

**GENERATOR UAP DAN GAS  
LOCOMOTIVE BOILER FOR LORRY**

**TUGAS AKHIR**

**Untuk memenuhi sebagian persyaratan  
mencapai derajat sarjana S-1**

**Program Studi Teknik Mesin  
Jurusan Teknik Mesin**



**Diajukan oleh :**

**WAHYUDI**

**NIM : 995214020**

**NIRM : 990051123109120020**

**Kepada**

**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS SANATA DHARMA  
YOGYAKARTA**

**2005**





**JURUSAN TEKNIK MESIN**  
**FAKULTAS TEKNIK - UNIVERSITAS SANATA DHARMA**  
Kampus III, Paingan Maguwoharjo, Sleman – Yogyakarta  
Telp. (0274) 883037, 886530; Fax. (0274) 886529; Email: teknik@usd.ac.id

**TUGAS AKHIR/SKRIPSI PROGRAM S-1**  
**JURUSAN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK**  
**UNIVERSITAS SANATA DHARMA YOGYAKARTA**

Nama : ...  
No. ...  
M. Februari 2004

Nama : Mahyud  
No. : 095714070  
No. : 0900511  
Jurusan : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik - Univ. Sanata Dharma Yogyakarta  
Judul T.A. : *Boiler*

Rancanglah " Lokomotive *Boiler* " untuk kereta penarik lori.  
Tekanan kerja 14 Kg. Cm<sup>2</sup>, Bahan bakar : Batu Bara, Daya  
yang dihasilkan 60 KW. Perancangan disertai gambar  
lengkap.

Tanggal dimulai : 16 Februari 2004

Dibimbing Oleh

*Agus Unggul Santoso*

Dr. Ir. Agus Unggul Santoso

Yogyakarta, 18 Februari 2004  
(Pembimbing 2)

*Lukiyanto*

Dr. YB. Lukiyanto, M. T.

# LOCOMOTIVE BOILER FOR LORRY

## TUGAS AKHIR

Oleh :

WAHYUDI

NIM : 995214020

Telah disetujui Oleh :

Pembimbing Utama



(Ir. YB. Lukiyanto, M.T.)

Tanggal :

Pembimbing Kedua



(Ir. FX. Agus Unggul Santoso, M.T.)

Tanggal :

# **TUGAS AKHIR**

## **LOCOMOTIVE BOILER FOR LORRY**

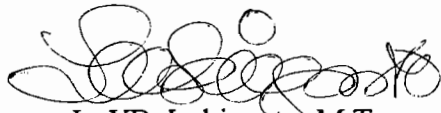
Yang dipersiapkan dan disusun oleh

NAMA : WAHYUDI  
NIM : 995214020

Telah dipertahankan didepan Dewan Penguji  
pada tanggal 19 Maret 2005

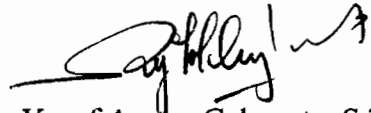
susunan Dewan Penguji

Pembimbing Utama



Ir. YB. Lukivanto, M.T.

Anggota Dewan Penguji

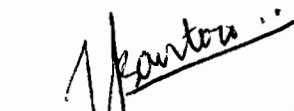


Yosef Agung Cahyanta, S.T., M.T.

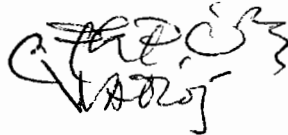


Ir. FA. Rusdