebabkan oleh lumpur halus yang sukar (lama) mengendap sehingga tidak dapat disaring (1 - 100 mm).

Prinsip koagulasi

Lumpur harus bermuatan negatif oleh karena banyaknya muatan negatif maka daya tekannya besar sehingga lumpur halus tadi sukar mengendap, Dengan penambahan unsur-unsur yang bermuatan positif, maka muatan negatif dapat dinetralisirkan, dan tidak selalu bergerak, sehingga dapat merigendap, sebagai floc. Unsur-unsur yang dipakai adalah garam-garam aluminium sulfat, besi sulfat, dan besi chloride.

Reaksi-reasi yang terjadi adalah:

1. $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{O} + 3 \text{Ca}(\text{HCO})_2 = 2 \text{Al}(\text{OH})_3 + \text{CaSO}_4 + 6 \text{CO}_2 + (\text{X}+6)\text{H}_2\text{O}$
2. $2\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{Ca}(\text{OH})_2 \equiv 2\text{Al}(\text{OH})_3 + 2\text{CaSO}_4$
3. $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{Na}_2\text{CO}_3 + 6 \text{H}_2\text{O} = \text{A.1(011)}_3 + \text{Nn}_2\text{S04} + 3 \text{CO}_2$

Untuk mengetahui berapa garam Aluminium Sulfat yang diperlukan dengan tepat, harus dilakukan dengan apa yang disebut "Jar - Test" pH optimum proses koagulasi dengan Aluminium Sulfat 6,5 - 7,5 P¹¹ optimum proses koagulasi dengan besi sulfat 5 - 10.

Penjernihan dengan proses koagulasi ini terdiri dari 3 operasi :

- Pencampuran dengan aluminium sulfat.
 - Pengadukan cepat (100 rpm) = 2 menit.
 - Pengadukan lambat (20 rpm) 10 menit.
- Pembentukan floc.
- Pengendapan.

Koagulasi yang baik pasti akan menghasilkan air yang jernih, tidak berwarna, koagulasi disusul dengan penyaringan lewat saringan pasir cepat.

Karakteristik setelah proses koagulasi :

- Airnya jernih dan tidak berwarna
- Air netral.
- Alkalitetnya sedikit turun.
- Tetapi belum dapat di pakai untuk mengisi ketel uap tanpa ada pengolahan lanjutan.

b. Pelunakan

Proses ini bertujuan terutama untuk menurunkan kesadahan air, hal ini dapat dilakukan dengan :

1. Penambahan kapur tohor (CaO) atau kapur padam Ca (OH)...
2. Kapur tohor bersama dengan soda ash (Na₂CO₃).
3. Dengan natrium phosphat.
4. Dengan Cation Exchanger.

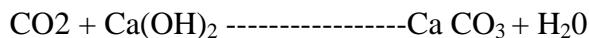
1) Pelunakan dengan kapur

Penambahan kapur dapat dilakukan pada suhu biasa (Cold lime softening) dapat pula pada suhu panas (hot lime softening) Pelunakan dengan kapur hanya dapat menurunkan kesadahan sampai ± 2°D, karena sifat kelarutan

CaSO₃ yang kurang lebih 15 ppm; pelunakan dengan phosphat atau dengan cation exchanger dapat mencapai kesadahan nol. Reaksi yang terjadi pada pelunakan dengan kapur adalah:

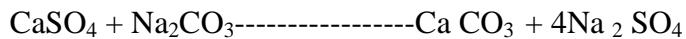
1. $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \div \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdots \cdots \cdots 2\text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$
2. $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2, \cdots \cdots \cdots \text{MgCO}_3 + \text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$
3. $\text{MgCO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdots \cdots \cdots \text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{CaCO}_3$

Kalau dalam air ada pula CO₂ maka terjadi juga reaksi:

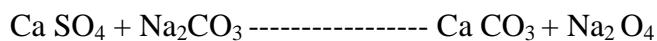
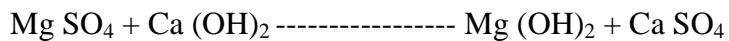
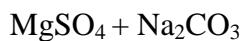


2) Pelunakan dengan kapur dan soda

Kalau air mengandung kesadahan tetap, maka ditambahkan kedalam air soda ash (Na₂CO₃) untuk menurunkan kesadahan tetap ini reaksi-reaksi kimianya adalah sebagai berikut :



Dan jika kesadahan tetapnya senyawa magnesium. maka yang dipakai kapur dan soda yang reaksinya sebagai berikut:



Reaksi ini diperlukan untuk menghitung penambahan bahan kapur atau soda atau kapur dan soda

3) Pelunakan dengan fosfat

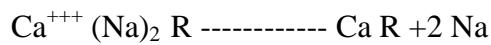
Pelunakan ini dapat menghasilkan air dengan kesadahan nol, dan pelunakan ini sangat banyak dipakai untuk memproses air untuk pengisi ketel uap tekanan tinggi yang lunak dan air yang mengandung alkalitet rendah.

4) Pelunakan dengan pertukaran ion

Proses ini dilakukan dengan mengalirkan air lewat butir-butir resin buatan yang disimpan dalam tangki, resin-resin tadi mempunyai daya serap terhadap ion-ion yang ada dalam air, ada dua jenis resin pertukaran ion :

- resin penukar kation untuk (Ca, Mg).
- resin penukar anion untuk (Cl, SO₄, SiO₂)

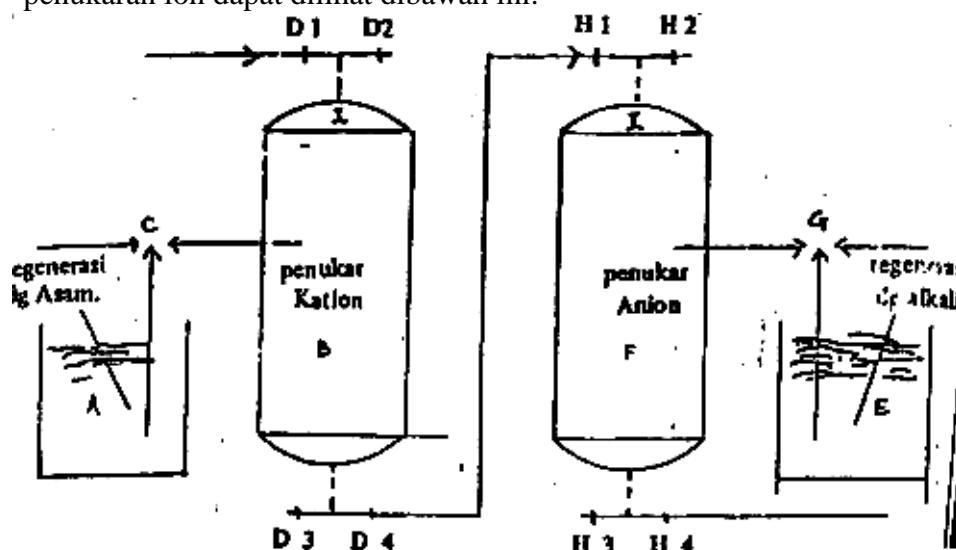
Kalau air yang mengandung Ca dan Mg lewat resin kation maka akan terjadi penukaran ion sebagai berikut.:



Berapa jumlah air yang dapat ditukarkan dengan resin penukar kation ini tergantung pada beberapa faktor :

- a. jenis resin.
- b. banyaknya resin
- c. tinggi rendahnya kesadahan air yang akan dilunakkan
- d. kecepatan air yang melalui resin

Proses yang bertujuan menghilangkan semua kandungan garam yang berada dalam air pengisi ketel dengan sistem mengalirkan airnya lewat resin kation dan resin anion disebut *demineralisasi*. Cara-cara pengolahan dengan resin penukaran ion dapat dilihat dibawah ini.



Gambar 2.2 : Cara kerja alat pelunakan air dengan alat penukar kation/demineralisasi air dengan alat penukar kation dan penukar anion

Keterangan gambar :

- I. A. Bak larutan asam-asam klorida 1 - 10% dan asam-asam sulfat 1 - 5%

atau larutan garam dapur.

- A. Tangki isi resin penukar kation.
 - B. Pompa isap air.
 - C. 1, 2, 3, dan 4 adalah keran-keran penutup
- II. E. Bak larutan alkali.
- F. Tangki isi resin penukar anion.
 - G. Pipa isap air.
 - H. 1, 2, 3 dan 4 adalah keran-keran penutup.

Cara kerjanya:

- Tutup keran D2 dan D3.
- Air yang sudah yang akan dilunakkan dialirkan melalui bagian atas dari Tangki B selanjutnya air melewati tapisan resin kation dan keluar melalui keran D4. menjadi air lunak.

Regenerasi (membuat aktif kembali resin) adalah :

- Keran D1, D2 dan D4 ditutup sedangkan keran D3 dibuka.
- Aliran air lewat G maka larutan garam (asarn) dalam hak A akan terisap, terus inelewati resin kation selanjutnya air akan keluar dari keran D3.
- Biarkan air mengalir tenis schingga air yang keluar dari keran D3 ditak terasa asam/asin.
- Lama regenerasi ini lebih kurang sekitar 20 smapai 30 menit.

f. Bachwast (CUCI).

Tujuannya adalah untuk membuat resin tidak terlalu padat dan untuk rnencuci bersih dari sisa kotoran alkalinya.

Caranya adalah alirkan air dari bawah melewati keran D3 menuju keatas dan keluar melewati keran D2 lamanya mengalirkan sampai air jernih kira-kira memakan waktu lebih kurang sekitar 10 menit.

g. Cara demineralisasi air

Tutup keran H2 dan H3, air yang telah lunak dari produk alat pelunakan air diatirkan melalui bagian atas dari tangki F, air mengalir melewati resinanion keluar melalui keran H4 adalah demineral.

h. Regenerasi

Keran H1, H2 dan H3 ditutup, sedangkan keran H3 dibuka. Alirkan air melalui keran C maka larutan alkali pada bak E akan terisap mengalir melewati resin anion air akan keluar dari keran H3 hingga tidak berasa alkalis:

i. Bachwah (CUCI).

Tujuannya adalah untuk membuat resin tidak terlalu padat dan untuk membersihkan sisa kotoran alkalinya.

Caranya adalah alirkan air melalui keran H3 menuju keatas dan keluar melalui keran H2 lamanya mengalirkan sampai air jernih kira-kira memakan waktu lebih kurang sekitar 10 menit.

j. Aerasi dan Deaerasi

Aerasi adalah suatu pengolahan dengan cara meniupkan udara kedalam air dengan tujuan mengoksidir unsur-unsur besi dan mangan sehingga dapat mengendap dan dikeluarkan dari air dalam pabrik tekstil untuk mengoksidasikan besi dan mangan pada air sehingga mudah dinengelap dan dapat disaring. Pelaksanaan dari proses ini adalah

1. Sistem air terjun air dipompa dulu keatas selanjutnya dijatuhkan lewat lobang-lobang kecil.
2. Udara ditiupkan kedalam air lewat lobang kecil dalam pipa yang dipasang sedemikian rupa didalam tempat penampungan air itu sendiri.

Membuang atau menurunkan kadar oksigen dalam air, proses ini sangat penting bagi air yang akan dipakai sebagai pengisi ketel nap tekanan tinggi. Pelaksanaan proses ini adalah

1. Secara termis air dalam tangki tetentu dipanaskan sampai suhu didih, dengan sistem ini dapat menurunkan kadar oksigen yang terkandung didalamnya sampai 0,1 - 0,2 ppm.
2. Dengan alat "Degasating heteros" dapat menurunkan kadar oksigen sampai mencapai 0,005 ppm.

k. Proses menurunkan atau menghilangkan silikat

Didepan sudah diterangkan bahwa yang paling berbahaya dari semua kerak yang dapat terbentuk didalam dinding atau pipa-pipa didalam pesawat Uap

adalah kerak silikat oleh karena itu untuk mengurangi kerak ini sebaiknya dipakai air yang kadar silikatnya serendah mungkin atau kadar silikatnya yang terdapat didalam air dihilangkan sama sekali atau dibuat sekecil mungkin dengan sesuatu proses.

Cara-cara pengolahannya adalah :

1. Proses magnesia secara panas, dalam proses ini air yang akan diolah diberi magnesium oksida pada suhu lebih kurang sekitar 70°C dalam reaktor khusus, proses ini biasanya digabungkan dengan pelunakan yang menggunakan kapur sehingga yang dipakai adalah kapur bersama magnesium oksida. Sesudah diaduk selama sekitar 10 menit maka kadar silikat dalam air dapat turun sampai 10 ppm.
2. Dengan alat penukaran ion.
3. Proses fluo silikat.
4. Penyulingan (air kondensat).

2.2.1.2. Pegolahan Dalam (Internal Treatment)

Pengolahan ini berupa pemberian obat-obatan (chemicals) langsung ke dalam ketel bersama-sama dengan air pengisi ketel. Sehingga reaksi-reaksi yang timbul dengan obat-obatan tadi terjadi didalam ketel uap pada suhu dan tekanan kerja ketel uap, hasil-hasil reaksi kimia tadi tetap berada dalam ketel, hal ini mengakibatkan naiknya kadar zat padat/endapan yang dapat mengakibatkan pembusaan/priming dan carry over tetapi jumlah zat padat dalam air ketel dapat ditekan dengan pengaturan blowdown, sehingga dari kesukaran-kesukaran yang akan terjadi dapat diatasi.

Pengolahan air dalam ketel bertujuan mengontrol korosi, kerak dan buih yang timbul dengan penambahan bahan kimia. Korosi dapat dicegah dengan penghilangan oksigen dan karbondioksida serta mengatur pH bersifat alkalis. Kerak (scaling) dikendalikan dengan mengikat kesadahan dalam air, sehingga mencegah timbulnya endapan-endapan yang dapat melekat dan mengeras

pada dinding atau pipa-pipa ada pada ketel uap dan membuat lapisan dinding ketel lebih tahan terhadap korosi. Jenis-jenis obat yang biasa dipakai antara lain ; soda ash, garam-garam fosfat, natrium hidroksida, Hidrazin, tanina /lignin/sesquet agents dan sebagainya.

Jenis obat-obatan berupa “preparats” yang dikomposisikan oleh negara pembuat seperti : Algor (Jepang), Nalico (US), Veccorn (Belanda), Kurita (Jepang), Gambelen (Australia), dan sebagainya.

2.2.2. Bahan Kimia Untuk Mengolah Air Pengisi

Agar supaya dapat menaikkan pH dari 7 sampai 9, diperlukan kenaikan ion hidroksida OH, oleh karena itu dipergunakan bahan kimia yang bisa menaikkan pH, yaitu yang mempunyai sumber ion hidroksida.

a. Pengolahan dengan NaOH (soda ash/soda abu)

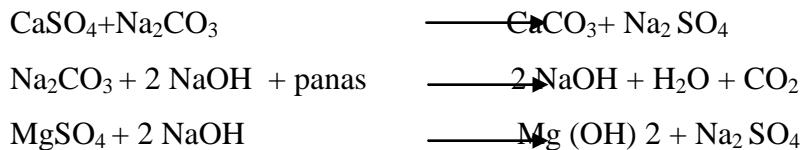
Pengolahan ini disebut juga dengan pengolahan *Coustic soda* (Sodium Hiroksida).Pengolahan ini adalah bertujuan untuk menetralisir asam garan, asam dan gas dan menaikkan alkalitas air. Pengolahan ini jarang dipakai untuk ketel uap tekanan tinggi karena mudah membuat timbulnya Caustic embrittlement, sistem ini sangat berguna sekali untuk menghindarkan kesadahan magnesium dan pemakaiannya biasanya dikombinasikan dengan garam fosfat yang asam atau yang sedikit asam.

Sumber ion hidroksida (OH⁻) diambil dari Sodium Hidroksida. Zat ini relatif murah dan dapat dibeli seperti zat padat dan larutan lain,dan mudah diperoleh dalam bentuk murni.

Untuk pengolahan kondisi air pengisi pada unit tekanan tinggi adalah tidak cocok, karena zat ini secara fisik bentuknya padat. Zat tersebut akan membentuk deposit di dalam pipa desuperheater dan pipa superheater, dan pada temperatur tinggi endapan ini menimbulkan masalah korosi yang

menyebabkan terjadinya keretakan. Untuk inilah maka digunakan zat kimia yang mudah menguap.

Reaksi-reaksi yang timbul



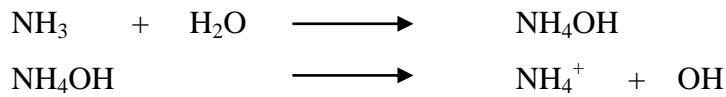
Reaksi diatas menunjukkan bahwa dengan penambahan soda yang cukup sudah dapat :

- Menghilangkan kesadahan tetap.
- Membentuk endapan CaCO_3 dan Mg(OH)_2 sebagai lumpur yang mudah dikuras.
- Tetapi karena kernungkinan terurai, dapat membuat tidak semua kesadahan tetap dapat diendapkan.

Memang masih akan timbul kerak tipis, tetapi lunak dan rupanya seperti kulit telur, komposisi hiasanya terutama kalsium karbonat dan sedikit sekali silikat dan sulfat.

b. Amonia (NH_3)

Amonia berupa gas dan merupakan gas yang paling mudah larut dari semua gas. Pada temperatur ruang, satu unit volume air dapat dilarutkan kira-kira 1.400 unit volume amonia.



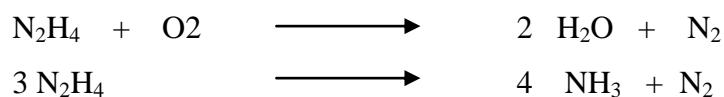
Secara praktis 0,2 – 0,5 ppm NH_4^+ (kurang lebih 0,2 ppm) cukup dapat memberikan pH yang diinginkan. Amonia ditambahkan pada pelepasan pompa ekstrasi atau pada keluaran deareator (lebih disukai) dengan cara injeksi

menggunakan variabel stroke closing pump, dimana amonia tersebut dalam bentuk larutan dalam air yang bebas mineral.

Konsentrasi amonia yang tinggi dapat menyebabkan korosi, lubang – lubang dan retak (keadaan akan retak) khususnya pada tembaga alloy di bagian lewatnya udara ekstrasi, dari kondensor dan untuk mengatasi ini harus dilakukan pengontrolan konsentrasi amonia. Pengecekan secara reguler di daerah kuning pada logam secara tetap adalah perlu, dan pengambilan contoh pipa kondensor untuk pengecekan metalurgi.

c. Hidrazin N_2H_4

Hidrazin yang murni adalah tidak stabil dan mudah meletup. Hidrazin yang diperlukan adalah 35 % larutan. Hidrazin adalah suatu zat penghilang oksidasi dan dalam keadaan murni menghasilkan gas – gas :



Hidrazin ditambahkan pada pelepas pompa ekstrasi sama caranya dengan penambahan amonia, begitu juga konsentrasi hidrazin yang dimasukkan pada sisi masuk ekonomiser kira – kira 0,02 ppm, tentu kira – kira 5 kali konsentrasi oksigen pada tempat ini. Ada hubungan antara konsentrasi hidrazin dengan konsentrasi tembaga, besi dan nikel didalam air pengisi.

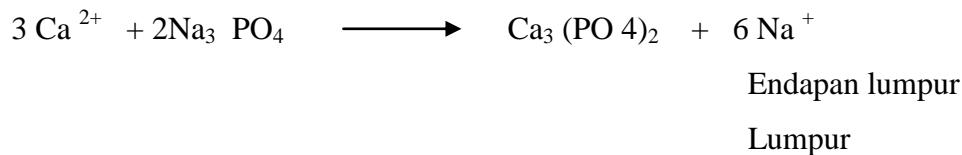
Perbandingan yang tepat bervariasi antara tempat yang satu dengan tempat lain, tetapi kira – kira 0,02 – 0,05 ppm N_2H_4 . Menurut teori pada konsentrasi tersebut di atas, hidrazin menghasilkan pelindung oksida magnetit yang lebih baik di dalam ekonomiser / boiler. Hal yang sama, beberapa sumber mengatakan bahwa kadar oksigen terlarut praktis nol ($< 0,005$ ppm O₂) dan ini menguntungkan sekali.

d. Sodium Phosphat (Na₃PO₄)

Ini adalah pengolahan dalam yang lebih bersifat fisis untuk menghindari timbulnya kerak, pengolahan ini adalah berupa penambahan zat-zat organik dan fosfat seperti tanin lignin, zat-zat itu kita dapat mengatur kondisi air sehingga menjadi sedemikian rupa yang pada akhirnya zat-zat yang timbul tidak dapat melekat pada dinding dan dapat dibuang dengan pengurasan.

Larutan sodium phospat sedikit basa, sehingga bila diinjeksikan ke dalam air ketel akan menaikkan pH air ketel. Fungsi injeksi phospat (Na₃PO₄) adalah mengontrol / menaikkan pH air boiler, sehingga pH air boiler dijaga sekitar 10,0. Selain itu injeksi phospat bertujuan untuk mencegah penggerakan yang diakibatkan oleh kesadahan air (Ca, Mg). Bila diinjeksikan phospat maka akan terbentuk endapan lumpur yang bisa dibuang lewat blow down.

Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut :



BAB III

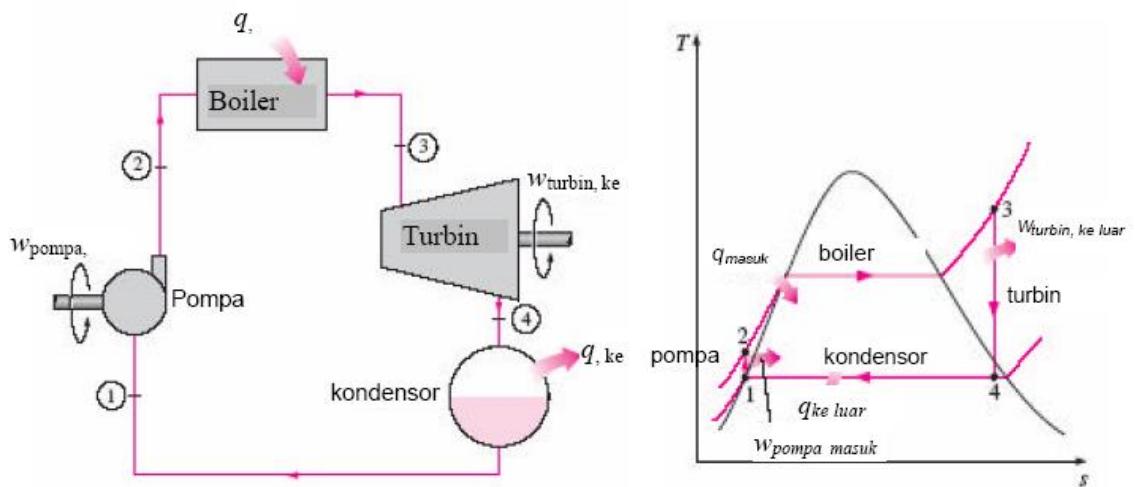
UAP DAN PROSES PEMBENTUKAN UAP

Mesin tenaga uap merupakan jenis mesin pembakaran luar dimana fluida kerja dengan sumber energi terpisah. Sumber energi kalor dari proses pembakaran digunakan untuk membangkitkan uap panas. Uap panas dibangkitkan di dalam boiler atau sering disebut ketel uap. Untuk memperoleh uap dengan temperatur yang tinggi digunakan superheater. Pada superheater uap dipanaskan lagi menjadi uap panas lanjut sehingga temperaturnya naik. Selanjutnya uap panas dimasukan ke turbin uap untuk diekspansi yang akan menghasilkan energi mekanik.

Pada turbin uap energi uap panas dikonversi menjadi energi mekanik di dalam sudu-sudu turbin uap. Energi mekanik yang berupa putaran poros turbin uap akan menggerakan generator pada instalasi pembangkit listrik tenaga uap.

3.1. Siklus Thermodinamika Pembangkit Uap

3.1.1. Siklus ideal dari siklus Rankin



Gambar 3.1 : Siklus ideal (Rankine)

Proses thermodinamika Siklus Ideal Rankin :

- 1-2 Proses kompresi adiabatis berlangsung pada pompa
- 2-3 Proses pemasukan panas pada tekanan konstan terjadi boiler

3-4 Proses ekspansi adiabatis berlangsung pada turbin uap

4-1 Proses pengeluaran panas pada tekanan konstan pada kondensor.

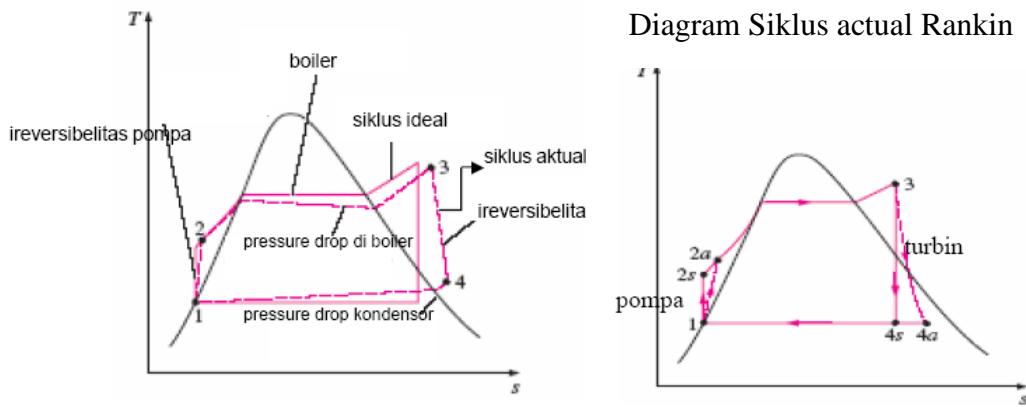
Penjelasan Siklus Rankin

Fluida kerja berupa air jenuh dari kondensor dikompresi di pompa sampai masuk boiler . Dari proses kompresi pada pompa terjadi kenaikan temperatur T_1 ke T_2 kemudian di dalam boiler air dipanaskan dari T_2 ke T_3 . Sumber energi panas (q_{masuk}) berasal dari proses pembakaran bahan bakar. Uap panas masuk turbin dan berekspansi sehingga temperatur dan tekanan turun ($T_3 \sim T_4$). Selama proses ekspansi pada turbin terjadi perubahan dari energi fluida menjadi energi mekanik pada sudu-sudu dan menghasilkan putaran poros turbin. Uap yang keluar dari turbin kemudian dikondensasi (pendinginan) pada kondensor sehingga sebagian besar uap air menjadi mengembun, kemudian siklus berulang lagi.

3.1.2. Siklus Aktual dari Siklus Rankine

Penyimpangan siklus aktual dari siklus ideal disebabkan karena beberapa faktor seperti gesekan fluida, kerugian panas, dan kebocoran uap. Gesekan fluida mengakibatkan tekanan jatuh pada banyak perlengkapan seperti boiler, kondensor dan di pipa-pipa yang menghubungkan banyak perlengkapan. Tekanan jatuh yang besar pada boiler mengakibatkan pompa membutuhkan tenaga yang lebih untuk memompa air ke boiler. Tekanan jatuh juga mengakibatkan tekanan uap dari boiler ke turbin menjadi lebih rendah sehingga kerja turbin tidak maksimal.

Kerugian energi panas juga banyak terjadi pada perlengkapan. Pada turbin karena proses ekspansi uap panas pada sudu-sudu dan rumah turbin banyak kehilangan panas. Kebocoran uap juga mengakibatkan kerugian yang tidak dapat diremehkan, biasanya terjadi di dalam turbin. Karena sebab-sebab tersebut mengakibatkan efisiensi menjadi turun.



Gambar 3.2 : Siklus aktual (Rankine)

3.2. Uap (Steam)

Uap air adalah fluida yang merupakan fase gas dari air, bila mengalami pemanasan sampai temperatur didih di bawah tekanan tertentu. Uap air tidak berwarna, bahkan tidak terlihat bila dalam keadaan murni kering. Pada sistem pembangkit, uap digunakan sebagai energi panas yang dihasilkan dari pemanasan air pengisi ketel. Penggunaan uap sebagai penggerak pada turbin, dengan alasan karena karena sifat-sifatnya :

- Steam efisien dan ekonomis untuk dihasilkan
- Steam dapat dengan mudah dan murah untuk didistribusikan ke titik penggunaan
- Steam mudah dikendalikan
- Energinya mudah di transfer ke proses
- Steam bersifat fleksibel
- Dapat menyimpan sejumlah besar energi

Wujud air (titik triple) yaitu fase padat, cair dan gas. Seluruh tiga fase untuk bahan tertentu hanya dapat secara bersamaan dalam suatu kesetimbangan pada suhu dan tekanan tertentu, dan hal ini dikenal dengan titik triple. Titik triple H_2O , dimana tiga fase es, air dan steam berada dalam kesetimbangan, terjadi pada suhu $273,16 \text{ }^{\circ}\text{K}$ dan tekanan absolut $0,006112 \text{ bar}$. Tekanan ini sangat dekat ke

kondisi vakum sempurna. Jika pada suhu ini tekanannya terus diturunkan, es akan mencair, dan menguap langsung menjadi steam.

a. Fase Padat (Es)

Dalam es, molekul terkunci bersama dan tersusun dalam pola struktur geometris yang hanya dapat bergetar. Dalam fase padatnya, pergerakan molekul pada pola geometris merupakan getaran posisi ikatan tengah dimana jarak molekulnya kurang dari satu diameter molekul. Penambahan panas yang terus menerus menyebabkan getaran yang meningkatkan bahkan mengembangkan beberapa molekul yang kemudian akan terpisah dari tetangganya, dan bahan padat mulai meleleh menjadi bentuk cair (selalu pada suhu yang sama pada 0°C , berapapun tekanannya). Panas yang memecahkan ikatan geometris untuk menghasilkan perubahan fase tersebut sementara tidak menaikkan suhu es, disebut *entalphi* pencairan atau panas penggabungan/ fusi.

b. Fase Cair

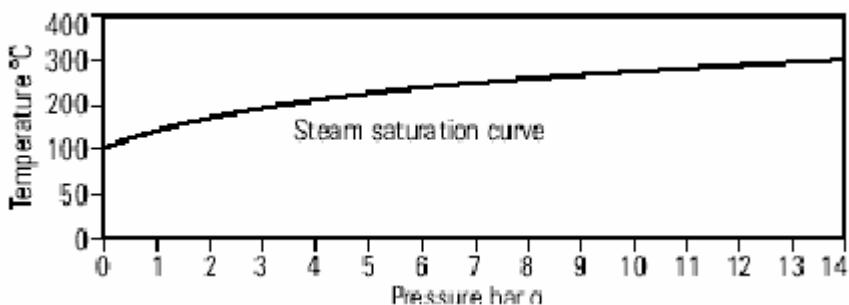
Dalam fase cair, molekul -molekulnya bebas bergerak, namun jaraknya masih lebih kecil dari satu diameter molekul karena seringnya terjadi tarik-menarik dan tumbukan. Penambahan panas yang lebih banyak akan meningkatkan pengadukan dan tumbukan, naiknya suhu cairan sampai suhu didihnya.

c. Fase Gas

Dengan meningkatnya suhu dan air mendekati kondisi didihnya, beberapa molekul mendapatkan energi kinetik yang cukup untuk mencapai kecepatan yang membuatnya sewaktu-waktu lepas dari cairan ke ruang diatas permukaan, sebelum jatuh kembali ke cairan. Pemanasan lebih lanjut menyebabkan eksitasi lebih besar dan sejumlah molekul dengan energi cukup untuk meninggalkan cairan jadi meningkat. Dengan mempertimbangkan struktur molekul cairan dan uap, masuk akal bahwa densitas steam lebih kecil dari air, sebab molekul steam terpisah jauh satu dengan yang lainnya. Ruang yang secara tiba-tiba terjadi diatas permukaan air menjadi terisi dengan molekul steam yang kurang

padat. Jika jumlah molekul yang meninggalkan permukaan cairan lebih besar dari yang masuk kembali, maka air menguap dengan bebasnya. Pada titik ini air telah mencapai titik didihnya atau suhu jenuhnya, yang dijenuhkan oleh energi panas. Jika tekanannya tetap, penambahan lebih banyak panas tidak mengakibatkan kenaikan suhu lebih lanjut namun menyebabkan air membentuk steam jenuh. Suhu air mendidih dengan steam jenuh dalam sistem yang sama adalah sama, akan tetapi energi panas per satuan massa nya lebih besar pada steam.

Pada tekanan atmosfir suhu jenuhnya adalah 100°C . Tetapi , jika tekanannya bertambah, maka akan ada penambahan lebih banyak panas yang peningkatan suhu tanpa perubahan fase. Oleh karena itu, kenaikan tekanan secara efektif akan meningkatkan entalpi air dan suhu jenuh. Hubungan antara suhu jenuh dan tekanan dikenal sebagai kurva steam jenuh (gambar 3.3).



Gambar 3.3 : Kurva steam jenuh (Spirax Sarco)

Air dan steam dapat berada secara bersamaan pada berbagai tekanan pada kurva ini, keduanya akan berada pada suhu jenuh. Steam pada kondisi diatas kurva jenuh dikenal dengan superheated steam/steam lewat jenuh :

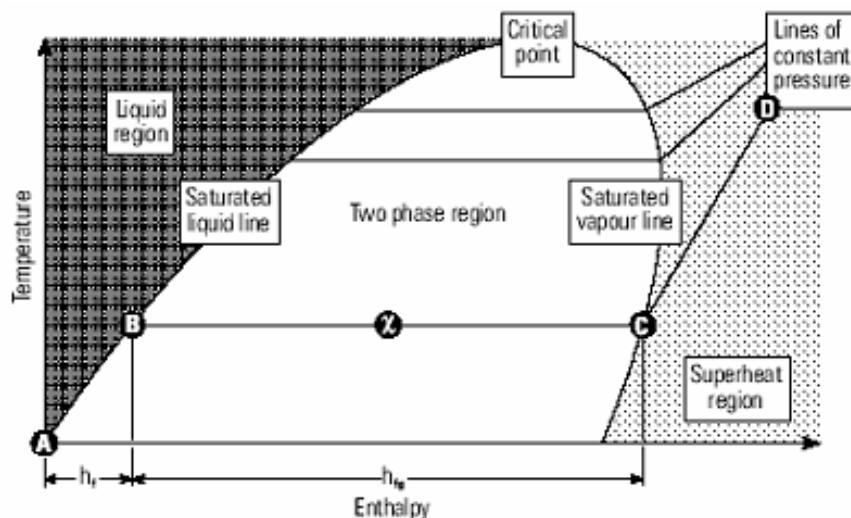
- Suhu diatas suhu jenuh disebut derajat steam lewat jenuh
- Air pada kondisi dibawah kurva disebut air sub- jenuh.

Jika steam dapat mengalir dari boiler pada kecepatan yang sama dengan yang dihasilkannya, penambahan panas lebih lanjut akan meningkatkan laju produksinya. Jika steam yang sama tertahan tidak meninggalkan boiler, dan

jumlah panas yang masuk dijaga tetap, energi yang mengalir ke boiler akan lebih besar dari pada energi yang mengalir keluar. Energi berlebih ini akan menaikkan tekanan, yang pada gilirannya akan menyebabkan suhu jenuh meningkat, karena suhu steam jenuh berhubungan dengan tekanannya.

3.3. Diagram Fase Uap

Data yang diberikan dalam tabel steam dapat juga dinyatakan dalam bentuk grafik. Gambar 3.4 memberi gambaran hubungan antara entalpi dan suhu pada berbagai tekanan, dan dikenal dengan diagram fase.



Gambar 3.4 : Diagram fase Entalpi – suhu (Spirax Sarco)

Ketika air dipanaskan dari $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ sampai suhu jenuhnya, kondisinya mengikuti garis cair jenuh sampai menerima seluruh entalpi cairannya, h_f , (A - B). Jika panas ditambahkan lebih lanjut, maka akan merubah fase ke steam jenuh dan berlanjut meningkakan entalpi sambil tetap pada suhu jenuhnya, h_{fg} (B - C). Jika campuran steam/air meningkat kekeringannya, kondisinya bergerak dari garis cair jenuh ke garis uap jenuh. Oleh karena itu pada titik tepat setengah diantara kedua keadaan tersebut, fraksi kekeringan (x) nya sebesar 0,5. Hal yang sama, pada garis uap jenuh steamnya 100 persen kering. Begitu menerima seluruh entalpi penguapannya maka akan mencapai garis uap jenuh. Jika pemanas

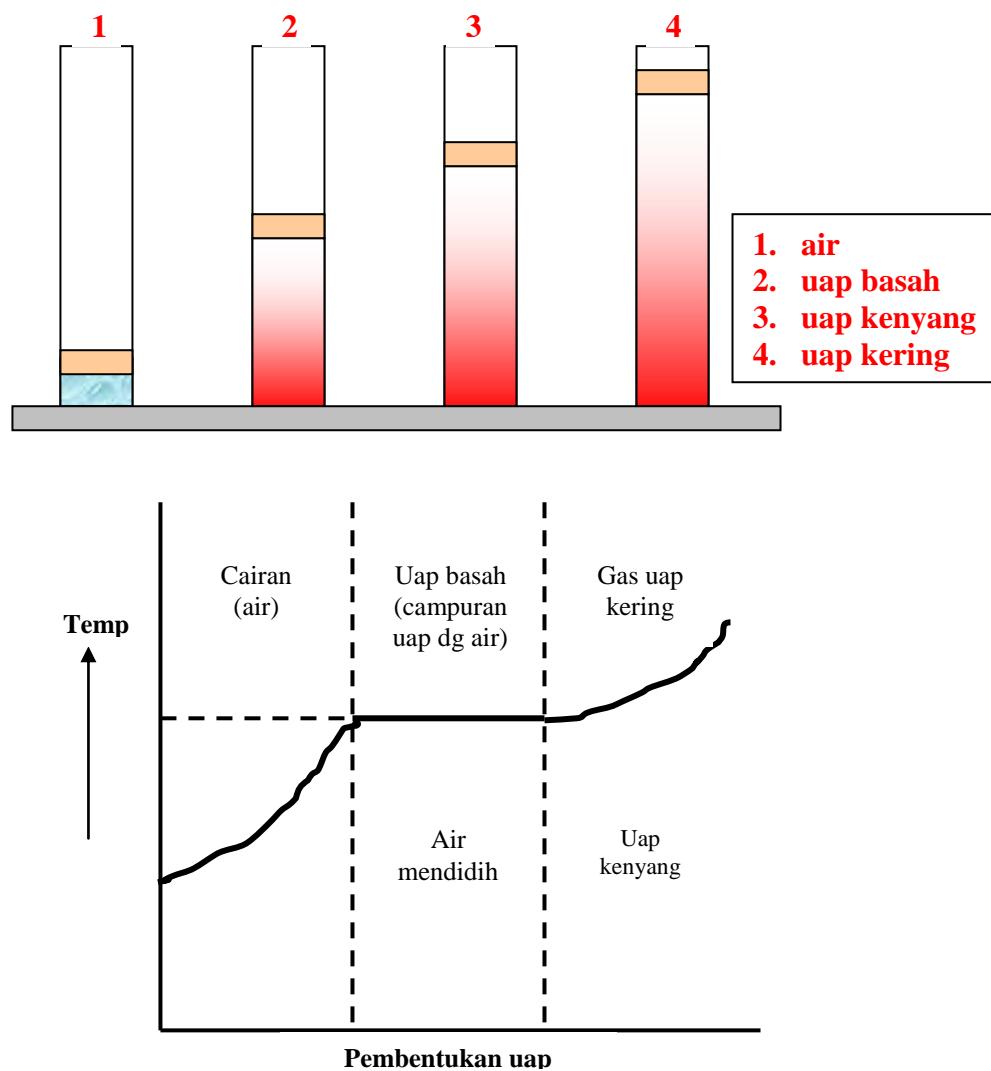
dilanjutkan setelah titik ini, suhu steam akan mulai naik mencapai lewat jenuh (C - D). Garis-garis cairan jenuh dan uap jenuh menutup wilayah dimana terdapat campuran steam/air – steam basah. Dalam daerah sebelah kiri garis cair jenuh, hanya terdapat air, dan pada daerah sebelah kanan garis uap jenuh hanya terdapat steam lewat jenuh. Titik dimana garis cairan jenuh dan uap jenuh bertemu dikenal dengan titik kritis. Jika tekanan naik menuju titik kritis maka entalpi penguapannya berkurang, sampai menjadi nol pada titik kritisnya. Hal ini menunjukkan bahwa air berubah langsung menjadi steam jenuh pada titik kritisnya. Di atas titik kritis hanya gas yang mungkin ada. Keadaan gas merupakan keadaan yang paling terdifusi dimana molekulnya hampir memiliki gerakan yang tidak dibatasi, dan volumnya meningkat tanpa batas ketika tekanannya berkurang. Titik kritis merupakan suhu tertinggi dimana bahan berada dalam bentuk cairan. Pemberian tekanan pada suhu konstan di bawah titik kritis tidak akan mengakibatkan perubahan fase. Walau begitu, pemberian tekanan pada suhu konstan dibawah titik kritis, akan mengakibatkan pencairan uap begitu melintas dari daerah lewat jenuh/ superheated ke daerah steam basah. Titik kritis terjadi pada suhu $374,15^{\circ}\text{C}$ dan tekanan steam 221,2 bars. Diatas tekanan ini steam disebut superkritis dan tidak ada titik didih yang dapat diterapkan .

3.4. Proses Pembentukan Uap

Keadaan uap tergantung dari tekanannya, oleh karena itu pembentukan uap diadakan pada tekanan konstan, mendekati hal yang dialami uap dalam sebuah ketel. Ambil 1 kg air dengan temperatur mula 0°C dipanaskan di dalam sebuah tangki tertutup dengan torak yang dapat bergerak bebas yang akan mempertahankan tekanan konstan. Selama pemanasan tingkat pertama temperatur air akan naik sampai air mendidih pada temperatur yang dikenal sebagai temperatur didih, besamya tergantung pada tekanan dalam tangki.

Setelah temperatur didih dicapai, uap mulai terbentuk selama temperatur dipertahankan konstan, sampai dicapai titik dimana semua air berubah menjadi uap. Isi tangki akan berupa campuran air dan uap, ini dikenal sebagai **uap basah**.

Dalam keadaan ini, apabila semua air, termasuk butir-butir yang terapung dalam uap basah itu diuapkan, maka didapat apa yang disebut dengan **uap kenyang**. Dengan perkataan lain, uap kenyang ialah suatu keadaan uap dimana ia tepat berwujud uap seluruhnya. Dapat dianggap bahwa temperatur uap (basah atau kenyang) sama dengan temperature air mendidih darimana uap tersebut terbentuk (gambar 3.5). Jumlah panas yang diperlukan untuk mengubah 1 kg air mendidih menjadi kg uap kenyang pada tekanan yang sama, dinamakan entalpi penguapan laten. Begitu pemanasan dilanjutkan temperature uap kenyang itu naik dan uap ini dikenal sebagai **uap kering**.



Gambar 3.5 : Grafik pembentukan uap

Uap Kenyang

Ciri-ciri uap kenyang adalah sebagai berikut :

- a. Dalam keadaan seimbang dengan air yang ada di bawahnya
- b. Mempunyai tekanan dan temperatur mendidih yang sama dengan tekanan dan temperatur mendidih air yang ada di bawahnya
- c. Mempunyai pasangan-pasangan harga antara tekanan (P) dan temperatur mendidihnya (T_d)
- d. Apabila didinginkan akan segera mengembun menjadi air
- e. Apabila melakukan ekspansi atau dibiarkan mengembang akan mengembun menjadi air

Uap Kering

Ciri-ciri uap kering adalah sebagai berikut :

- a. Temperturnya (T_u) jauh lebih tinggi di atas temperatur air mendidih (T_d) pada tekanan P Newton/m²
- b. Uap yang tidak bisa seimbang dengan air
- c. Tidak mempunyai pasangan-pasangan harga antara tekanan (P) dan temperturnya (T_u)
- d. Apabila didinginkan tidak akan mengembun
- e. Apabila melakukan ekspansi tidak akan mengembun
- f. Tidak dapat membuat uap kering dari uap kenyang selama uap tersebut masih bersinggungan dengan air yang ada di bawahnya.

3.5. Kualitas steam

Steam harus tersedia pada titik penggunaan:

- a. Dalam jumlah yang benar untuk menjamin bahwa aliran panas yang memadai tersedia untuk perpindahan panas
- b. Pada suhu dan tekanan yang benar, atau akan mempengaruhi kinerja
- c. Bebas dari udara dan gas yang dapat mengembun yang dapat menghambat perpindahan panas

- d. Bersih, karena kerak (misal karat atau endapan karbonat) atau kotoran dapat meningkatkan laju erosi pada lengkungan pipa dan orifice kecil dari steam traps dan kran
- e. Kering, dengan adanya tetesan air dalam steam akan menurunkan entalpi penguapan aktual, dan juga akan mengakibatkan pembentukan kerak pada dinding pipa dan permukaan perpindahan panas.

3.6. Entalpi

3.6.1. Entalpi Air, Entalpi Cairan atau Panas Sensible Air (h_f)

Merupakan energi panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu air dari titik dasar 0°C ke suhu saat itu. Pada referensi suhu 0°C ini , entalpi air dianggap nol. Entalpi pada keadaan lainnya kemudian dapat diidentifikasi, relatif terhadap referensi ini. Panas sensibel merupakan panas yang ditambahkan ke air yang mengakibatkan perubahan suhu. Tetapi istilah yang digunakan saat ini adalah entalpi cairan atau entalpi air. Pada tekanan atmosfer (0 bar g), air mendidih pada suhu 100°C , dan diperlukan energi sebesar 419 kJ untuk memanaskan 1 kg air dari 0°C ke suhu didihnya 100°C . Dari gambar didapat besarnya kapasitas panas air (CP) sebesar 4,19 kJ/kg $^{\circ}\text{C}$ yang diperoleh untuk hampir semua perhitungan antara 0°C dan 100°C .

3.6.2. Entalpi Penguapan atau Panas Laten (h_{fg})

Merupakan jumlah panas yang diperlukan untuk mengubah air pada suhu didihnya menjadi steam. Perubahan ini tidak melibatkan perubahan pada suhu campuran steam/air, dan seluruh energi digunakan untuk mengubah keadaan dari cairan (air) ke uap (steam jenuh). Istilah lama panas laten didasarkan pada kenyataan bahwa walaupun ditambahkan panas, tidak terdapat perubahan suhu. Tetapi , istilah yang diterima saat ini adalah entalpi penguapan. Seperti halnya perubahan fase dari es ke air, proses penguapan juga bersifat dapat balik. Jumlah panas yang menghasilkan steam dilepaskan kembali ke lingkungan sekitarnya selama pengembunan, jika steam menjumpai semua permukaan yang bersuhu

rendah. Panas ini merupakan bagian panas yang berguna dalam steam yang dapat diambil selama steam mengembun kembali ke air.

3.6.3. Entalpi Steam Jenuh atau Panas Total Steam Jenuh

Merupakan energi total dalam steam jenuh, yang secara sederhana merupakan penjumlahan entalpi air dan entalpi penguapan.

$$H_g = h_f + h_{fg}$$

dimana :

H_g = Entalpi total steam jenuh (Panas total) (kJ/kg)

h_f = Entalpi cairan (Panas sensibel) (kJ/kg)

h_{fg} = Entalpi penguapan (Panas laten) (kJ/kg)

Entalpi (dan sifat-sifat lainnya) steam jenuh dapat dengan mudah dilihat dengan menggunakan hasil tabulasi dari percobaan sebelumnya, dikenal dengan tabel steam. Tabel steam memberi daftar sifat-sifat steam pada berbagai tekanan. Nilai-nilai tersebut merupakan hasil pengujian aktual yang telah dilakukan terhadap steam.

3.6.4. Fraksi Kekeringan

Steam dengan suhu sama dengan titik didihnya pada tekanan tertentu dikenal dengan steam jenuh kering. Walau demikian, untuk menghasilkan 100 persen steam kering pada suatu industri boiler yang dirancang untuk menghasilkan steam jenuh sangatlah tidak memungkinkan, dan steam biasanya akan mengandung tetesan-tetesan air. Dalam prakteknya, karena adanya turbulensi dan pencipratan, dimana gelembung steam pecah pada permukaan air, ruang steam mengandung campuran tetesan air dan steam. Jika kandungan air dari steam sebesar 5 persen massa, maka steamnya dikatakan kering 95 persen dan memiliki fraksi kekeringan 0,95. Entalpi yang sebenarnya dari penguapan steam basah merupakan produk fraksi kekeringan (x) dan entalpi spesifik (h_{fg}) dari tabel steam. Steam basah akan memiliki energi panas yang lebih rendah daripada steam jenuh kering.

$$\boxed{\text{Entalpi penguapan aktual} = h_{fg} x}$$

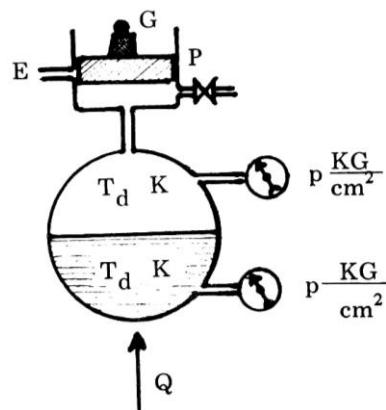
Oleh karena itu :

$$\boxed{\text{Entalpi total aktual} = h_f + h_{fg} x}$$

Karena volume spesifik air beberapa tingkat lebih rendah daripada steam, tetesan air dalam steam basah akan menempati ruang yang dapat diabaikan. Oleh karena itu volum spesifik steam basah akan lebih kecil dari steam kering.

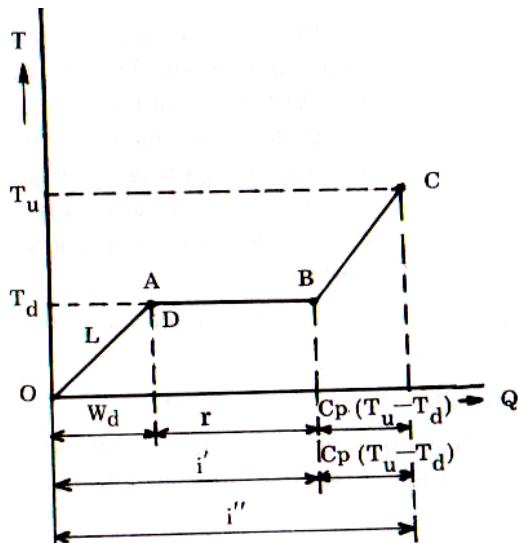
$$\boxed{\text{Volume spesifik aktual} = v_g x}$$

Dimana : v_g adalah volume spesifik steam jenuh kering.



Gambar 3.6 : Bejana steam

Sebuah bejana yang terdapat 1 kg air dan uap saja (udara telah dikeluarkan), kemudian bejana tersebut dipanasi, sedangkan air dan uap dalam bejana tersebut diatur supaya tetap konstan sebesar p Newton/m², dengan memberi pemberat G kg, di atas torak P yang bebas geseran.



Gambar 3.7 : Diagram temperatur – jumlah panas

Dimulai dari titik O, dengan tempratur air dan uap masih 0°C atau 273 K. Pada saat itu harga $Q_0 = 0$ kilojoule/kg air dan uap. Tekanan $p_1 \text{ kg/m}^2$ diatur dengan memberi pemberat $G_1 \text{ kg}$ di atas torak bebas geseran P. Bila pemanasan dilakukan demikian, sehingga air dan uap kenyang (uapnya adalah uap kenyang karena dalam keadaan seimbang dan berdampingan dengan air), telah mencapai temperatur T_1 K, maka jumlah panas yang dibutuhkan adalah sebanyak Q_1 kilojoule/kg air dan uap.

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= \text{Panas jenis air} \times (T_1 - T_0) \\
 &= \text{Panas jenis air} \times (T_1 - 273^{\circ}\text{K}) \\
 &= \text{Panas jenis air} \times t_1 \\
 &= W_1 \text{ kilojoule / kg air dan uap}
 \end{aligned}
 \quad \boxed{\text{Panas jenis air} = 4,187 \text{ KJ/kg. K}}$$

Persamaan tersebut merupakan persamaan linier pada T sehingga grafiknya akan berupa garis lurus mulai dari titik O ($T^{\circ} = 273 \text{ K} = 0^{\circ}\text{C} = \text{titik O}$) hingga Kdimana $OK_1 = Q_1 = W_1$ kilojoule/kg.

W₁ disebut **kalor zat cair** atau **entalpi air** yaitu jumlah panas (dalam Kilojoule/kg) yang diperlukan oleh 1 kg air dari 0°C atau 273 K untuk dinaikkan temperturnya hingga mencapai T_1 K pada tekanan p_1 Newton/m².

Untuk mengetahui jumlah panas yang diperlukan untuk membuat 1 kg air dari 0°C hingga mendidih pada T_{d1} K pada tekanan p_1 Newton/m 2 , maka jumlahnya sebanyak ;

$$\begin{aligned} Q_{d1} &= \text{Panas jenis air} \times (T_{d1} - T_0) \\ &= \text{Panas jenis air} \times (T_{d1} - 273^0) \\ &= \text{Panas jenis air} \times t_{d1} \\ &= W_{d1} \text{ Kilojoule / kg} \end{aligned}$$

Panas Penguapan adalah jumlah panas yang diperlukan untuk menguapkan 1 kg air pada temperatur mendidihnya T_d K dan tekanan p N/m 2 , yaitu sebesar **r Kilojoule/kg**.

Jumlah panas yang dibutuhkan selama menguapkan 1 kg air pada temperatur mendidihnya T_{d1} K dan bertekanan p_1 N/m 2 adalah sebanyak Q_{R1} KJ/kg, yang disebut panas penguapan yang besarnya = r_1 KJ/kg, sehingga $Q_{R1} = r_1$ KJ/kg.

Karena Q_R hanya merupakan fungsi yang konstan terhadap T maka grafiknya di dalam $T-Q$ berupa garis lurus horizontal yang sejajar dengan sumbu OQ , yang berarti selama mendidih temperaturnya adalah konstan T_{d1} K yaidari A sampai di B.

Jumlah panas (Qu) yang diperlukan untuk mengubah 1 kg uap kenyang pada tekanan p_1 N/m 2 dan temperatur T_{d1} K menjadi uap yang dipanaskan lanjut pada tekanan p_1 N/m 2 dan bertemperatur T_{u1} K adalah sebanyak :

$$Qu_1 = 1 \times C_p \times (T_{u1} - T_{d1}) \text{ Kilojoule/kg}$$

Dimana :

C_p = panas jenis uap pada tekanan konstan p_1 dinyatakan dalam KJ/Kg K

T_{u1} = temperatur uap yang dipanaskan lanjut ($^{\circ}\text{K}$)

T_{d1} = temperatur air mendidih ($^{\circ}\text{K}$) pada tekanan p_1 N/m 2

Sementara harga C_p dianggap konstan , sehingga merupakan persamaan linier pada T sehingga grafiknya berupa garis lurus.

Dengan demikian seluruh jumlah panas untuk :

- a. Memanskan 1 kg air dari 0°C atau 273 K **menjadi mendidih** pada T_d K dan tekanan p N/m² adalah **sebesar W_d KJ/kg.**

W_d disebut Entalpi air mendidih dinyatakan dalam KJ/kg, yaitu banyaknya panas yang dibutuhkan oleh 1 kg air pada temperatur 0°C atau 273 K untuk menjadi mendidih pada T_d K dan tekanan p Newton/m².

- b. Memanskan 1 kg air dari 1 kg air dari 0°C atau 273 K menjadi **uap kenyang** pada T_d K dan tekanan p N/m² adalah **sebesar i'' KJ/kg.**

$$i'' = Wd + r$$

i'' = disebut **Entalpi uap kenyang** dinyatakan dalam KJ/kg, yaitu banyaknya panas yang dibutuhkan oleh 1 kg air pada pada temperatur 0°C atau 273 K untuk diubah menjadi uap kenyang pada T_d K dan tekanan p Newton/m².

- c. Memanskan 1 kg air dari 1 kg air dari 0°C atau 273 K menjadi **uap yang dipanaskan lanjut** pada temperatur T_u °Catau T_u K dan tekanan p N/m² adalah **sebesar i' KJ/kg.**

Sehingga

$$\begin{aligned} i' &= i'' + Cp(T_u - T_d) \\ &= Wd + r + Cp(T_u - T_d) \end{aligned}$$

i'' = disebut **Entalpi uap yang dipanaskan lanjut** dinyatakan dalam KJ/kg, yaitu banyaknya panas yang dibutuhkan oleh 1 kg air pada pada temperatur 0°C atau 273 K untuk diubah menjadi uap yang dipanaskan lanjut pada T_u °C atau T_u K dan tekanan p Newton/m².

Kebutuhan Panas (Q)

$$Q = G \times \Delta \text{ entalpi}$$

Dimana :

G = berat air (kg)

$q = \Delta \text{ entalpi} (\Delta W) = (\text{entalpi awal} - \text{entalpi akhir})$

3.7. Penggunaan Tabel Uap Kenyang dan Tabel Uap Panas Lanjut

Contoh :

1. Berapa jumlah panas yang dibutuhkan oleh 14 kg air dari temperatur 29 °C untuk dipanasi menjadi 90 °C ?

Jawab :

Dari tabel 1 tercatat bahwa untuk memanasi 1 kg air dari 0 °C sampai 29 °C diperlukan $W_{29\text{ }^{\circ}\text{C}}$ atau sebanyak 121 KJ/kg, sedangkan untuk memanasi 1 kg air dari 0 °C sampai 90 °C diperlukan $W_{90\text{ }^{\circ}\text{C}}$ atau sebanyak 377 KJ/kg.

Sehingga untuk memanasi 1 kg air dari 29 °C menjadi 90 °C diperlukan panas sebanyak :

$$\begin{aligned} q &= \Delta W \\ &= (W_{90\text{ }^{\circ}\text{C}} - W_{29\text{ }^{\circ}\text{C}}) \text{ KJ/kg} \\ &= (377 - 121) \text{ KJ/kg} \end{aligned}$$

Sehingga 14 kg air yang dipanasi dari 90 °C menjadi 29 °C membutuhkan panas sebanyak :

$$\begin{aligned} Q &= 14 \text{ kg} \times (377 - 121) \text{ KJ/kg} \\ &= 3.584 \text{ KJ} \end{aligned}$$

2. Berapa banyak panas yang akan dilepas oleh 24 kg air bertemperatur 76 oC untuk didinginkan menjadi air bertemperatur 7 oC ?

Jawab :

$$W_{7\text{ }^{\circ}\text{C}} = 29 \text{ KJ/kg} \quad (\text{tabel 1})$$

$$W_{76\text{ }^{\circ}\text{C}} = 317 \text{ KJ/kg} \quad (\text{tabel 1})$$

$$G_{\text{air}} = 24 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned}Q &= G \times \Delta W \\&= 24 \text{ kg} \times (29 - 317) \text{ KJ/kg} \\&= -6.912 \text{ KJ}\end{aligned}$$

Catatan : Tanda (-) menunjukkan adanya panas yang dilepaskan
Tanda (+) menunjukkan kebutuhan panas

3. Berapakah banyak panas yang dibutuhkan untuk membuat 15 ton uap per jam yang dipanaskan lanjut pada 550 oC bertekanan 80 bar dari air bertemperatur 24 °C ?

Jawab :

i' 80 bar ; 550 oC → karena temperatur 550 °C tidak ada pada tabel 2, maka dilakukan interpolasi .

$$\begin{aligned}&= (i' 80 \text{ bar}; 550 \text{ oC} + i' 80 \text{ bar}; 600 \text{ oC}) : 2 \\&= (3398 - 3641) : 2 \\&= 3519,5 \text{ KJ/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}W_{24 \text{ oC}} &= 24 \times 4.187 \text{ KJ/kg} \\&= 100,5 \text{ KJ/kg}\end{aligned}$$

Dengan demikian :

$$\begin{aligned}Q &= 15.000 \text{ kg/jam} \times (3519,5 - 100,5) \text{ KJ/kg} \\&= 51.285.000 \text{ KJ/jam}\end{aligned}$$

Tabel 3.1 : Tabel uap kenyang

p = Tekanan di dalam Kilogram/cm².
 t_d = Temperatur air mendidih dalam °C.
 V_u = Volume Jenis Uap di dalam m³/kg.
 W_d = Entalpi air mendidih di dalam Kilojoule/kg.
 r = Panas penguapan di dalam Kilojoule/kg.
 i'' = Entalpi Uap Kenyang di dalam Kilojoule/kg.
 V_w = Volume Jenis Air dalam dm³/kg.

p	t_d	V_u	W_d	r	i''	V_w
0,01	7,0	129,2	29	2.484	2.513	
0,02	17,5	67,0	73	2.459	2.533	
0,03	24,1	45,7	101	2.444	2.545	
0,04	29,0	34,8	121	2.433	2.554	
0,05	32,9	28,2	138	2.423	2.561	
0,07	39,0	20,5	163	2.409	2.572	
0,1	45,8	14,7	192	2.392	2.584	
0,2	60,1	7,7	251	2.358	2.609	
0,3	69,1	5,2	289	2.335	2.624	
0,4	75,9	4,0	317	2.318	2.635	
0,5	81,4	3,2	340	2.305	2.645	
0,7	90,0	2,4	377	2.282	2.659	
1	99,6	1,69	417	2.257	2.674	1,044
2	120,2	0,89	505	2.200	2.705	1,061
3	133,5	0,61	561	2.162	2.723	1,074
4	143,6	0,46	604	2.132	2.737	1,084
5	151,8	0,37	640	2.107	2.747	1,093
7	165,0	0,27	697	2.065	2.762	1,108
10	179,9	0,19	762	2.015	2.777	1,128
15	198,3	0,13	844	1.948	2.792	1,154
20	212,4	0,099	908	1.893	2.801	1,177
25	223,9	0,080	961	1.843	2.804	1,197
30	233,8	0,067	1.008	1.798	2.806	1,217
35	242,5	0,057	1.049	1.756	2.805	1,235
40	250,3	0,050	1.087	1.715	2.802	1,252

p	t_d	V_u	W_d	r	i''	V_w
50	264,0	0,039	1.154	1.641	2.795	1,286
60	275,6	0,032	1.213	1.571	2.784	1,319
70	285,8	0,027	1.267	1.504	2.771	1,351
80	295,0	0,023	1.316	1.440	2.756	1,384
90	303,3	0,020	1.363	1.379	2.742	1,417
100	311,0	0,018	1.407	1.318	2.726	1,451
110	318,0	0,016	1.449	1.260	2.709	1,487
120	324,6	0,0143	1.490	1.197	2.687	1,525
130	330,8	0,0128	1.530	1.134	2.664	1,566
140	336,6	0,0115	1.570	1.067	2.637	1,610
150	342,1	0,0103	1.609	1.000	2.609	1,658
160	347,3	0,0093	1.649	932	2.581	1,713
170	352,3	0,0084	1.690	857	2.547	1,78
180	357,0	0,0075	1.733	778	2.511	1,85
190	361,4	0,0067	1.777	691	2.468	1,94
200	365,7	0,0059	1.827	590	2.417	2,06
210	369,8	0,0050	1.890	455	2.345	2,24
220	373,7	0,0039	2.010	208	2.218	2,64
221,3	374,2	0,0032	2.099	0	2.099	3,20

Tabel 3.2 : Tabel uap panas lanjut

**ENTALPI UAP YANG DIPANASKAN LANJUT PADA BERBAGAI TEKANAN
DAN TEMPERATUR DINYATAKAN DALAM KILOJOULE/KILOGRAM**

p	200°C	250 °C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
1	2.875	2.974	3.074	3.277	3.487	3.704	3.927	4.158
2	2.870	2.970	3.071	3.276	3.486	3.703	3.927	4.158
3	2.866	2.967	3.068	3.274	3.485	3.702	3.926	4.157
4	2.861	2.964	3.066	3.272	3.484	3.701	3.926	4.156
5	2.857	2.966	3.063	3.271	3.483	3.700	3.925	4.156
7	2.847	2.954	3.058	3.268	3.481	3.699	3.924	4.155
10	2.831	2.943	3.051	3.263	3.479	3.697	3.922	4.154
15	2.797	2.925	3.037	3.254	3.472	3.693	3.919	4.151
20	—	2.906	3.024	3.246	3.466	3.689	3.916	4.149
25	—	2.884	3.010	3.238	3.461	3.685	3.913	4.147
30	—	2.859	2.995	3.230	3.455	3.681	3.910	4.144
35	—	2.832	2.979	3.221	3.449	3.677	3.907	4.142
40	—	—	2.963	3.213	3.444	3.673	3.904	4.140
50	—	—	2.927	3.195	3.433	3.665	3.898	4.135
60	—	—	2.886	3.177	3.421	3.657	3.892	4.130
70	—	—	2.838	3.159	3.410	3.649	3.886	4.126
80	—	—	2.784	3.139	3.398	3.641	3.880	4.121
90	—	—	—	3.119	3.387	3.633	3.874	4.116
100	—	—	—	3.098	3.375	3.625	3.868	4.112
110	—	—	—	3.076	3.362	3.617	3.862	4.107
120	—	—	—	3.053	3.351	3.608	3.856	4.103
130	—	—	—	3.028	3.339	3.600	3.850	4.098
140	—	—	—	3.002	3.326	3.592	3.844	4.093
150	—	—	—	2.975	3.313	3.584	3.838	4.089
160	—	—	—	2.946	3.300	3.576	3.832	4.084
170	—	—	—	2.915	3.287	3.567	3.826	4.080
180	—	—	—	2.884	3.274	3.559	3.820	4.074
190	—	—	—	2.850	3.260	3.550	3.815	4.071
200	—	—	—	2.815	3.246	3.542	3.809	4.066
210	—	—	—	2.779	3.232	3.533	3.802	4.061
220	—	—	—	2.738	3.217	3.525	3.796	4.057
230	861	1.087	1.332	2.692	3.202	3.516	3.790	4.052
240	862	1.087	1.331	2.640	3.187	3.508	3.784	4.048
250	862	1.087	1.331	2.579	3.172	3.499	3.778	4.043
260	863	1.087	1.330	2.509	3.156	3.490	3.772	4.038
280	864	1.087	1.329	2.321	3.123	3.472	3.760	4.030
300	864	1.088	1.328	2.151	3.089	3.454	3.748	4.021
350	867	1.089	1.326	1.988	3.002	3.408	3.717	3.998
400	870	1.090	1.325	1.928	2.911	3.360	3.686	3.976
450	872	1.092	1.324	1.895	2.819	3.311	3.654	3.953
500	875	1.093	1.323	1.870	2.731	3.263	3.623	3.931

BAB IV

PERPINDAHAN PANAS KETEL

Panas yang dihasilkan dari hasil pembakaran bahan bakar dan udara, yaitu berupa api (menyala) dan gas asap (tidak menyala) dipindahkan kepada air, uap maupun udara melalui bidang yang dipanaskan (heating surface) pada suatu instalasi ketel uap, dengan 3 cara, yaitu :

- a. Pancaran (radiasi)
- b. Aliran (konveksi)
- c. Perambatan (konduksi)

4.1. Perpindahan Panas Secara Pancaran (Radiasi)

Perpindahan panas secara pancaran (radiasi) adalah perpindahan panas antara suatu benda ke benda lainnya dengan jalan melalui gelombang-gelombang elektromagnetis tanpa tergantung kepada ada tidaknya media atau zat diantara benda yang menerima pancaran panas tersebut.

Perpindahan panas secara pancaran dapat dibayangkan berlangsung melalui media berupa aether yaitu suatu jenis materi bayangan tanpa bobot, yang mengisi seluruh sel-sel ruangan di antara molekul-molekul dari suatu zat tertentu, ataupun di dalam ruang hampa sekalipun. Molekul-molekul api yang merupakan hasil pembakaran bahan bakar dan udara akan menyebabkan terjadinya gangguan keseimbangan elektroni magnetis terhadap aether tersebut.

Sebagian dari panas atau energi yang timbul dari hasil pembakaran tersebut diserahkan kepada aether dan yang akan menyerahkannya lebih lanjut melalui gelombang-gelombang elektromagnetik (yang lintasannya lurus seperli lintasan sinar) kepada benda atau bidang yang akan dipanasi (dinding ketel, dinding tungku, lorong api, pipa-pipa ketel dan sebagainya).

Apabila lintasan penyerahan panas melalui gelombang-gelombang elektromagnetik dari aether tersebut tertutup atau terhalang oleh benda lain, maka

bidang yang akan dipanasi tadi tidak akan menerima panas secara pancaran, atau terhalang penyerahan panasnya. Dengan demikian bidang yang akan dipanasi hanya dapat menerima perpindahan panas secara pancaran apabila bidang/benda tersebut dapat melihat api tersebut. Apabila terhalang oleh api/panas maka benda tersebut tidak akan menerima panas secara pancaran.

Bila pancaran panas menimpa suatu benda atau bidang, sebagian dari panas pancaran yang direrima benda tersebut akan dipancarkan kembali (re-radiated) atau dipantulkan (reflected), dan sebagian yang lain dari panas pancaran tersebut akan diserapnya. Banyaknya panas yang diterima secara pancaran (Q_p) berdasarkan rumus dari **Stephen-Boltzmann** adalah sebesar :

$$Q_p = C_z \cdot F \cdot [(T_{api} : 100)^4 - (T_{benda} : 100)^4] \dots\dots \text{KJ/jam}$$

Dimana :

C_z : Konstanta pancaran dari Stephen-Boltzmann yang dinyatakan dalam

$\text{KJ/m}^2 \cdot \text{jam} \cdot \text{K}^4$ atau dalam $\text{Watt/m}^2 \cdot \text{K}^4$

- Bila C_z dinyatakan dalam $\text{KJ/m}^2 \cdot \text{jam} \cdot \text{K}^4$ maka Q_p dinyatakan dalam KJ/jam
- Bila C_z dinyatakan dalam $\text{Watt/m}^2 \cdot \text{K}^4$ maka Q_p dinyatakan dalam Watt.

F : Luas bidang yang dipanasi

T : Temperatur (Kelvin)

Untuk perhitungan-perhitungan praktis lebih lanjut dalam teknik ketel uap, besar harga konstanta **Stephen-Boltzmann** adalah ($C_z = 16,75 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{jam} \cdot \text{K}^4 = 4,65 \text{ Watt/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

Adapun besar C_z ditentukan antara lain oleh :

- keadaan permukaan bidang yang dipanasi (kasar/halus)
- bahan benda yang dipanasi (besi, tembaga, aluminium, dll)
- Warna bidang benda yang dipanasi (hitam, abu-abu, putih, dll)
- Dan lain-lain.

Harga-harga C_z	KJ/M ² .Jam.K ⁴	Watt/M ² .K ⁴
Benda hitam pekat absolut	20,726	5,757
Jelaga yang licin	18,004	5,000
Baja yang dipoles	5,569	5,477
Baja berkarat	18,423	5,117
Besi tuang berkarat	16,748	4,652
Pasangan batu tahan api	19,260	5,350

4.2. Perpindahan Panas Secara Aliran (Konveksi)

Perpindahan panas secara aliran (konveksi) adalah perpindahan panas yang dilakukan oleh molekul-molekul suatu fluida (cairan ataupun gas). Molekul-molekul fluida tersebut dalam gerakannya melayang-layang ke sana kemari memabawa sejumlah panas masing-masing q Joule. Pada saat molekul fluida tersebut menyentuh dinding ketel maka panasnya dibagikan sebagian , yaitu q_1 Joule kepada dinding ketel, selebihnya $q_2 = q - q_1$ Joule dibawanya pergi.

Bila gerakan dari molekul-molekul yan melayang-layang kesana kemari tersebut disebabkan karena temperatur di dalam fluida itu sendiri, maka perpindahan panasnya disebut konveksi bebas (free convection) atau konveksi alamiah (natural convection).

Bila gerakan molekul tersebut sebagian akibat dari kakuatan mekanis (karena dipompa atau karena dihembus dengan fan)maka perpindahan panasnya disebut konveksi paksa (forced convection). Dalam gerakannya molekul api tersebut tidak perlu melalui lintasan yang lurus untuk mencapai dinding ketel atau bidang yang dipanasi.

Jumlah panas yang diserahkan secara konveksi (Q_k) adalah sebagai rumus berikut :

$$Q_k = \alpha \cdot F \cdot (T_{api} - T_{dinding}) \dots \text{KJ/jam}$$

Dimana :

α = angka peralihan panas dari api ke dinding ketel (KJ/m².jam.K⁴ atau dalam

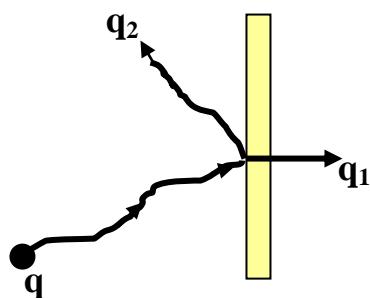
Watt/m².K⁴)

- Bila α dinyatakan dalam KJ/m².jam. K maka Q_k dinyatakan dalam KJ/jam.

- Bila α dinyatakan dalam Watt/m². K maka Q_k dinyatakan dalam Watt.

F = luas bidang yang dipanasi (m²)

T = temperatur (K)



4.3. Perpindahan Panas Secara Perambatan (Konduksi)

Perpindahan panas secara perambatan atau konduksi adalah perpindahan panas dari satu bagian benda padat ke bagian lain dari benda padat yang sama, atau dari benda padat yang satu ke benda padat yang lain karena terjadinya persinggungan phisik (kontak phisik atau menempel) tanpa terjadinya perpindahan molekul-molekul dari benda itu sendiri.

Di dalam didnding ketel tersebut, panas akan dirambatkan oleh molekul-molekul dinding ketel sebelah luar yang berbatasan dengan api, menuju ke molekul-molekul dinding ketel sebelah dalam yang berbatasan dengan air, uap ataupun udara.

Jumlah panas yang dirambatkan (Q_R) melalui dinding ketel adalah sebesar :

$$Q_R = \lambda/s \cdot F \cdot (T_{d1} - T_{d2}) \dots \text{KJ/jam}$$

Dimana :

λ = angka perambatan pana di dalam dinding ketel dinyatakan dalam
KJ/m.jam.K atau Watt/m.K

- Bila λ dinyatakan dalam KJ/m².jam. K maka Q_R dinyatakan dalam KJ/jam.

- Bila λ dinyatakan dalam Watt/m². K maka Q_R dinyatakan dalam Watt.

s = tebal dinding ketel (m)

F = luas dinding ketel yang merambatkan panas (m²)

T_{d1} = temperatur dinding ketel yang berbatasan dengan api (K)

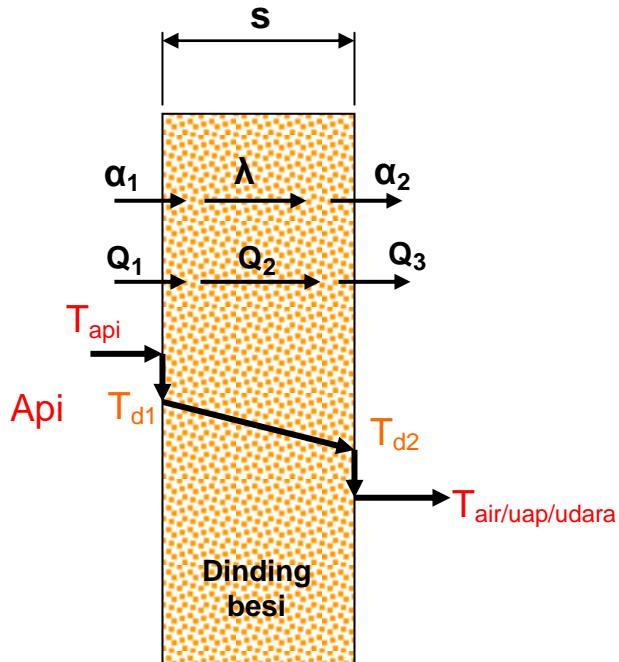
T_{d2} = temperatur dinding ketel yang berbatasan dengan air, uap atau udara (K)

Selanjutnya panas yang dibawa merambat oleh dinding ketel tersebut akan diterima oleh molekul-molekul air, uap ataupun udara dengan cara konveksi pula, yaitu penyerahan sebagian panas dari molekul-molekul dinding ketel kepada molekul-molekul air, uap ataupun udara. Molekul-molekul air, uap ataupun udara tersebut dalam keadaan mengalir/bergerak, bukan dalam kondisi diam.

Penyerahan panas secara konveksi dan konduksi bersama-sama melalui proses-proses sebagai berikut :

- Panas dialihkan dari fluida (api atau gas asap) kepada benda padat (dinding ketel)
- Panas dirambatkan di dalam benda padat (dinding ketel) atau di dalam benda padat berlapis-lapis (jelaga-dinding ketel-kerak ketel)
- Panas dialihkan dari benda padat (dinding ketel atau kerak ketel) kepada fluida (air, uap atau udara).

4.4. Perpindahan Panas Melalui Dinding Yang Bersih



Gambar di atas , misalnya di sebelah kiri dinding ketel adalah api, sedangkan sebelah kanan dinding ketel adalah air, uap atau udara.

Dimana :

F = luas dinding ketel yang dilewati panas (m^2)

s = tebal dinding (m)

λ = angka perambatan panas (KJ/m.jam.K)

α_1 = angka peralihan panas dari api ke dinding ketel (KJ/m².jam.K)

α_2 = angka peralihan panas dari dinding ketel ke air, uap atau udara(KJ/m².jam.K)

Q_1 = panas yang diserahkan oleh api kepada dinding ketel yang besarnya :

$$Q_1 = \alpha_1 \cdot F \cdot (T_{api} - T_{d1}) \dots KJ/jam$$

Q_2 = panas yang dirambatkan di dalam dinding ketel yang besarnya :

$$Q_2 = \lambda/s \cdot F \cdot (T_{d1} - T_{d2}) \dots KJ/jam$$

Q_3 = panas yang diserahkan oleh dinding ketel kepada air, uap atau udara yang besarnya :

$$Q_3 = \alpha_2 \cdot F \cdot (T_{d2} - T_{\text{air, uap, udara}}) \dots \text{KJ/jam}$$

T_{d1} = temperatur dinding ketel sebelah kiri (K)

T_{d1} = temperatur dinding ketel sebelah kanan (K)

Bila penyerahan panas dari api ke air, uap atau udara melalui dinding ketel tersebut, dalam keadaan seimbang (steady state), maka berarti bahwa :

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q$$

Sebab jika tidak demikian, yaitu bahwa bila :

$$Q_1 \neq Q_2 \neq Q_3 \neq Q$$

Maka berarti ada sejumlah panas yang tertinggal, sehingga temperatur dinding makin lama makin meningkat, yang berarti keadaan seimbang adalah belum tercapai.

Ketiga persamaan tersebut di ubah menjadi :

$$Q_1 = \alpha_1 \cdot F \cdot (T_{\text{api}} - T_{d1}) = Q \quad T_{\text{api}} - T_{d1} = 1/\alpha_1 \cdot Q/F \quad (1)$$

$$Q_2 = s/\lambda \cdot F \cdot (T_{d1} - T_{d2}) = Q \quad T_{d1} - T_{d2} = s/\lambda \cdot Q/F \quad (2)$$

$$Q_3 = \alpha_2 \cdot F \cdot (T_{d2} - T_{\text{air}}) = Q \quad T_{d2} - T_{\text{air}} = 1/\alpha_2 \cdot Q/F \quad (3)$$

$$\text{Penjumlahan } (1) + (2) + (3) = T_{\text{api}} - T_{\text{air}} = Q/F (1/\alpha_1 + s/\lambda + 1/\alpha_2)$$

Bila $(1/\alpha_1 + s/\lambda + 1/\alpha_2)$ diganti dengan $1/k_o$; maka persamaan tersebut berubah menjadi :

$$T_{\text{api}} - T_{\text{air}} = Q/F \cdot 1/k_o \text{ atau } q = k_o \cdot F (T_{\text{api}} - T_{\text{air}})$$

$$1/k_o = 1/\alpha_1 + s/\lambda + 1/\alpha_2$$

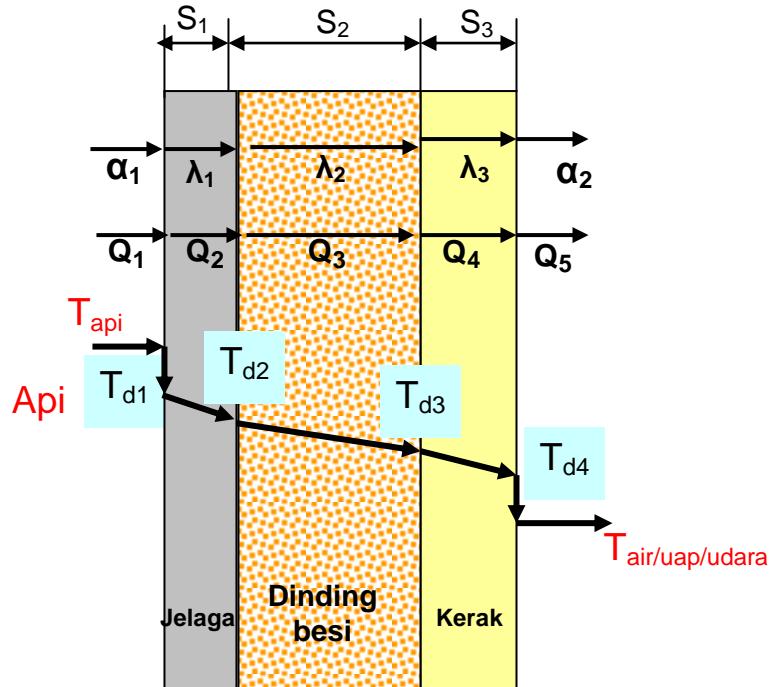
Dengan harga **k_o** yang dicari dari :

$K_o = \text{angka perpindahan panas melalui dinding yang bersih (KJ/m}^2\text{jam.K atau Watt/m}^2.\text{K)}$

- Bila k_o dinyatakan dalam $\text{KJ/m}^2\text{.jam.K}^4$ maka Q dinyatakan dalam KJ/jam .
- Bila k_o dinyatakan dalam $\text{Watt/m}^2\cdot\text{K}^4$ maka Q dinyatakan dalam Watt .

Dari rumus terakhir tadi, ternyata harga Q yang dihasilkan tanpa memperhatikan besarnya harga T_{d1} ataupun T_{d2} .

4.5. Perpindahan Panas Melalui Dinding Yang Kotor



$$1/k_k = 1/\alpha_1 + s_1/\lambda_1 + s_2/\lambda_2 + s_3/\lambda_3 + 1/\alpha_2$$

Contoh

Diketahui :

$$Q = 42.000 \text{ KJ/jam}$$

$$F = 1 \text{ m}^2$$

$$T_{\text{api}} = 1.000 \text{ K}$$

$$\alpha_1 = 90 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{jam.K} \text{ (dari api ke dinding ketel)}$$

$$\alpha_2 = 80 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{jam.K} \text{ (dari api ke jelaga)}$$

$$\alpha_3 = 20.000 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{jam.K} \text{ (dari dinding besi ke air)}$$

$$\alpha_4 = 19.000 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{jam.K} \text{ (dari kerak ketel ke air)}$$

$$\lambda_1 = 0,42 \text{ KJ/m.jam.K} \text{ (di dalam jelaga)}$$

$$\lambda_2 = 225 \text{ KJ/m.jam.K} \text{ (di dalam dinding besi)}$$

$$\lambda_3 = 8,0 \text{ KJ/m.jam.K} \text{ (di dalam kerak ketel)}$$

$$s_1 = 1,5 \text{ mm (tebal jelaga)}$$

$$s_2 = 20 \text{ mm (tebal pelat besi)}$$

$$s_3 = 1,0 \text{ mm (tebal kerak ketel)}$$

Ditanyakan :

- a. Harga k_o untuk dinding yang bersih
- b. Harga k_2 untuk dinding yang kotor
- c. Temperatur air bila dinding bersih
- d. Temperatur air bila dinding kotor

Jawab :

- a. Bila dinding bersih

$$\frac{1}{k_o} = \frac{1}{90} + \frac{0,02}{225} + \frac{1}{20.000} = 0,01125$$

$$k_o = 88,89 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{jam.K}$$

$$Q = k_o \cdot F (T_{api} - T_{air})$$

$$42.000 = 88,89 \times 1 \times (1.000 - T_{air})$$

$$T_{air} = 1.000 - \frac{42.000}{88,89}$$

$$= 527,5 \text{ K} = 254,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

a. Bila dinding kotor

$$\frac{1}{k_k} = \frac{1}{80} + \frac{0,0015}{0,42} + \frac{0,02}{225} + \frac{0,001}{8} + \frac{1}{19.000} = 0,01634$$

$$k_k = 61,207 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{jam} \cdot \text{K}$$

$$Q = k_k \cdot F (T_{api} - T_{air})$$

$$42.000 = 61,207 \times 1 \times (1.000 - T_{air})$$

$$T_{air} = 1.000 - \frac{42.000}{61,207}$$

$$= 313,8 \text{ K} = 40,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Perpindahan Panas Pada Boiler

Contoh 1

Diketahui :

$$Q = 42.000 \text{ KJ/jam}$$

$$F = 1 \text{ m}^2$$

$$T_{\text{api}} = 1.000 \text{ K}$$

$$\alpha_1 = 90 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{jam.K} \text{ (dari api ke dinding ketel)}$$

$$\alpha_2 = 80 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{jam.K} \text{ (dari api ke jelaga)}$$

$$\alpha_3 = 20.000 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{jam.K} \text{ (dari dinding besi ke air)}$$

$$\alpha_4 = 19.000 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{jam.K} \text{ (dari kerak ketel ke air)}$$

$$\lambda_1 = 0,42 \text{ KJ/m.jam.K} \text{ (di dalam jelaga)}$$

$$\lambda_2 = 225 \text{ KJ/m.jam.K} \text{ (di dalam dinding besi)}$$

$$\lambda_3 = 8,0 \text{ KJ/m.jam.K} \text{ (di dalam kerak ketel)}$$

$$s_1 = 1,5 \text{ mm (tebal jelaga)}$$

$$s_2 = 20 \text{ mm (tebal pelat besi)}$$

$$s_3 = 1,0 \text{ mm (tebal kerak ketel)}$$

Ditanyakan :

- Harga k_o untuk dinding yang bersih
- Harga k_2 untuk dinding yang kotor
- Temperatur air bila dinding bersih
- Temperatur air bila dinding kotor

Jawab :

- Bila dinding bersih

$$\frac{1}{k_o} = \frac{1}{90} + \frac{0,02}{225} + \frac{1}{20.000} = 0,01125$$

$$k_o = 88,89 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{jam.K}$$

$$Q = k_o \cdot F (T_{api} - T_{air})$$

$$42.000 = 88,89 \times 1 \times (1.000 - T_{air})$$

$$T_{air} = 1.000 - \frac{42.000}{88,89}$$

$$= 527,5 \text{ K} = 254,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

a. Bila dinding kotor

$$\frac{1}{k_k} = \frac{1}{80} + \frac{0,0015}{0,42} + \frac{0,02}{225} + \frac{0,001}{8} + \frac{1}{19.000} = 0,01634$$

$$k_k = 61,207 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{jam.K}$$

$$Q = k_k \cdot F (T_{api} - T_{air})$$

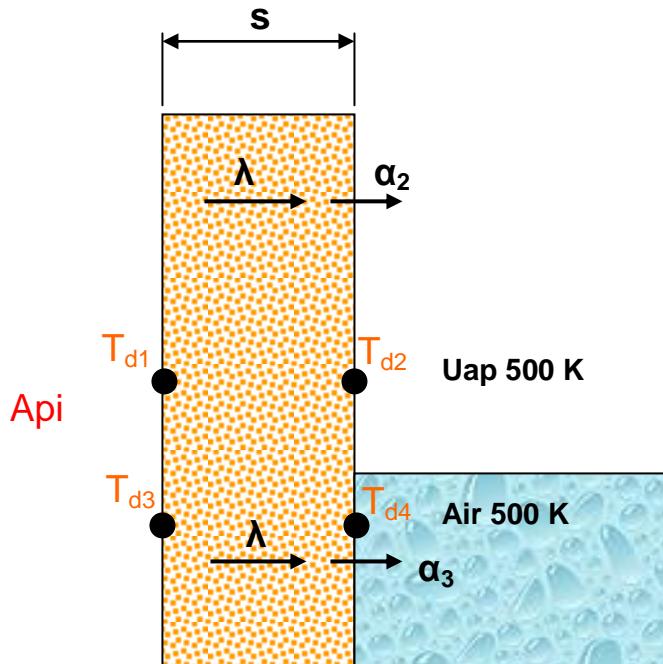
$$42.000 = 61,207 \times 1 \times (1.000 - T_{air})$$

$$T_{air} = 1.000 - \frac{42.000}{61,207}$$

$$= 313,8 \text{ K} = 40,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Contoh 2

Diketahui sebagaimana gambar dan data berikut ;



$$T_{\text{uap}} = T_{\text{air}} = 500 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$Q = 42.000 \text{ KJ/jam}$$

$$F = 1 \text{ m}^2$$

$$T_{\text{api}} = 1.000 \text{ K}$$

$$\alpha_2 = 150 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{jam.K} \text{ (dari dinding ke uap)}$$

$$\alpha_3 = 20.000 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{jam.K} \text{ (dari dinding ke air)}$$

$$\lambda = 225 \text{ KJ/m.jam.K} \text{ (di dalam dinding besi)}$$

$$s = 20 \text{ mm} = 0,02 \text{ m} \text{ (tebal pelat besi)}$$

Ditanyakan : $T_{d1}, T_{d2}, T_{d3}, T_{d4}$

a. Yang berbatasan dengan uap

$$Q = \alpha_2 \cdot F \cdot (T_{d2} - T_{\text{uap}})$$

$$42.000 = 150 \times 1 \times (T_{d2} - 500)$$

$$T_{d2} = 500 + \frac{42.000}{150 \times 1}$$

$$= 780 \text{ K}$$

$$Q_2 = \lambda/s \cdot F \cdot (T_{d1} - T_{d2})$$

$$42.000 = \frac{225}{0,02} \times 1 \times (T_{d1} - 780)$$

$$T_{d1} = 783,7 \text{ K}$$

a. Yang berbatasan dengan air

$$Q = \alpha_3 \cdot F \cdot (T_{d4} - T_{\text{air}})$$

$$42.000 = 20.000 \times 1 \times (T_{d4} - 500)$$

$$T_{d4} = 500 + \frac{42.000}{20.000 \times 1}$$

$$= 502,1 \text{ K}$$

$$Q_2 = \lambda/s \cdot F \cdot (T_{d3} - T_{d4})$$

$$42.000 = \frac{225}{0,02} \times 1 \times (T_{d3} - 502,1)$$

$$T_{d3} = 505,8 \text{ K}$$

$$\frac{1}{k_o} = \frac{1}{90} + \frac{0,02}{225} + \frac{1}{20.000} = 0,01125$$

$$k_o = 88,89 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{jam.K}$$

$$42.000 = 88,89 \times 1 \times (1.000 - T_{air})$$

$$T_{air} = 1.000 - \frac{42.000}{88,89}$$

$$= 527,5 \text{ K} = 254,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

a. Bila dinding kotor

$$\frac{1}{k_k} = \frac{1}{80} + \frac{0,0015}{0,42} + \frac{0,02}{225} + \frac{0,001}{8} + \frac{1}{19.000} = 0,01634$$

$$k_k = 61,207 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{jam.K}$$

$$Q = k_k \cdot F (T_{api} - T_{air})$$

$$42.000 = 61,207 \times 1 \times (1.000 - T_{air})$$

$$T_{air} = 1.000 - \frac{42.000}{61,207}$$

$$= 313,8 \text{ K} = 40,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

BAB V

BAHAN BAKAR DAN PEMBAKARAN

Energi dari Matahari diubah menjadi energi kimia dengan fotosintesa. Namun, sebagaimana kita ketahui, bila kita membakar tanaman atau kayu kering, menghasilkan energi dalam bentuk panas dan cahaya, kita melepaskan energi matahari yang sesungguhnya tersimpan dalam tanaman atau kayu melalui fotosintesa. Kita tahu bahwa hampir kebanyakan di dunia pada saat ini kayu bukan merupakan sumber utama bahan bakar. Kita umumnya menggunakan gas alam atau minyak bakar di rumah kita, dan kita menggunakan terutama minyak bakar dan batubara untuk memanaskan air menghasilkan *steam* untuk menggerakan turbin untuk sistem pembangkitan tenaga yang sangat besar. Bahan bakar tersebut – batubara, minyak bakar, dan gas alam – sering disebut sebagai bahan bakar fosil.

Berbagai jenis bahan bakar (seperti bahan bakar cair, padat, dan gas) yang tersedia tergantung pada berbagai faktor seperti biaya, ketersediaan, penyimpanan, *handling*, polusi dan peletakan boiler, tungku dan peralatan pembakaran lainnya.

Pengetahuan mengenai sifat bahan bakar membantu dalam memilih bahan bakar yang benar untuk keperluan yang benar dan untuk penggunaan bahan bakar yang efisien. Uji laboratorium biasanya digunakan untuk mengkaji sifat dan kualitas bahan bakar. Adapun jenis-jenis bahan bakar adalah sebagai berikut:

5.1 Bahan Bakar Cair

Bahan bakar cair seperti minyak tungku/*furnace oil* dan LSHS (*low sulphur heavy stock*) terutama digunakan dalam penggunaan industri. Berbagai sifat bahan bakar cair, yaitu densitas, specific gravity, viskositas, titik nyala, titik tuang, panas jenis, nilai kalor, sulfur, kadar abu, residu karbon dan kadar air akan dijelaskan sebagaimana berikut.

a. Densitas

Densitas didefinisikan sebagai perbandingan massa bahan bakar terhadap volume bahan bakar pada suhu acuan 15°C. Densitas diukur dengan suatu alat yang disebut *hydrometer*. Pengetahuan mengenai densitas ini berguna untuk penghitungan kuantitatif dan pengkajian kualitas penyalaan. Satuan densitas adalah kg/m³.

b. Specific Gravity

Specific gravity didefinisikan sebagai perbandingan berat dari sejumlah volum minyak bakar terhadap berat air untuk volum yang sama pada suhu tertentu. Densitas bahan bakar, relatif terhadap air, disebut *specific gravity*. *Specific gravity* air ditentukan sama dengan 1. Karena *specific gravity* adalah perbandingan, maka tidak memiliki satuan. Pengukuran *specific gravity* biasanya dilakukan dengan *hydrometer*. *Specific gravity* digunakan dalam penghitungan yang melibatkan berat dan volum. *Specific gravity* untuk berbagai bahan bakar minyak diterangkan sebagaimana dalam table 5.1.

Tabel 5.1. *Specific gravity* berbagai bahan bakar minyak

Bahan bakar Minyak	L.D.O (Minyak Diesel Ringan)	Minyak Tungku/ <i>Furnace Oil</i>	L.S.H.S (<i>Low Sulphur Heavy Stock</i>)
<i>Specific Gravity</i>	0,85 - 0,87	0,89 - 0,95	0,88 - 0,98

Sumber : Thermax India Ltd.

c. Viskositas

Viskositas suatu fluida merupakan ukuran resistansi bahan terhadap aliran. Viskositas tergantung pada suhu dan berkurang dengan naiknya suhu. Viskositas diukur dengan Stokes / Centistokes. Kadang-kadang viskositas juga diukur dalam Engler, Saybolt atau Redwood. Tiap jenis minyak bakar memiliki hubungan suhu – viskositas tersendiri. Pengukuran viskositas dilakukan dengan suatu alat yang disebut Viskometer.

Viskositas merupakan sifat yang sangat penting dalam penyimpanan dan penggunaan bahan bakar minyak. Viskositas mempengaruhi derajat pemanasan awal yang diperlukan untuk *handling*, penyimpanan dan atomisasi yang memuaskan. Jika minyak terlalu kental, maka akan menyulitkan dalam pemompaan, sulit untuk menyalakan *burner*, dan sulit dialirkan. Atomisasi yang jelek akan mengakibatkan terjadinya pembentukan endapan karbon pada ujung *burner* atau pada dinding-dinding. Oleh karena itu pemanasan awal penting untuk atomisasi yang tepat.

d. Titik Nyala

Titik nyala suatu bahan bakar adalah suhu terendah dimana bahan bakar dapat dipanaskan sehingga uap mengeluarkan nyala sebentar bila dilewatkan suatu nyala api. Titik nyala untuk minyak tungku/ *furnace oil* adalah 66 $^{\circ}\text{C}$.

e. Titik Tuang

Titik tuang suatu bahan bakar adalah suhu terendah dimana bahan bakar akan tertuang atau mengalir bila didinginkan dibawah kondisi yang sudah ditentukan. Ini merupakan indikasi yang sangat kasar untuk suhu terendah dimana bahan bakar minyak siap untuk dipompakan.

f. Panas Jenis

Panas jenis adalah jumlah kilo kalori yang diperlukan untuk menaikan suhu 1 kg minyak sebesar 1°C . Satuan panas jenis adalah $\text{kcal/kg}^{\circ}\text{C}$. Besarnya bervariasi mulai dari 0,22 hingga 0,28 tergantung pada *specific gravity* minyak. Panas jenis menentukan berapa banyak steam atau energi listrik yang digunakan untuk memanaskan minyak ke suhu yang dikehendaki. Minyak ringan memiliki panas jenis yang rendah, sedangkan minyak yang lebih berat memiliki panas jenis yang lebih tinggi.

g. Nilai Kalor

Nilai kalor merupakan ukuran panas atau energi yang dihasilkan, dan diukur sebagai nilai kalor kotor/ *gross calorific value* atau nilai kalor netto/ *nett calorific value (NCV)*. Perbedaannya ditentukan oleh panas laten kondensasi dari uap air yang dihasilkan selama proses pembakaran. Nilai kalor kotor/*gross calorific value* (GCV) mengasumsikan seluruh uap yang dihasilkan selama proses pembakaran sepenuhnya terembunkan/terkondensasikan. Nilai kalor netto (NCV) mengasumsikan air yang keluar dengan produk pengembunan tidak seluruhnya terembunkan. Bahan bakar harus dibandingkan berdasarkan nilai kalor netto.

Nilai kalor batubara bervariasi tergantung pada kadar abu, kadar air dan jenis batu baranya sementara nilai kalor bahan bakar minyak lebih konsisten. GCV untuk beberapa jenis bahan bakar cair yang umum digunakan terlihat sebagaimana table 5.2 dibawah ini.

Tabel 5.2. Nilai kalor kotor (GCV) untuk beberapa bahan bakar

Bahan bakar minyak	Nilai Kalor kotor (GCV) (kJ/kg)
Minyak Tanah	11.100
Minyak Diesel	10.800
L.D.O	10.700
Minyak Tungku/ <i>Furnace</i>	10.500
LSHS	10.600

Sumber : Thermax India Ltd.

h. Sulfur

Jumlah sulfur dalam bahan bakar minyak sangat tergantung pada sumber minyak mentah dan pada proses penyulingannya. Kandungan normal sulfur untuk residu bahan bakar minyak (minyak *furnace*) berada pada 2 - 4 %. Kandungan sulfur untuk berbagai bahan bakar minyak ditunjukkan sebagaimana pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3. Persentase sulfur untuk berbagai bahan bakar minyak

Bahan bakar minyak	Persen sulfur (%)
Minyak Tanah	0,05 – 0,2
Minyak Diesel	0,05 – 0,25
L.D.O	0,5 – 1,8
Minyak Tungku/ <i>Furnace</i>	2,0 – 4,0
LSHS	< 0,5

Sumber : Thermax India Ltd.

Kerugian utama dari adanya sulfur adalah resiko korosi oleh asam sulfat yang terbentuk selama dan sesudah pembakaran, dan pengembunan di cerobong asap, pemanas awal udara dan *economizer*.

i. Kadar Abu

Kadar abu erat kaitannya dengan bahan inorganik atau garam dalam bahan bakar minyak. Kadar abu pada distilat bahan bakar diabaikan. Residu bahan bakar memiliki kadar abu yang tinggi. Garam-garam tersebut mungkin dalam bentuk senyawa sodium, vanadium, kalsium, magnesium, silikon, besi, alumunium, nikel, dan lain-lain.

Umumnya, kadar abu berada pada kisaran 0,03 – 0,07 %. Abu yang berlebihan dalam bahan bakar cair dapat menyebabkan pengendapan kotoran pada peralatan pembakaran. Abu memiliki pengaruh erosi pada ujung *burner*, menyebabkan kerusakan pada refraktori pada suhu tinggi dapat meningkatkan korosi suhu tinggi dan penyumbatan peralatan.

j. Residu Karbon

Residu karbon memberikan kecenderungan pengendapan residu padat karbon pada permukaan panas, seperti *burner* atau injeksi nosel, bila kandungan yang mudah menguapnya menguap. Residu minyak mengandung residu karbon 1 persen atau lebih.

k. Kadar Air

Kadar air minyak tungku/*furnace* pada saat pemasokan umumnya sangat rendah sebab produk disuling dalam kondisi panas. Batas maksimum 1% ditentukan sebagai standar.

Air dapat berada dalam bentuk bebas atau emulsi dan dapat menyebabkan kerusakan dibagian dalam permukaan tungku selama pembakaran terutama jika mengandung garam terlarut. Air juga dapat menyebabkan percikan nyala api di ujung *burner*, yang dapat mematikan nyala api, menurunkan suhu nyala api atau memperlama penyalaan. Spesifikasi khusus bahan bakar minyak terlihat sebagaimana pada tabel 5.4.

Tabel 5.4. Spesifikasi khusus bahan bakar minyak

Karakteristik	Bahan bakar minyak		
	Minyak <i>furnace</i>	L.S.H.S	L.D.O
Masa Jenis (g/cc pada 150C)	0,89 - 0,95	0,88 - 0,98	0,85 - 0,87
Titik Nyala (0C)	66	93	66
Titik Tuang (0C)	20	72	18
G.C.V. (kKal/kg)	10.500	10.600	10.700
Endapan, % Berat Max.	0,25	0,25	0,1
Total Sulfur, % Berat, Max.	Sampai 4,0	Sampai 0,5	Sampai 1,8
Kadar Air, % Vol. Max.	1,0	1,0	0,25

Sumber : Thermax India Ltd.

5.1.2. Penyimpanan Bahan Bakar Minyak

Akan sangat berbahaya bila menyimpan minyak bakar dalam tong. Cara yang lebih baik adalah menyimpannya dalam tangki silinder, diatas maupun dibawah tanah. Minyak bakar yang dikirim umumnya masih mengandung debu, air dan bahan pencemar lainnya.

Ukuran tangki penyimpan minyak bakar sangatlah penting. Perkiraan ukuran penyimpan yang direkomendasikan sedikitnya untuk 10 hari konsumsi normal. Tangki penyimpan bahan bakar untuk industri pada umumnya digunakan tangki *mild steel* tegak yang diletakkan diatas tanah. Untuk alasan keamanan dan lingkungan, perlu dibuat dinding disekitar tangki penyimpan untuk menahan aliran bahan bakar jika terjadi kebocoran.

Pengendapan sejumlah padatan dan lumpur akan terjadi pada tangki dari waktu ke waktu, tangki harus dibersihkan secara berkala: setiap tahun untuk bahan bakar berat dan setiap dua tahun untuk bahan bakar ringan. Pada saat bahan bakar dialirkan dari kapal tanker ke tangki penyimpan, harus dijaga dari terjadinya kebocoran-kebocoran pada sambungan, flens dan pipa-pipa. Bahan bakar minyak harus bebas dari pencemar seperti debu, lumpur dan air sebelum diumpulkan ke sistem pembakaran.

5.2. Bahan Bakar Padat (Batubara)

5.2.1. Klasifikasi Batubara

Batubara diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama yakni antracit, bituminous, dan lignit, meskipun tidak jelas pembatasan diantaranya. Pengelompokannya lebih lanjut adalah semiantracit, semi-bituminous, dan sub-bituminous. Antracit merupakan batubara tertua jika dilihat dari sudut pandang geologi, yang merupakan batubara keras, tersusun dari komponen utama karbon dengan sedikit kandungan bahan yang mudah menguap dan hampir tidak berkadar air. Lignit merupakan batubara termuda dilihat dari pandangan geologi. Batubara ini merupakan batubara lunak yang tersusun terutama dari bahan yang mudah menguap dan kandungan air dengan kadar *fixed carbon* yang rendah. *Fixed carbon* merupakan karbon dalam keadaan bebas, tidak bergabung dengan elemen lain. Bahan yang mudah menguap merupakan bahan batubara yang mudah terbakar yang menguap apabila batubara dipanaskan.

Batubara yang umum digunakan, contohnya pada industri di India adalah batubara bituminous dan sub-bituminous. Pengelompokan batubara berdasarkan nilai kalornya adalah sebagai berikut:

Tabel 5.5 : Nilai kalori batubara

Kelas	Kisaran Nilai Kalor (dalam kKal/kg)
A	Lebih dari 6200
B	5600 – 6200
C	4940 – 5600
D	4200 – 4940
E	3360 – 4200
F	2400 – 3360
G	1300 – 2400

Komposisi kimiawi batubara berpengaruh kuat pada daya pembakarannya. Sifat-sifat batubara secara luas diklasifikasikan kedalam sifat fisik dan sifat kimia.

5.2.2. Sifat Fisik dan Kimia Batubara

Sifat fisik batubara termasuk nilai panas, kadar air, bahan mudah menguap dan abu. Sifat kimia batubara tergantung dari kandungan berbagai bahan kimia seperti karbon, hidrogen, oksigen, dan sulfur. Nilai kalor batubara beraneka ragam dari tambang batubara yang satu ke yang lainnya. Nilai untuk berbagai macam batubara diberikan dalam Tabel dibawah.

Tabel 5.6 : GCV untuk berbagai jenis batubara

Parameter	Lignit (Dasar Kering)	Batubara India	Batubara Indonesia	Batubara Afrika Selatan
GCV (kKal/kg)	4.500 *	4.000	5.500	6.000

*GCV lignit pada ‘*as received basis*’ adalah 2500-3000

5.2.3 Analisis batubara

Terdapat dua metode untuk menganalisis batubara: analisis *ultimate* dan analisis *proximate*. Analisis *ultimate* menganalisis seluruh elemen komponen batubara, padat atau gas dan analisis *proximate* menganalisis hanya *fixed carbon*, bahan yang mudah menguap, kadar air dan persen abu. Analisis *ultimate* harus dilakukan oleh laboratorium dengan peralatan yang lengkap oleh ahli kimia yang trampil, sedangkan analisis *proximate* dapat dilakukan dengan peralatan yang sederhana. (Catatan: *proximate* tidak ada hubungannya dengan kata “*approximate*”).

Penentuan kadar air

Penentuan kadar air dilakukan dengan menempatkan sampel bahan baku batubara yang dihaluskan sampai ukuran 200- mikron dalam krus terbuka, kemudian dipanaskan dalam oven pada suhu $108 +2$ °C dan diberi penutup. Sampel kemudian didinginkan hingga suhu kamar dan ditimbang lagi. Kehilangan berat merupakan kadar airnya.

Pengukuran bahan yang mudah menguap (*volatile matter*)

Sampel batubara halus yang masih baru ditimbang, ditempatkan pada krus tertutup, kemudian dipanaskan dalam tungku pada suhu $900 + 15$ °C. Sampel kemudian didinginkan dan ditimbang. Sisanya berupa kokas (*fixed carbon* dan abu). Metodologi rinci untuk penentuan kadar karbon dan abu, merujuk pada IS 1350 bagian I: 1984, bagian III, IV.

Pengukuran karbon dan abu

Tutup krus dari dari uji bahan mudah menguap dibuka, kemudian krus dipanaskan dengan pembakar Bunsen hingga seluruh karbon terbakar. Abunya ditimbang, yang merupakan abu yang tidak mudah terbakar. Perbedaan berat dari penimbangan sebelumnya merupakan *fixed carbon*. Dalam praktek, *Fixed Carbon* atau FC dihitung dari pengurangan nilai 100 dengan kadar air, bahan mudah menguap dan abu.

Analisis proximate

Analisis *proximate* menunjukkan persen berat dari *fixed carbon*, bahan mudah menguap, abu, dan kadar air dalam batubara. Jumlah *fixed carbon* dan bahan yang mudah menguap secara langsung turut andil terhadap nilai panas batubara. *Fixed carbon* bertindak sebagai pembangkit utama panas selama pembakaran. Kandungan bahan yang mudah menguap yang tinggi menunjukkan mudahnya penyalaan bahan bakar. Kadar abu merupakan hal penting dalam perancangan *grate* tungku, volum pembakaran, peralatan kendali polusi dan sistem *handling* abu pada tungku. Analisis *proximate* untuk berbagai jenis batubara diberikan dalam Tabel 5.7.

Tabel 5.7: Analisis *proximate* untuk berbagai batubara (persen)

Parameter	Batubara India	Batubara Indonesia	Batubara Afrika Selatan
Kadar air	5,98	9,43	8,5
Abu	38,63	13,99	17
Bahan mudah menguap (<i>volatile matter</i>)	20,70	29,79	23,28
<i>Fixed Carbon</i>	34,69	46,79	51,22

Parameter-parameter tersebut digambarkan dibawah ini.

Fixed carbon:

Fixed carbon merupakan bahan bakar padat yang tertinggal dalam tungku setelah bahan yang mudah menguap didistilasi. Kandungan utamanya adalah karbon tetapi juga mengandung hidrogen, oksigen, sulfur dan nitrogen yang tidak terbawa gas.

Fixed carbon memberikan perkiraan kasar terhadap nilai panas batubara.

Bahan yang mudah menguap (*volatile matter*):

Bahan yang mudah menguap dalam batubara adalah metan, hidrokarbon, hydrogen, karbon monoksida, dan gas-gas yang tidak mudah terbakar, seperti karbon dioksida dan nitrogen. Bahan yang mudah menguap merupakan indeks dari kandungan bahan bakar bentuk gas didalam batubara. Kandungan bahan yang mudah menguap berkisar antara 20 hingga 35%. Bahan yang mudah menguap:

- Berbanding lurus dengan peningkatan panjang nyala api, dan membantu dalam memudahkan penyalaan batubara
- Mengatur batas minimum pada tinggi dan volum tungku
- Mempengaruhi kebutuhan udara sekunder dan aspek-aspek distribusi
- Mempengaruhi kebutuhan minyak bakar sekunder

Kadar abu

Abu merupakan kotoran yang tidak akan terbakar. Kandungannya berkisar antara 5% hingga 40%. Abu:

- Mengurangi kapasitas *handling* dan pembakaran
- Meningkatkan biaya *handling*
- Mempengaruhi efisiensi pembakaran dan efisiensi *boiler*
- Menyebabkan penggumpalan dan penyumbatan

Kadar Air:

Kandungan air dalam batubara harus diangkut, di-*handling* dan disimpan bersama-sama batubara. Kadar air akan menurunkan kandungan panas per kg batubara, dan kandungannya berkisar antara 0,5 hingga 10%. Kadar air:

- Meningkatkan kehilangan panas, karena penguapan dan pemanasan berlebih dari uap
- Membantu pengikatan partikel halus pada tingkatan tertentu
- Membantu radiasi transfer panas

Kadar Sulfur

Pada umumnya berkisar pada 0,5 hingga 0,8%. Sulfur:

- Mempengaruhi kecenderungan teradinya penggumpalan dan penyumbatan
- Mengakibatkan korosi pada cerobong dan peralatan lain seperti pemanas udara dan *economizers*
- Membatasi suhu gas buang yang keluar

Analisis Ultimate

Analisis *ultimate* menentukan berbagai macam kandungan kimia unsur-unsur seperti karbon, hidrogen, oksigen, sulfur, dll. Analisis ini berguna dalam penentuan jumlah udara yang diperlukan untuk pemakaran dan volum serta komposisi gas pembakaran. Informasi ini diperlukan untuk perhitungan suhu nyala dan perancangan saluran gas buang dll. Analisis *ultimate* untuk berbagai jenis batubara diberikan dalam tabel dibawah.

Tabel 5.8. Analisis *ultimate* batubara

Parameter	Batubara India, %	Batubara Indonesia, %
Kadar Air	5,98	9,43
Bahan Mineral (1,1 x Abu)	38,63	13,99
Karbon	41,11	58,96
Hidrogen	2,76	4,16
Nitrogen	1,22	1,02
Sulfur	0,41	0,56
Oksigen	9,89	11,88

5.2.4. Penyimpanan, *handling* dan persiapan batubara

Ketidaktentuan dalam ketersediaan dan pengangkutan bahan bakar mengharuskan dilakukannya penyimpanan dan penanganan untuk kebutuhan berikutnya. Kesulitan yang ada pada penyimpanan batubara adalah diperlukannya bangunan gudang penyimpanan, adanya hambatan masalah tempat, penuruan kualitas dan potensi terjadinya kebakaran. Kerugian kerugian kecil lainnya adalah oksidasi, angin dan kehilangan karpet. Oksidasi 1% batubara memiliki efek yang sama dengan kandungan abu 1% dalam batubara. Kehilangan karena angin mencapai 0,5 – 1,0 % dari kerugian total.

Penyimpanan batubara yang baik akan meminimalkan kehilangan karpet dan kerugian terjadinya pembakaran mendadak. Pembentukan 'karpet lunak', dari batubara halus dan tanah, menyebabkan kehilangan karpet. Jika suhu naik secara perlahan dalam tumpukan batubara, maka dapat terjadi oksidasi yang akan menyebabkan pembakaran yang mendadak dari batubara yang disimpan. Kehilangan karpet dapat dikurangi dengan cara:

1. Mengerasakan permukaan tanah untuk penyimpanan batubara

2. Membuat tempat penyimpanan standar yang terbuat dari beton dan bata

Di Industri, batubara di-*handling* secara manual maupun dengan *conveyor*. Pada saat handling batubara harus diusahakan supaya sesedikit mungkin batubara yang hancur membentuk partikel kecil dan sesedikit mungkin partikel kecil yang tercecer.

Persiapan batubara sebelum pengumpanan ke boiler merupakan tahap penting untuk mendapatkan pembakaran yang baik. Bongkahan batubara yang besar dan tidak beraturan dapat menyebabkan permasalahan sebagai berikut:

- Kondisi pembakaran yang buruk dan suhu tungku yang tidak mencukupi
- Udara berlebih yang terlalu banyak mengakibatkan kerugian cerobong yang tinggi
- Meningkatnya bahan yang tidak terbakar dalam abu
- Rendahnya efisiensi termal

5.3 Bahan Bakar Gas

Bahan bakar gas merupakan bahan bakar yang sangat memuaskan sebab hanya memerlukan sedikit *handling* dan sistem *burner* nya sangat sederhana dan hampir bebas perawatan. Gas dikirimkan melalui jaringan pipa distribusi sehingga cocok untuk wilayah yang berpopulasi tinggi atau padat industri. Walau begitu, banyak pemakai perorangan yang besar memiliki penyimpan gas, bahkan beberapa diantara mereka memproduksi gasnya sendiri

5.3.1 Jenis-jenis bahan bakar gas

Berikut adalah daftar jenis-jenis bahan bakar gas:

- Bahan bakar yang secara alami didapatkan dari alam:
 - Gas alam
 - Metan dari penambangan batubara
- Bahan bakar gas yang terbuat dari bahan bakar padat
 - Gas yang terbentuk dari batubara

- Gas yang terbentuk dari limbah dan biomassa
- Dari proses industri lainnya (gas *blast furnace*)
- Gas yang terbuat dari minyak bumi
 - Gas Petroleum cair (LPG)
 - Gas hasil penyulingan
 - Gas dari gasifikasi minyak
- Gas-gas dari proses fermentasi

Bahan bakar bentuk gas yang biasa digunakan adalah gas petroleum cair (LPG), gas alam, gas hasil produksi, gas *blast furnace*, gas dari pembuatan kokas, dll. Nilai panas bahan bakar gas dinyatakan dalam Kilokalori per normal meter kubik (kKal/Nm³) ditentukan pada suhu normal (20 °C) dan tekanan normal (760 mm Hg).

5.3.2 Sifat-sifat bahan bakar gas

Karena hampir semua peralatan pembakaran gas tidak dapat menggunakan kadungan panas dari uap air, maka perhatian terhadap nilai kalor kotor (GCV) menjadi kurang. Bahan bakar harus dibandingkan berdasarkan nilai kalor netto (NCV). Hal ini benar terutama untuk gas alam, dimana kadungan hidrogen akan meningkat tinggi karena adanya reaksi pembentukan air selama pembakaran. Sifat-sifat fisik dan kimia berbagai bahan bakar gas diberikan dalam Tabel 5.9.

Tabel 5.9. Sifat-sifat fisik dan kimia berbagai bahan bakar gas

Bahan Bakar Gas	Masa Jenis Relatif	Nilai Kalor yang lebih tinggi	Perbandingan Udara/Bahan bakar - m ³ udara	Suhu Nyala api oC	Kecepatan Nyala api m/s
Gas Alam	0,6	9350	10	1954	0,290
Propan	1,52	22200	25	1967	0,460
Butan	1,96	28500	32	1973	0,870

5.3.3 LPG

LPG terdiri dari campuran utama propan dan Butan dengan sedikit persentase hidrokarbon tidak jenuh (propilen dan butilene) dan beberapa fraksi C₂ yang lebih ringan dan C₅ yang lebih berat. Senyawa yang terdapat dalam LPG adalah propan (CH₃), Propilen (CH₂), normal dan iso-butan (CH₃) dan Butilen (CH₂). LPG merupakan campuran dari hidrokarbon tersebut yang berbentuk gas pada tekanan atmosfer, namun dapat diembunkan menjadi bentuk cair pada suhu normal, dengan tekanan yang cukup besar. Walaupun digunakan sebagai gas, namun untuk kenyamanan dan kemudahannya, disimpan dan ditransport dalam bentuk cair dengan tekanan tertentu. LPG cair, jika menguap membentuk gas dengan volum sekitar 250 kali.

Uap LPG lebih berat dari udara: butan beratnya sekitar dua kali berat udara dan propan sekitar satu setengah kali berat udara. Sehingga, uap dapat mengalir didekat permukaan tanah dan turun hingga ke tingkat yang paling rendah dari lingkungan dan dapat terbakar pada jarak tertentu dari sumber kebocoran. Pada udara yang tenang, uap akan tersebar secara perlahan. Lelosnya gas cair walaupun dalam jumlah sedikit, dapat meningkatkan campuran perbandingan volum uap/udara sehingga dapat menyebabkan bahaya. Untuk membantu pendekslsian kebocoran ke atmosfer, LPG biasanya ditambah bahan yang berbau. Harus tersedia ventilasi yang memadai didekat permukaan tanah pada tempat penyimpanan LPG. Karena alasan diatas, sebaiknya tidak menyimpan silinder LPG di gudang bawah tanah atau lantai bawah tanah yang tidak memiliki ventilasi udara.

5.3.4 Gas alam

Metan merupakan kandungan utama gas alam yang mencapai jumlah sekitar 95% dari volum total. Komponen lainnya adalah: Etan, Propan, Pentan, Nitrogen, Karbon Dioksida, dan gas-gas lainnya dalam jumlah kecil. Sulfur dalam

jumlah yang sangat sedikit juga ada. Karena metan merupakan komponen terbesar dari gas alam, biasanya sifat metan digunakan untuk membandingkan sifat-sifat gas alam terhadap bahan bakar lainnya.

Gas alam merupakan bahan bakar dengan nilai kalor tinggi yang tidak memerlukan fasilitas penyimpanan. Gas ini bercampur dengan udara dan tidak menghasilkan asap atau jelaga. Gas ini tidak juga mengandung sulfur, lebih ringan dari udara dan menyebar ke udara dengan mudahnya jika terjadi kebocoran. Perbandingan kadar karbon dalam minyak bakar, batubara dan gas diberikan dalam tabel dibawah.

Tabel 5.10. Perbandingan komposisi kimia berbagai bahan bakar

	Bahan Bakar Minyak	Batubara	Gas Alam
Karbon	84	41,11	74
Hidrogen	12	2,76	25
Sulfur	3	0,41	-
Oksigen	1	9,89	Sedikit
Nitrogen	Sedikit	1,22	0,75
Abu	Sedikit	3 8,63	-
Air	Sedikit	5,98	-

5.4 .Prinsip-prinsip Pembakaran

5.4.1Proses Pembakaran

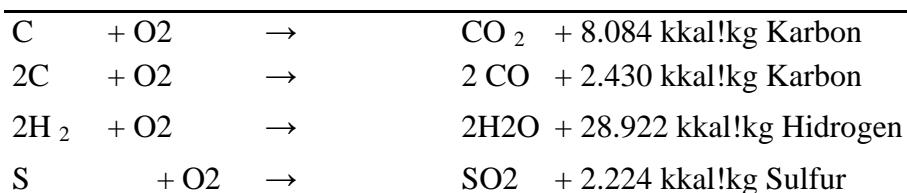
Pembakaran merupakan oksidasi cepat bahan bakar disertai dengan produksi panas, atau panas dan cahaya. Pembakaran sempurna bahan bakar terjadi hanya jika ada pasokan oksigen yang cukup.

Oksigen (O_2) merupakan salah satu elemen bumi paling umum yang jumlahnya mencapai 20,9% dari udara. Bahan bakar padat atau cair harus diubah ke bentuk gas sebelum dibakar. Biasanya diperlukan panas untuk mengubah cairan atau padatan menjadi gas. Bahan bakar gas akan terbakar pada keadaan normal jika terdapat udara yang cukup.Hampir 79% udara (tanpa

adanya oksigen) merupakan nitrogen, dan sisanya merupakan elemen lainnya. Nitrogen dianggap sebagai pengencer yang menurunkan suhu yang harus ada untuk mencapai oksigen yang dibutuhkan untuk pembakaran.

Nitrogen mengurangi efisiensi pembakaran dengan cara menyerap panas dari pembakaran bahan bakar dan mengencerkan gas buang. Nitrogen juga mengurangi transfer panas pada permukaan alat penukar panas, juga meningkatkan volum hasil samping pembakaran, yang juga harus dialirkan melalui alat penukar panas sampai ke cerobong.

Nitrogen ini juga dapat bergabung dengan oksigen (terutama pada suhu nyala yang tinggi) untuk menghasilkan oksida nitrogen (NO_x), yang merupakan pencemar beracun. Karbon, hidrogen dan sulfur dalam bahan bakar bercampur dengan oksigen di udara membentuk karbon dioksida, uap air dan sulfur dioksida, melepaskan panas masing-masing 8.084 kkal, 28.922 kkal dan 2.224 kkal. Pada kondisi tertentu, karbon juga dapat bergabung dengan oksigen membentuk karbon monoksida, dengan melepaskan sejumlah kecil panas (2.430 kkal/kg karbon). Karbon terbakar yang membentuk CO_2 akan menghasilkan lebih banyak panas per satuan bahan bakar daripada bila menghasilkan CO atau asap.



Setiap kilogram CO yang terbentuk berarti kehilangan panas 5654 kKal (8084 – 2430).

5.4.2 Pembakaran Tiga T

Tujuan dari pembakaran yang baik adalah melepaskan seluruh panas yang terdapat dalam bahan bakar. Hal ini dilakukan dengan pengontrolan “tiga T” pembakaran yaitu (1) *Temperature!* suhu yang cukup tinggi untuk menyalakan

dan menjaga penyalaan bahan bakar, (2) *Turbulence!* Turbulensi atau pencampuran oksigen dan bahan bakar yang baik, dan (3) *Time!* Waktu yang cukup untuk pembakaran yang sempurna.

Bahan bakar yang umum digunakan seperti gas alam dan propan biasanya terdiri dari karbon dan hidrogen. Uap air merupakan produk samping pembakaran hidrogen, yang dapat mengambil panas dari gas buang, yang mungkin dapat digunakan untuk transfer panas lebih lanjut. Gas alam mengandung lebih banyak hidrogen dan lebih sedikit karbon per kg daripada bahan bakar minyak, sehingga akan memproduksi lebih banyak uap air. Sebagai akibatnya, akan lebih banyak panas yang terbawa pada pembuangan saat membakar gas alam.

Terlalu banyak, atau terlalu sedikitnya bahan bakar pada jumlah udara pembakaran tertentu, dapat mengakibatkan tidak terbakarnya bahan bakar dan terbentuknya karbon monoksida. Jumlah O₂ tertentu diperlukan untuk pembakaran yang sempurna dengan tambahan sejumlah udara (udara berlebih) diperlukan untuk menjamin pembakaran yang sempurna. Walau demikian, terlalu banyak udara berlebih akan mengakibatkan kehilangan panas dan efisiensi. Tidak seluruh bahan bakar diubah menjadi panas dan diserap oleh peralatan pembangkit. Biasanya seluruh hidrogen dalam bahan bakar terbakar. Saat ini, hampir seluruh bahan bakar untuk boiler, karena dibatasi oleh standar polusi, sudah mengandung sedikit atau tanpa sulfur. Sehingga tantangan utama dalam efisiensi pembakaran adalah mengarah ke karbon yang tidak terbakar (dalam abu atau gas yang tidak terbakar sempurna), yang masih menghasilkan CO selain CO₂.

5.4.3. Perhitungan Stokimetri Kebutuhan Udara

5.4.3.1. Perhitungan stokimetri udara yang dibutuhkan untuk pembakaran minyak bakar

Untuk pembakaran diperlukan udara. Jumlah udara yang diperlukan dapat dihitung dengan menggunakan metode yang diberikan dibawah ini. Langkah

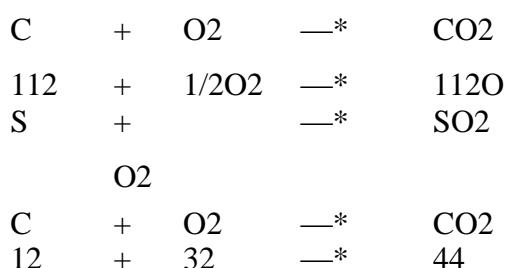
pertama adalah menentukan komposisi minyak bakar. Spesifikasi minyak bakar dari analisis laboratorium diberikan dibawah ini:

Tabel 5.11 : % berat kandungan bahan bakar

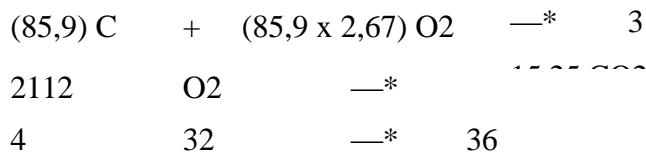
U	% Berat
Karbon	85,9
Hidrogen	12
Oksigen	0,7
Nitrogen	0,5
Sulfur	0,5
H ₂ O	0,35
Abu	0,05
GCV bahan bakar	10880 kkal/kg

Dari data analisis dengan jumlah sampel minyak bakar 100 kg, maka reaksi kimianya adalah sebagai berikut:

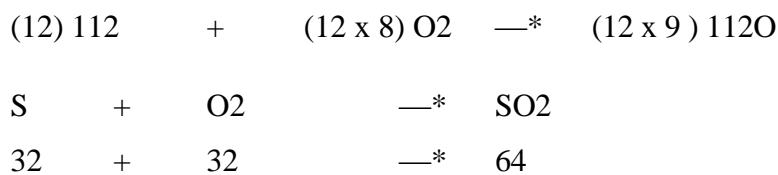
Unsur	Berat Molekul (kg / kg mol)
C	12
O ₂	32
112	2
S	32
N ₂	28
CO ₂	44
SO ₂	64
112O	18



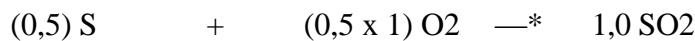
12 kg karbon memerlukan 32 kg oksigen membentuk 44 kg karbon dioksida, oleh karena itu 1 kg karbon memerlukan $32/12$ kg atau 2,67 kg oksigen



4 kg hidrogen memerlukan 32 kg oksigen membentuk 36 kg air, oleh karena itu 1 kg hidrogen memerlukan $32/4$ kg atau 8 kg oksigen.



32 kg sulfur memerlukan 32 kg oksigen membentuk 64 kg sulfur dioksida, oleh karena itu 1 kg sulfur memerlukan $32/32$ kg atau 1 kg oksigen



$$\begin{array}{rcl}
 \text{Oksigen total yang dibutuhkan} & = & 325,57 \text{ kg} \\
 (229,07+96+0,5) & &
 \end{array}$$

Oksigen yang sudah ada dalam

$$100 \text{ kg bahan bakar (ditentukan)} = 0,7 \text{ kg}$$

$$\begin{array}{rcl}
 \text{Oksigen tambahan yang diperlukan} & = & 325,57 - 0,7 \\
 & = & 324,87 \text{ kg}
 \end{array}$$

Jadi, jumlah udara kering yang diperlukan =

$$\begin{array}{rcl}
 (324,87) / 0,23 \text{ (udara mengandung 23% berat} \\
 \text{oksigen)} & &
 \end{array}$$

$$= 1412,45 \text{ kg udara}$$

$$\begin{array}{rcl}
 \text{Udara teoritis yang diperlukan} & = & (1412,45) / 100 \\
 & = & 14,12 \text{ kg udara / kg bahan bakar}
 \end{array}$$

Jadi, dari contoh diatas terlihat, untuk membakar setiap kg minyak bakar, diperlukan udara 14,12 kg.

5.4.3.2. Perhitungan kandungan CO₂ teoritis dalam gas buang

Sangat perlu untuk menghitung kandungan CO₂ dalam gas buang, karena dapat digunakan untuk menghitung udara berlebih dalam gas buang. Sejumlah tertentu udara berlebih diperlukan untuk pembakaran sempurna minyak bakar, tetapi jika terlalu banyak udara berlebih dapat menyebabkan kehilangan panas dan terlalu sedikit udara berlebih dapat mengakibatkan pembakaran yang tidak sempurna. CO₂ dalam gas buang dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{Nitrogen dalam gas buang} &= 1412,45 - 324,87 \\ &= 1087,58 \text{ kg}\end{aligned}$$

% volum CO₂ teoritis dalam gas buang dihitung seperti dibawah ini:

$$\text{Mol CO}_2 \text{ dalam gas buang} = (314,97) / 44 = 7,16$$

$$\text{Mol N}_2 \text{ dalam gas buang} = (1087,58) / 28 = 38,84$$

$$\text{Mol SO}_2 \text{ dalam gas buang} = 1/64 = 0,016$$

$$\begin{aligned}\% \text{ Volum CO}_2 \text{ teoritis} &= (\text{Mol CO}_2 \times 100) / \text{Mol Total (Kering)} \\ &= (7,16 \times 100) / (7,16 + \\ &\quad 38,84 + 0,016) = 15,5\%\end{aligned}$$

5.4.3.3. Perhitungan unsure -unsur gas buang dengan udara berlebih

Setelah diketahui kebutuhan udara teoritis dan kandungan CO₂ teoritis dalam gas buang, langkah berikutnya adalah mengukur persen CO₂ sebenarnya dalam gas buang. Pada perhitungan dibawah diasumsikan bahwa % CO₂ terukur dalam gas buang adalah sebesar 10%.

$$\begin{aligned}\% \text{ Udara berlebih} &= [(\% \text{ CO}_2 \text{ teoritis} / \text{CO}_2 \text{ sebenarnya}) - 1] \times 100 \\ &= [(15,5/10 - 1)] \times 100 \\ &= 55\%\end{aligned}$$

Udara teoritis yang diperlukan untuk 100 kg bahan bakar yang terbakar = 14
 12,45 kg Jumlah total pasokan udara yang diperlukan dengan udara berlebih
 $55\% = 14 \times 12,45 \times 1,55$

$$= 2189,30 \text{ kg}$$

Jumlah udara berlebih (udara berlebih nyata -	=	2189,30	-
.....	=	776,85	-
O ₂	=	776,85 × 0,23	
	=	178,68 kg	
N ₂	=	776,85 - 178,68	
	=	598,17 kg	

Jumlah kandungan akhir unsur gas buang dengan udara berlebih 55% untuk setiap 100 kg bahan bakar adalah seperti dibawah ini:

CO ₂ =	314,97 kg
H ₂ O =	108,00 kg
SO ₂ =	1 kg
O ₂ =	178,68 kg
N ₂ =	1685,75 kg (= 1087,58 dalam udara + 598,17 dalam udara berlebih)

5.4.3.4. Perhitungan % volum CO₂ teoritis dalam gas buang kering

Setelah didapat hasil perhitungan jumlah unsur dalam satuan berat, kemudian dapat dihitung jumlah unsur berdasarkan satuan volum sebagai berikut:

$$\text{Mol CO}_2 \text{ dalam gas buang} : 314,97 / 44 = 7,16$$

$$\text{Mol SO}_2 \text{ dalam gas buang} : 1/64 = 0,016$$

$$\text{Mol O}_2 \text{ dalam gas buang} : 178,68 / 32 = 5,58$$

$$\text{Mol N}_2 \text{ dalam gas buang} : 1685,75 / 28 = 60,20$$

$$\% \text{ volum CO}_2 \text{ teoritis} : (\text{Mol CO}_2 \times 100) / \text{mol total (kering)}$$

$$= (7,16 \times 100) / (7,16 + 0,016 + 5,58 + 60,20)$$

$$= 10\%$$

$$\% \text{ volum O}_2 \text{ teoritis} : (5,58 \times 100) / 72,956$$

$$= 7,5\%$$

$$O_2 = \quad 2-3 \%$$

5.5. Sistem *Draft*

Fungsi *draft* dalam sistem pembakaran adalah untuk membuang produk pembakaran, yaitu gas buang, ke atmosfir. *Draft* dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu *Natural draft* dan *Mechanical draft*.

5.5.1. *Natural draft*

Natural draft merupakan *draft* yang dihasilkan oleh cerobong. Hal ini diakibatkan oleh perbedaan berat antara kolom gas panas dibagian dalam cerobong dan kolom udara luar dengan berat dan luas permukaan yang sama. Karena lebih ringan dari udara luar, gas buang cerobong cenderung naik, dan udara luar yang lebih berat mengalir melalui terowongan abu memasuki ruangan mengantikan tempat gas buang yang naik. *Draft* biasanya dikontrol oleh *damper* yang dioperasikan secara manual yang menghubungkan boiler dengan cerobong. Tidak digunakan fan atau *blower* pada sistem ini. Gas hasil pembakaran dibuang pada ketinggian tertentu sehingga tidak mengganggu masyarakat sekitar.

5.5.2. *Mechanical draft*

Merupakan *draft* buatan yang dihasilkan oleh fan. Tiga jenis dasar *draft* yang digunakan adalah:

- **Balanced draft:** Fan (blower) *forced-draft* (F-D) mendorong udara menuju tungku dan sebuah fan induksi *draft* (I-D) membuang gas ke cerobong, sehingga menyediakan *draft* untuk membuang gas dari boiler. Tekanan dijaga antara 0,05 hingga 0,10 inci air dibawah tekanan atmosfir pada boiler dan sedikit positif untuk memanaskan ulang dan pada perlakuan panas tungku.
- **Induced draft:** Fan induksi *draft* menarik *draft* yang cukup untuk mengalir menuju tungku, sehingga hasil pembakaran dapat terbuang ke atmosfir. Tekana udara tungku

dijaga pada tekanan sedikit negatif dibawah tekanan atmosfir sehingga udara pembakaran mengalir melalui sistem.

- **Forced draft:** Sistem *forced draft* menggunakan sebuah fan untuk mengalirkan udara ke tungku, memaksa hasil pembakaran mengalir melalui unit dan kemudian naik ke cerobong.

5.6. Pemanasan awal Minyak Bakar

Viskositas minyak bakar dan LSHS (*Low Sulphur Heavy Stock*) meningkat dengan berkurangnya suhu, yang dapat menyulitkan pemompaan minyak. Pada suhu ambien yang rendah (dibawah suhu 25 °C), minyak bakar tidak dapat dipompa dengan mudah. Untuk menghindari terjadinya hal ini, dilakukan pemanasan awal minyak bakar dengan dua cara:

- Memanaskan seluruh tangki dalam pemanasan dalam jumlah besar (*bulk heating*) ini, kumparan steam ditempatkan dibagian bawah tangki, yang keseluruhannya diisolasi;
- Minyak dapat juga dipanaskan pada saat dialirkan dengan menggunakan pemanas yang mengalir. Untuk mengurangi kebutuhan steam, tangki sebaiknya diisolasi.

Pemanasan dalam jumlah diperlukan jika laju aliran cukup tinggi, sehingga penggunaan pemanas yang mengalir tidak mencukupi, atau bila bahan bakar seperti LSHS digunakan. Jika digunakan pemanasan yang mengalir, hanya untuk minyak bakar, dilakukan pada saat minyak bakar keluar dari tangki sampai pada suhu pemompaan. Pemanas mengalir pada dasarnya merupakan sebuah penukar panas dengan steam atau listrik sebagai media pemanasnya.

5.7. Kontrol suhu minyak bakar

Kontrol suhu termostatis minyak bakar diperlukan untuk mencegah terjadinya pemanasan berlebihan, terutama jika aliran minyak berkurang atau berhenti. Hal ini penting untuk pemanas listrik, karena minyak dapat terkarbonisasi jika aliran sangat berkurang tetapi pemanasnya tetap hidup. Termostat harus ditempatkan pada daerah aliran minyak bakar sebelum pipa pengisapan. Suhu pemompaan

minyak bakar tergantung pada jenis minyak bakar yang akan dialirkan. Minyak bakar tidak boleh disimpan pada suhu diatas yang diperlukan untuk pemompaan, karena akan menyebabkan konsumsi energi yang lebih tinggi..

5.8. Persiapan Bahan Bakar Padat

5.8.1. Penggilingan Batubara

Ukuran batubara yang benar merupakan salah satu kunci yang menjamin pembakaran yang efisien. Ukuran batubara yang tepat, sesuai dengan sistem pembakaran yang digunakan, dapat membantu pembakaran, mengurangi kehilangan abu dan efisiensi pembakaran yang lebih baik.

Ukuran batubara diperkecil dengan penggilingan/*crushing* dan penghancuran/*pulverizing*. Penggilingan awal batubara ekonomis digunakan untuk unit yang lebih kecil, terutama untuk unit *stoker-fired*. Pada sistem *handling* batubara, penggilingan dilakukan untuk batubara dengan ukuran diatas 6 atau 4 mm. Peralatan yang umum digunakan untuk penggilingan adalah *rotary breaker*, *roll crusher* dan *hammer mill*.

Sebelum penggilingan, batubara sebaiknya diayak terlebih dahulu, sehingga hanya batubara yang kelebihan ukuran yang diumpulkan ke penggiling, sehingga dapat mengurangi konsumsi daya pada alat penggiling. Hal-hal praktis yang direkomendasikan pada penggilingan batubara adalah:

- Penggunaan ayakan untuk memisahkan partikel kecil dan halus untuk menghindarkan terbentuknya partikel yang sangat halus pada penggilingan.
- Penggunaan pemisah magnetis untuk memisahkan potongan besi dalam batubara yang dapat merusak alat penggiling.

Tabel 11 memberi gambaran ukuran batubara yang tepat untuk berbagai jenis sistem pembakaran.

Tabel 5.12. ukuran batubara yang tepat untuk berbagai jenis sistem pembakaran

No.	Jenis Sistem Pembakaran	Ukuran (dalam mm)
1.	<i>Hand Firing</i> (a) <i>Natural draft</i> (b) <i>Forced draft</i>	25-75 25-40
2.	<i>Stoker Firing</i> (a) <i>Chain grate</i> i) <i>Natural draft</i> ii) <i>Forced draft</i> (b) <i>Spreader Stoker</i>	25-40 15-25 15-25
3.	<i>Pulverized Fuel Fired</i>	75% dibawah 75 mikron*
4	<i>Fluidized bed boiler</i>	< 10 mm

*1 Mikron = 1/1000 mm

5.8.2. Pengkondisian Batubara

Batubara yang halus menjadi masalah dalam pembakaran karena efek segregasi/ pemisahannya. Terpisahnya partikel halus dari batubara yang lebih besar dapat diperkecil dengan mengkondisikannya dengan air. Air membantu partikel halus menempel pada bongkahan yang lebih besar disebabkan tekanan permukaan air, sehingga mencegah partikel halus jatuh melalui kisi-kisi atau dibawa oleh *draft* tungku. Dalam melakukan pengkondisian ini, harus dijaga supaya penambahan airnya merata dan lebih baik dilakukan pada saat batubara di-alirkan atau dijatuhkan.

Jika persentase partikel halus dalam batubara sangat tinggi, pembasahan batubara dapat menurunkan persentase karbon yang tidak terbakar dan udara berlebih yang diperlukan untuk pembakaran. Tabel dibawah memperlihatkan tingkat pembasahan, tergantung pada persentase kehalusan batubara.

Tabel 12. Tingkat kehalusan vs kadar air pada permukaan batubara

Kehalusan (%)	Kadar air Permukaan (%)
10 -15	4 - 5
15 – 20	5 – 6
20-25	6 – 7
25-30	7 - 8

5.8.3. Pencampuran batubara

Dalam hal batubara mengandung partikel halus yang berlebihan, disarankan untuk mencampur bongkahan batubara dengan batubara yang kehalusannya berlebihan, sehingga dapat membantu membatasi tingkat kehalusan pada batubara yang dibakar tidak lebih dari 25%. Pencampuran berbagai kualitas batubara dapat juga membantu pasokan umpan batubara yang seragam ke boiler.

5.8.4. Pengontrolan Pembakaran

Pengontrolan pembakaran membantu *burner* dalam mengatur pasokan bahan bakar, pasokan udara, (rasio bahan bakar terhadap udara), dan menghilangkan gas-gas pembakaran untuk mencapai efisiensi boiler yang optimum. Jumlah bahan bakar yang dipasok ke *burner* harus sebanding dengan tekanan dan jumlah steam yang diperlukan. Pengontrolan pembakaran juga diperlukan sebagai alat keamanan untuk menjamin bahwa boiler beroperasi dengan aman.

Berbagai jenis pengontrol pembakaran yang digunakan adalah:

- **Pengontrol Hidup/Mati(On/Off):** Pengontrol yang paling sederhana, kontrol ON/OFF berarti bahwa *burner* bekerja pada kecepatan penuh atau OFF. Jenis pengontrol ini terbatas untuk boiler kecil.
- **Pengontrol tinggi/rendah/ mati(high/low/off):** Sistim TINGGI/RENDAH/MATI sedikit lebih rumit, dimana *burner* memiliki dua laju pembakaran. *Burner* dapat beroperasi pada laju pembakaran lebih lambat atau dapat dialihkan ke pembakaran penuh sesuai keperluan. *Burner* dapat juga kembali pada posisi pembakaran rendah pada saat beban berkurang. Pengontrol ini cocok untuk boiler berukuran sedang.

Pengontrol modulasi: Pengontrol modulasi bekerja pada prinsip untuk menyesuaikan kebutuhan tekanan *steam* dengan cara mengubah laju pembakaran pada seluruh operasi boiler. Motor-motor modulasi menggunakan hubungan mekanis konvensional atau katup listrik untuk mengatur udara primer, udara sekunder, dan bahan bakar yang dipasok ke *burner*. Modulasi penuh berarti bahwa boiler sedang melakukan pembakaran, dan bahan bakar dan udara secara hati-hati disesuaikan sesuai kebutuhan pembakaran untuk memaksimalkan effesiensi termal.

BAB VI

PERALATAN EFISIENSI KETEL

6.1. Pemanas Lanjut Uap (Steam Superheater)

Pemanas Lanjut Uap atau Superheater (Super = lebih, Heater = pemanas, Superheater = Pemanas lebih lanjut) ialah alat untuk memanaskan Uap kenyang menjadi Uap yang dipanaskan lanjut.

Uap yang dipanas lanjut bila digunakan untuk melakukan kerja dengan jalan ekspansi dalam turbin atau mesin uap tidak akan (segera) mengembun, sehingga mengurangi kemungkinan timbulnya bahaya yang disebabkan terjadinya pukulan baik (back stroke) yang diakibatkan mengembunnya uap belum pada waktunya sehingga menimbulkan vakum di tempat yang tidak semestinya di daerah expansi.

Kemungkinan terjadinya pukulan balik atau back stroke di tempat yang belum semestinya tersebut lebih mudah terjadi bila yang digunakan ialah uap kenyang sebagai pengerak mesin uap atau turbin uap.

Ada beberapa macam pemanasan lanjut yang kita kenal :

Dilihat dari lokasi penepatannya dibagi menjadi:

1. superheater konveksi

yang dilihat dari arus gas asap dan uap yang mengalir melewatkinya, superheater konveksi dapat dibagi menjadi :

- a.1 Superheater konveksi arus searah;
 - a2 Superheater konveksi arus berlawanan;
 - a.3 Superheater konveksi arus kombinasi.
- b. Superheater pancaran atau radiant Superheater.

c. Superheater kombinasi = Superheater + Superheater pancaran.

1. Superheater konveksi

Superheater konveksi menarima panas secara konvensi dari api atau gas panas yang di terima secarakonvensi dari gas asap sebanyak

$$Q_k = G_{\text{gas}} \times P.J_{\text{gas}} \times (t_{\text{gas masuk}} - t_{\text{gas keluar}}) \quad [\text{KJ/j}]$$

G_{gas} = Jumlah gas asap yang lewat [Kg/jam]

$P.J_{\text{gas}}$ = Panas jenis gas asap [Kj/Kg. $^{\circ}\text{C}$]

t = temperature dalam [$^{\circ}\text{C}$]

Panas jenis gas dalam hal ini harganya konstan.

Δt = temperatur gaas masuk – temperatur gas ke luar perbedaan temperature antara gas asap saat masuk ke superheater konvensi dan sat ke luar superheater konvensi Δt ini hargahnya relatif

Jumlah gas asap yang lewat (G_{gas}), tergantung dari jumlah bahan bakar yang dibakar (B_e). makin banyak jumlah gas asap (G_{gas}) yang terbentuk dan melewati superheater konveksi tersebut, dan sebaliknya, makin berkurang bahan bakar (B_e) makin berkurang pula jumlah gas asap (G_{gas}) yang terbentuk.

Di samping itu, jumlah bahan bakar yang dibakar (B_e) sebanding dengan jumlah uap yang diproduksi oleh sebuah ketel (S). makin banyak banyak uap yang diproduksi (S), makin besar pula penggunaan bahan bakar (B_e) dan sebaliknya, makin berkurang produksi uap (S), makin berkurang pula penggunaan bahan bakarnya (B_e).

Karena G_{gas} sebanding dengan B_e dan B_e sebanding pula dengan S, maka G_{gas} sebanding pula dengan S. dengan demikian jumlah gas asapnya yang melewati superheater konveksi (G_{gas}) senantiasa sebanding dengan jumlah produksi uap (S).

Adapun panas yang diserap oleh uap sebanyak :

$$Q_s = S \times P.J_{uap} \times (t_{uap\ keluar} - t_{uap\ kenyang})$$

S = Jumlah uap yang diproduksi oleh ketel [kg/jam]

$P.J_{uap}$ = Panas jenis uap dalam [KJ/kg. $^{\circ}\text{C}$], yang dalam hal ini harganya konstan

$t_{uap\ kenyang}$ = temperatur uap kenyang masuk ke superheater dalam $[^{\circ}\text{C}]$. Untuk ketel dengan tekanan uap tertentu, temperatur uap kenyangnya tertentu pula dan konstan.

Dengan asumsi: tidak terjadi kehilangan panas, maka:

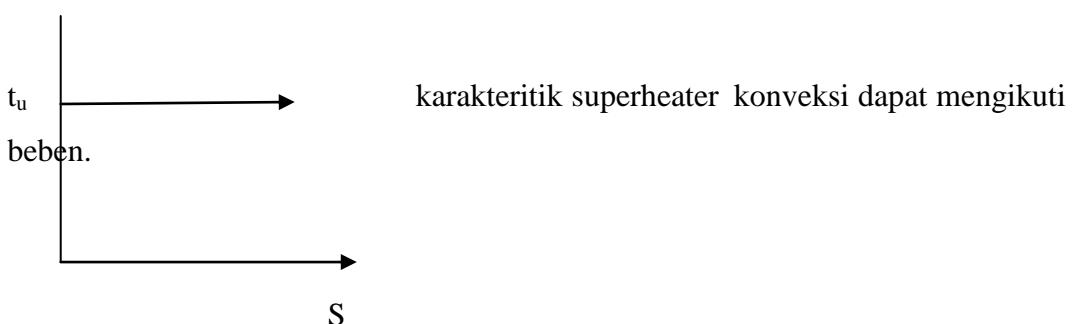
Panas yang diterima dari api = Panas yang diserap oleh uap

$$Q_k = Q_s$$

atau:

$$G_{gas} \times \underbrace{P.J_{uap} \times (t_g\ masuk - t_g\ keluar)}_{\text{konstan}} = S \times \underbrace{P.J_{uap}}_{\text{Konstan}} \times \underbrace{(t_u - t_k)}_{\text{konstan}}$$

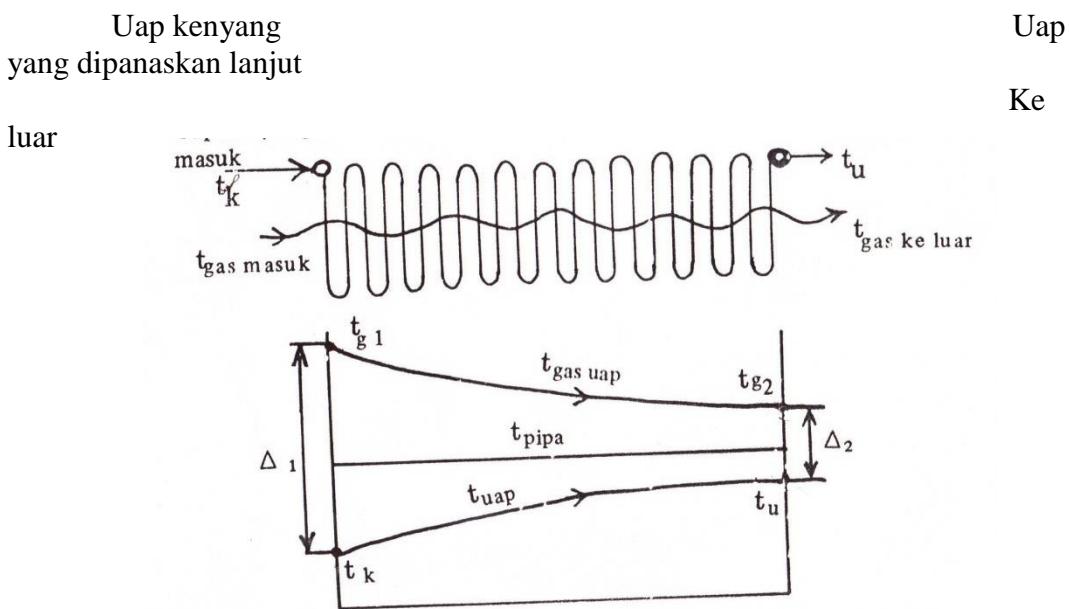
Karena G_{gas} senantiasa sebanding dengan S , maka dari persamaan tersebut, t_{uap} yang keluar dari superheater akan senantiasa konstan berbagai-bagai harga S maupun G_{gas} . Sehingga dengan demikian karakteristik atau sifat-sifat superheater konvensi ialah: temperatur uap yang dihasilkan (t_u) senantiasa dapat mengikuti beban (S).



Namun demikian karena superheater konveksi ditempatkan didaerah konveksi yang dalam hal ini temperatur gas asap didaerah tersebut lebih redah dari temperatur

gas asap didaerah pancaran, maka temperaur uap di hasilkan (t_u) oleh superheater konveksi tidak bias tinggi.

Superheater Konveksi Arus Searah :



Lihat gambar.

Lokasi uap kenyang masuk ke dalam superheater di tempat yang sama dengan lokasi gas asap masuk melewati superheater. Disamping itu lokasi uap yang dipanaskan lanjut ke luar dari superheater di tempat yang sama dengan lokasi gas asap ke luar dari superheater.

$$\Delta_1 = t_{gas} - 1 - t_k$$

selisih temperature antara gas asap masuk ke superheater dengang temperaur uap yang dipanaskan lanjut ke luar dari superheater ialah:

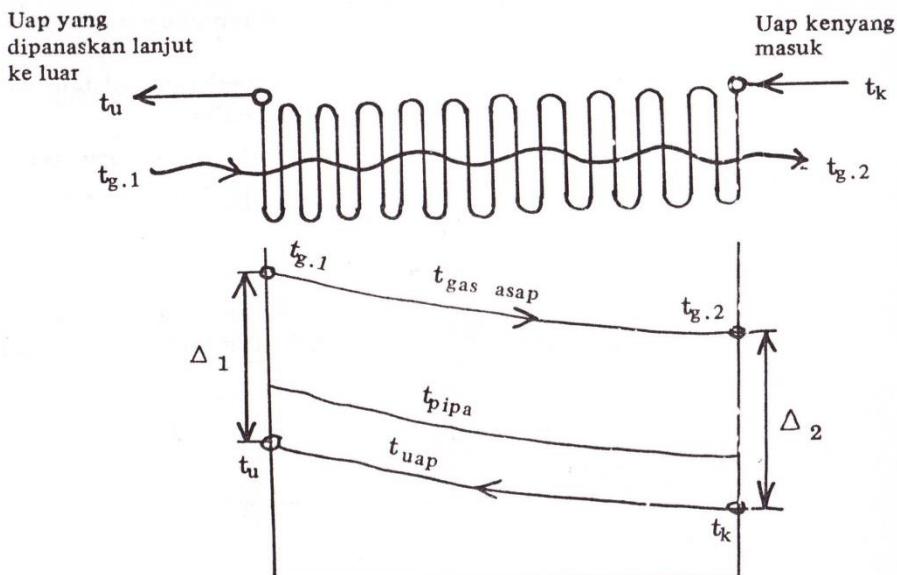
$$\Delta_2 = t_{gas} - 2 - t_u$$

Sedangkan selisih antara temperatur gas asap rata-rata pada superheater dengan temperatur uap rata-rata di dalam superheater ialah:

$$\Delta t = t_{\text{gas rata-rata}} - t_{\text{uap rata-rata}} = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{1n(\Delta_1 - \Delta_2)}$$

Adapun temperature pipa superheater, baik pada ujung masuk ke superheater dan pada ujung dari superheater menunjukkan harga yang konstan ($T_{p-1} = T_{p-2}$), dengan demikian dapat dipastikan bahwa superheater arus searah ini akan awet, tidak cepat rusak/pecah, karena tidak terjadi ada nya tegangan –tegangan di dalam pipa-pipa superheater yang disebabkan perbedaan temperature di dalam pipa-pipa tersebut.

Superheater Arus Berlawanan:



Lihat gambar.

Pada superheater ini, tempat gas asap masuk ke superheater di situ pula tempat uap yang dipanaskan lanjut ke luar dari superheater. Sebaliknya, ditempat uap kenyang masuk ke superheater.

$$\Delta_1 = t_{g,1} - t_u$$

Selisih antara temperature gas asap masuk ke superhaeter dengan temperature uap yang dipanaskan lanjut ke luar dari superheater ialah :

$$\Delta_2 = t_g.2 - t_k$$

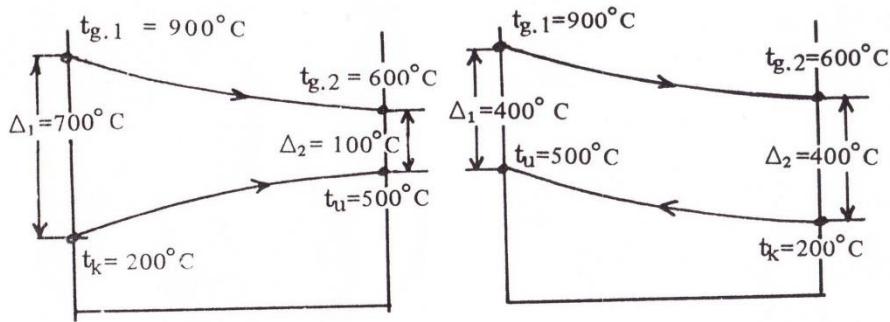
Sedangkan selisih antara temperature rata-rata gas asap dengan temperatur rata-rata uap dalam superheater ialah:

$$\Delta t = t_{\text{gas rata-rata}} - t_{\text{uap rata-rata}} = \Delta_1 = \Delta_2$$

Adapun temperatur pipa-pipa tidaklah sama pada setiap tempat. Di tempat uap kenyang masuk dan gas asap keluar , temperatur pipa masih rendah. Sedangkan di tempat gas asap masuk dan uap yang dipanaskan lanjut ke luar ,temperature pipa di situ cukup tinggi, sehingga ada perbedaan temperature pipa di setiap tempat secara gradual.

Karena temperature pipa di setiap tempat berbeda-beda maka mengakibat kan timbulnya tegangan-tegangan di dalam pipa. Dengan demikian maka pipa-pipa superheater jenis ini akan cepat rusak /pecah ,dan superheater menjadi tidak awet.

Sebagai perbandinganantara superheater konveksi arus searah da superheater konveksi arus berlawanan dengan kapasitas yang sama yaitu uap yang diproduksi (S) yang sama,tmperatur gas asap memasuki superheater yang sama misalnya 900°C,temperature gas asap keluar dari superheater sama pula misalnya 600°C,dan juga temperature uap kenyang yang masuk juga sama misalnya $t_k = 200^\circ\text{C}$ dan teperatur uap yang dipanas kan lanjut ke luar dari superheater sama pula,misalnya $t_u = 500^\circ\text{C}$ maka:



Untuk Superheater konveksi arus searah:

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\ln(\Delta_1 / \Delta_2)} = \frac{700^\circ - 100^\circ}{\ln(700 / 100)} = 308.339^\circ C$$

$$Q = k \cdot F_1 \cdot \Delta t_1 \rightarrow F_1 \times \Delta t_1 = Q / k$$

Untuk Q dan K yang sama :

$$F_1 \times \Delta t_1 = F_2 \times \Delta t_2 = Q/K$$

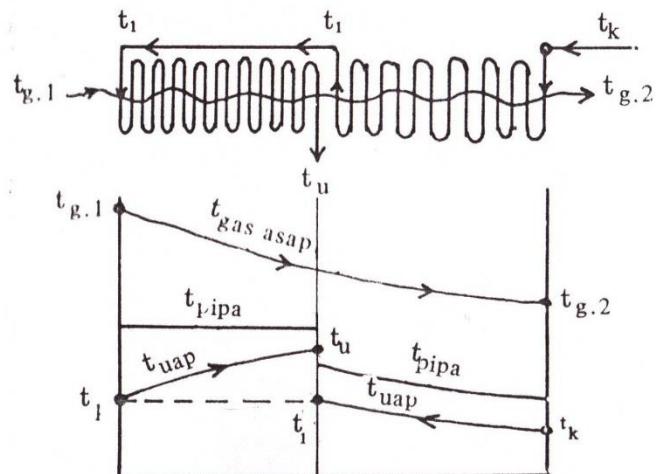
$$F_1 = (\Delta t_2 / \Delta t_1) \times F_2 = (400^\circ / 300,339) \times F_2 =$$

$$F_1 = 1,2973 \times F_2$$

Dengan demikian luas bidang yang Dipanaskan (*heating surface*) untuk superheater konvensi arus searah adalah 29,73 % lebih luas dibandingkan dengan luas bidang yang dipanaskan superheater konvensi harus berlawanan. Oleh karena itu, untuk kapasitas yang sama (Q KJ/jam) harga superheater konversi arus searah adalah 29,7 % lebih mahal daripada superheater konvensi arus berlawanan.

Superheater Konveksi Arus Searah	Superheater Konveksi Arus Berlawanan
(+) Lebih awet (-) Mahal	(-) Cepat rusak/pecah (+) Murah

Superheater Konveksi Arus Kombinasi:



lihat gambar

Pada superheater konversi arus konbinasi,uap kenyang dalam temperatur t_k masuk ke superheater di tempat gas asap ke luar dari superheater dengan temperatur gas asap $t_{g.2}$ sampai di tengah- tengen superheater temperature uap mencapai t_1 , dan dibawa langsung ke tempat gas asap masuk ke superheater dengan temperatur $t_{g.1}$ dan uap di alirkan kembali hingga ke tengah – tengen superheater, dan di tengah – tengen superheater tersebut uap yang di panaskan lanjut dialirkan ke luar dari superheater dengan temperature t_u . Dengan demikian aliran uap terhadap aliran gas asap mula – mula searah, kemudian berlawanan arah.

Di daerah yang berlawan arah, temperatur pipa berbeda – beda di setiap tempat, namun karena temperatur uap di tempat tersebut tidak tinggi (agak rendah) maka pipa – pipa tidak rusak/ pecah. Adaikata rusak pun karena pipa – pipa di daerah temperatur yang agak rendah ini di buat dari bahan yang agak kurang baik

kualitasnya namun murah, maka biaya penggantian pipa – pipa juga tidaklah degitu mahal.

Sebaliknya, didaerah uap dan gaz asap searah, temperature pipa disetiap tempat sama tinggi, sehingga dapat awet, kerena tidak terjadi tegangan-tegangan kerena adanya perbedaan temperature, lagi pula dipilih bahan pipa yang agak baik kualitasnya, sekalipun mahal, namun tidak seluruh superheater dibuat dari bahan pipa yang mahal.

Sehingga untuk kapasitas yang sama dengan superheater konveksi harus searah maupun berlawanan, superheater konveksi kombinasi ini harganya agak murah dan cukup awet.

2. Superheater Pancaran

Superheater pancaran menerima panas dari api secara pancaran. Panas yang di terima dari api secara pancaran sebanyak.:

$$Q_p = C \times F \times [(0.01 \times T_{\text{api}})^4 - (0.01 \times T_{\text{pipa sup.}})^4] [\text{KJ / j.}]$$

c = Konstanta dari Stephan – Boltzmann [KJ/ m².j. (K)⁴]

F = Luas bidang superheat yang dipanaskan [m²]

T_{api} = Temperatur api di dalam tungku [K] yang harganya senantiasa konstan tidak tergantung dari besar – kecilnya api di dalam tungku.

Temperatur api hanya tergantung dari jenis bahan bakar yang di bakar dan temperatur udara

T_{pipa – pipa sup.} = Temperatur pipa – pipa superheater dalam [K] yang harganya relatif konstan,

Tidak tergantung dari besar – kecilnya api.

Dengan demikian harga Q_p tersebut diatas senantiasa konstan.

Panas yang di serap oleh uap di dalam superheater pencaran :

$$Q_s = S \times P.J_{uap} \times (t_{uap\ ke\ luar} - t_{uap\ kenyang})$$

Liat pula keterangan sebelumnya, pada superheater konveksi. Bila tidak ada kerugian panas, maka:

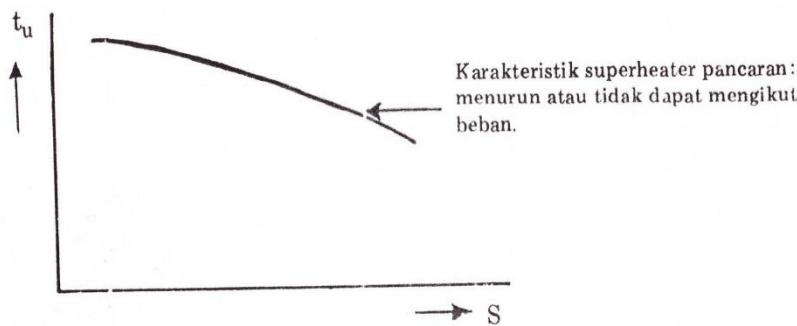
Panas yang diterima dari api = panas yang di serap oleh uap.

$$Q_p = Q_s$$

$$\underbrace{c.F. [(0,01 T_{api})^4 - (0,01 T_{pipa\ sup})]}_{\text{konstan}} = \underbrace{S \times P.J_{uap}}_{\text{Konstan}} \underbrace{(t_u - t_k)}_{\text{konstan}}$$

Pada ruaskiri persamaan tersebut, harganya relative konstan sehingga agar ruas kanan juga senantiasa konstan seperti ruas kiri, kama bila pruduksi uap (S) bertambah, harga temperature uap yang di hasilkan (T_u) harus berkurang, sebaliknya bila pruduksi uap (S) berkurang, maka temperature uap (T_u) harus bertambah.

Sehingga harga temperature uap akan menurun bila produksi uap atau bedan ketel bertambah. Atau dengan kata lain: Karakteristik atau sifat – sifat superheater pacaran ialah menurunkan atau tidak bias mengikuti beban



Namun demikian, penempatan superheater pancaran di daerah pancaran, temperature yang paling tinggi di dalam ketel, maka mungkinkan temperatur uap (T_u) yang dihasilnya dapat mencapai harga yang tinggi.

Superheater Konveksi	Superheater Pancaran
----------------------	----------------------

(+) Dapat mengikuti beban	(-) Tidak dapat mengikuti beban atau menurun
(-) Temperatur uap rendah	(+) Temperatur uap tinggi

3. Superheater Kombinasi

Superheater Kombinasi merupakan kombinasi antara superheater konveksi dan superheater pancaran.

Superheater kombinasi = superheater konveksi + superheater pancaran

Karena superheater kombinasi merupakan kombinasi antara superheater konveksi dan superheater pancaran, maka karakteristik atau sifat – sifat yang kurang baik dari superheater konveksi dan superheater pancaran dapat dieleminasi, sehingga yang tersisa ialah karakteristik yang baik dari kedua superheater tersebut:

- (+) Dapat mengikuti beban
- (+) Temperatur uap dapat tinggi
- (-) Harganya mahal

Kekurangannya ialah harga yang mahal merupakan harga superheater konveksi ditambah harga superheater pancaran.

6.2. Pemanas Air (Ekonomiser)

Gas asap yang telah meninggalkan superheater konveksi ataupun pemanas lanjut ulang atau *steam reheater*, temperaturnya masih cukup tinggi sekitar 500°C hingga 800°C, sehingga akan merupakan kerugian panas yang besar bila gas asap tersebut langsung dibuang lewat terobong.

Gas asap yang masih panas ini dapat dimanfaatkan untuk air terlebih dahulu sebelum di masukan ke drum kete, sehingga air telah dalam keadaan panas, sekitar 30°C sampai 50°C di bawah temperatur mendidihnya.

Air dalam keadaan panas pada saat masuk ke dalam drum ketel membawa keuntungan karena di tempat air masuk ke dalam drum, dinding ketel tidak

mengerut sehingga drum ketel dapat lebih awet dengan demikin biaya perawatan atau biaya maintenance-nya menjadi lebih murah. Lain halnya bila air dalam keadaan dingin masuk kedalam drum tersebut, dinding drum akan mengkerut dan mudah pecah atau bocor, sehingga biaya perawatan mahal.

Keuntungan kedua ialah dengan memanfaatkan gas asap yang masih mempunyai temperature yang tinggi tersebut untuk memanasi air sebelum masuk ke dalam drum ketel, berarti akan memperbesar efisiensi dari ketel uap, karena dapat memperkecil kerugian panas yang di derita oleh ketel.

Keuntungan berikutnya ialah dengan air yang telah dalam keadaan panas masuk ke dalam drum ketel tersebut, untuk menguapkannya dalam tungku hanya sedikit saja panas, sehingga dengan demikian untuk menguapkan air di dalam tungku hanya di butuhkan sedikit bahan bakar, sehingga pemakaian bahan bakarnya lebih hemat, atau dengan kata lain: biaya operasinya menjadi ekonomis.

Keuntungan keempat ialah, bila air telah dalam keadaan panas memasuki drum ketel, maka untuk menguapkannya hanya dibutuhkan panas yang sedikit di dalam penguap, sehingga Luas bidang yang di panaskan atau Heating Surface dari penguap atau Evaporator menjadi lebih sedikit, akibatnya ukuran – ukuran tungku menjadi lebih kecil, oleh karena itu harga tungku menjadi lebih murah atau secara keseluruhan harga ketel atau harga operasinya menjadi lebih murah, sekalipun harga di pasang alat untuk memanaskan air terlebih dahulu sebelum masuk drum ketel.

Dengan demikian dengan memasang alat untuk memanaskan air terlebih dahulu sebelum masuk ke dalam drum ketel, yang disebut pemanas air awal (*Water pre-heater*) akan mendapatkan keuntungan – keuntungan sebagai berikut:

- a. Biaya perawatan (*Maintenace Cost*) menjadi lebih murah.
- b. Efisiensi Thermis dapat diperbesar.
- c. Biaya operasi menjadi lebih hemat atau lebih ekonomis.
- d. Harga inventasi ketel menjadi lebih murah.

Dari alasan – alasan tersebut,maka alat untuk pemanas air awal sering disebut ekonomiser.pada ketel yang besar – besar dan modern, ekonomiser ini sangat memegang peranan.

Dilihat dari harus air dan gas asap, ekonomiser dibagi:

- a. Ekonomiser arus Searah.
- b. Ekonomiser arus Berlawanan Arah.
- c. Ekonomiser arus Kombinisi.

Seperti halnya pada superheater konveksi arus searah yang telah dibicarakan, pada ekonomiser arus searah:

$$\Delta t = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\ln [\Delta_1 / \Delta_2]}$$

Δt = Selisih temperatur gas asap rata – rata dengan temperatur air rata – rata

Δ_1 = Selisih antara temperetur gas asap masuk ke ekonomiser dengan temperatur air

Masuk ekonomiser

Δ_2 = Selisih antara temperatur air gas asap ke luar dari ekonomiser dengan temperatur air keluar dari ekonomiser.

Pada ekonomiser harus berlawanan arah seperti halnya pada superheater konveksi arus berlawanan arah yang telah dibicarakan:

$$\Delta t = \Delta_1 = \Delta_2$$

Dengan :

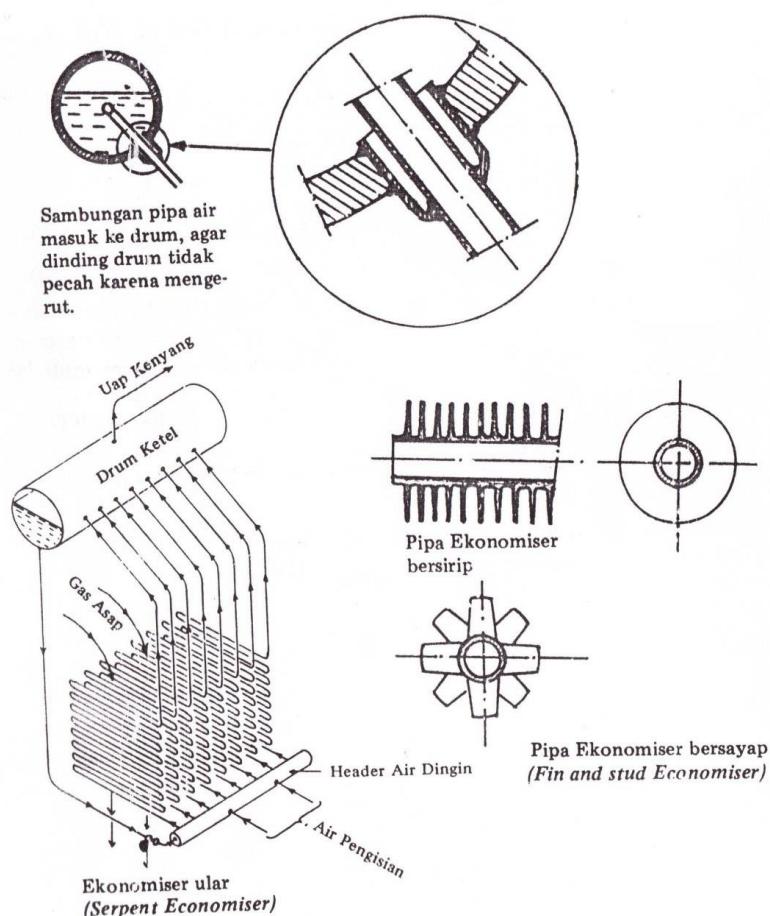
Δ_1 = Selisih antara temperatur gas masuk ke ekonomiser dengan temperatur air keluar dari Ekonomiser.

Δ_2 = Selisih antara temperatur gas asap ke luar dari ekonomiser dengan temperatur air masuk ke ekonomiser.

Δt = Selisih antara temperatur gas asap rata – rata dengan temperatur air tara – rata di dalam ekonomiser.

Jika dilihat dari bentuknya, ada ekonomiser yang berbentuk ular yang disebut ekonomiser ular atau serpent economiser. Ada pula pipa – pipa ekonomiser yang diberi berusuk – rusuk dengan maksud untuk memperluas bidang persinggungan antara gas asap dengan dinding pipa yang telah diperluas oleh rusuk – rusuk. Ada pula untuk memperluas bidang singgung dengan gas asap dengan mengelaskan potongan – potongan pelat baja pada pipa – pipa sehingga pipa – pipa tersebut bersayap, yang disebut *fin and atud economiser*.

Ekonomiser ular terbuat dari pipa – pipa baja, yang ditekuk – tekuk dan menyurupai ular. Karena bidang persinggungan dengan gas asap tidak diperluas, maka memerlukan pipa yang panjang, manukses pembuatannya mudah. Pada ekonomiser berusuk dan ekonomiser besayap, maka luas sehingga untuk kapasitas yang sama, pajang pipa – pipanya dapat lebih pendek dibandingkan dengan ekonomiser ular.



6.3. Pemanas Udara (Air-Preheater)

Gas asap yang setelah keluar dari memanasi ekonomiser masih bertemperatur sekitar 400°C hingga 700°C sehingga saying bila dibuang langsung lewat cerobong, karena panas yang terkandung di dalam gas asap tersebut masih dapat dimanfaatkan lagi untuk memanaskan udara sebelum dimasukkan ke dalam tungku, sehingga efisiensi thermal ketel uap dapat dinaikkan lagi.

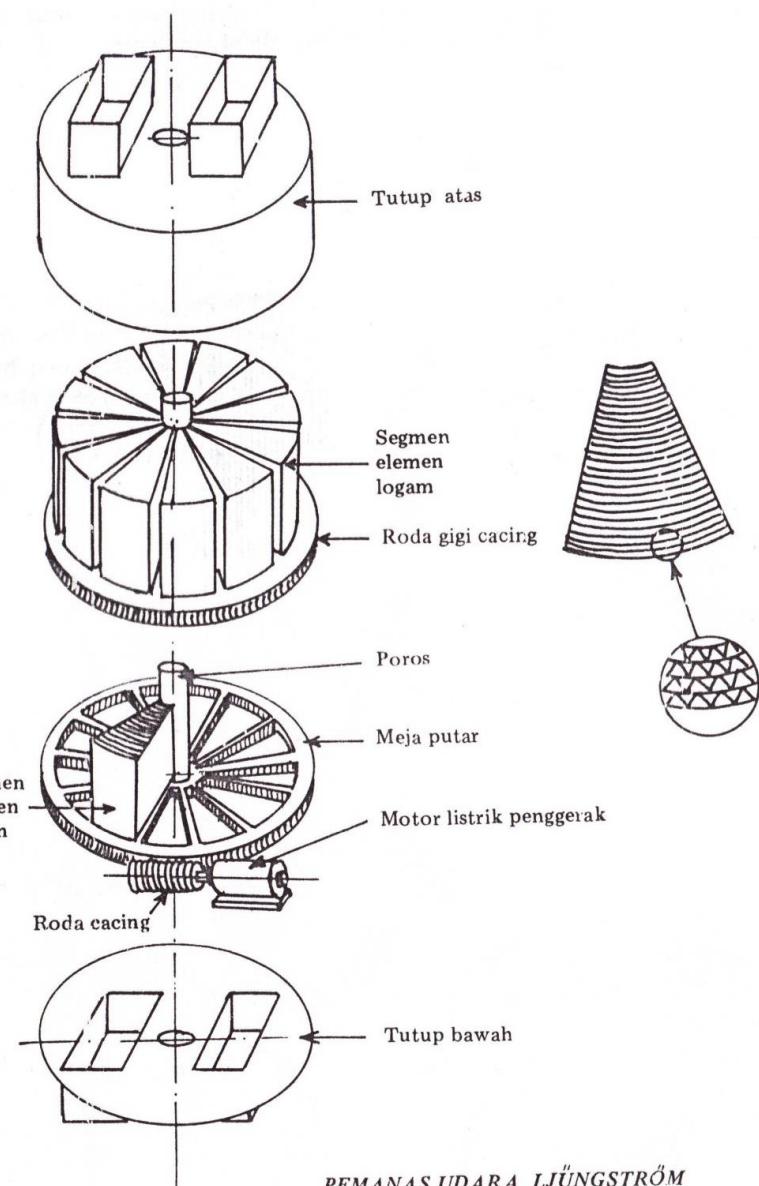
Memanaskan udara pembakaran sebelum di masukan di dalam tungku berarti mengurangi kebutuhan panas untuk menaikan temperatur udara di dalam tungku, sehingga api di dalam tungku tidak banyak mengalami penurunan temperatur, sehingga mengurangi kemungkinan api di dalam tungku tiba –tiba padam sendiri. Dapat menyebatkan peledakan tungku, bila tiba – tiba alat penyedot api di pasang/ dinyalakan, karena di dalam tungku terdapat sejumlah uap bahan bakar dan udara yang telah siap untuk terbakar.Kelainan operator menyalakan alat penyedot api bila,api di dalam tungku padam sendiri, dapat menyebabkan peledakan tungku yang dapat menimbulkan kerugian besar.

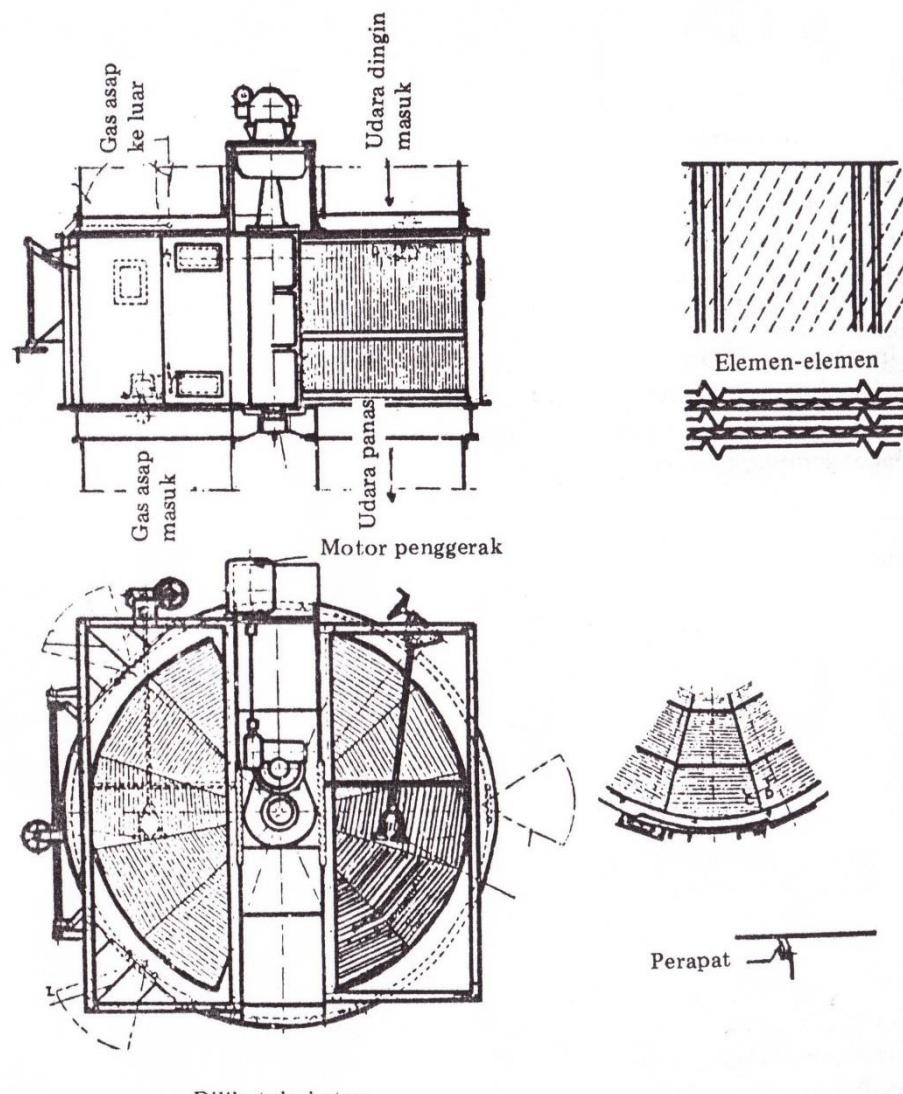
Bila api dalam tungku padam sendiri, maka gas – gas berikut campuran uap bahan bakar dan uap yang terdapat di dalam tungku di isap keluar dengan menggunakan Fan isap (*Induced draught fan* atau IDF) bila tersedia Fan isap, dan bila tidak tersedia Fan isap, dihembus dengan menggunakan Fan penghembus atau Fan tekan (*forced Draught fan* atau FDF), agar tidak tersisa lagi campuran uap bahan bakar dan udara di dalam tungku, dan baru dapat di mulai lagi prosedur pelayanan tungku dari awal.

Dengan demikian bila api di dalam tungku padam sendiri, maka ada sejumlah kerugian bahan bakar yang di buang, lagi pula operasi ketel menjadi terganggu . Hal ini tidak dikehendaki . Oleh karena itu di usahan untuk memanaskan udara pembakaran terlebih dahulu sebelum di masukan di dalam tungku.

Manfaat lain dengan memanaskan udara pembakar terlebih dahulu sebelum masuk ke dalam tungku, ialah udara yang telah dalam keadaan panas masuk ke dalam tungku, membantu untuk mempercepat penguapan air yang terkandung di dalam

bahan bakar (khususnya bahan bakar padat) sehingga akan mempercepat berlangsungnya pembakaran bahan bakar di dalam tungku, yang dengan demikian untuk kapasitas tungku yang sama, yaitu untuk jumlah bahan bakar yang di bakar sama.





Dilihat dari atas

PEMANAS UDARA REGENERASI atau PEMANAS UDARA LJÜNGSTRÖM

DAFTAR PUSTAKA

1. Bangyo Sucahyo, 1999, *Ilmu Logam*, PT. Tiga Serangkai Pustaka Mandiri, Surakarta.
2. Cubberly William H, 1983, Metals Handbook Ninth Edition Vol. 1, *Properties and Selection Iron and Steels*, American Society For Metals, New York.
3. Hari Amanto dan Daryanto, 1999, *Ilmu Bahan*, Bumi Aksara, Jakarta.
4. Lawrence H. Van Vlack, 1995, Ilmu dan Teknologi Bahan, Erlangga.
5. William D. Callister Jr Wiley,2004, An introduction Materials Science and Engineering.
6. Tata Surdia dan Shinroku Saito, 1995,Pengetahuan Bahan, Pradnya Paramita
7. Tata Surdia dan Saito Shinroku, 1999, *Pengetahuan Bahan Teknik*, Pradnya Paramita, Jakarta.
8. William D. Callister Jr Wiley,2004, An introduction Materials Science and Engineering.
9. William F. Smith,1996, Principle of Materials Science and Engineering, Mc Graw Hill.

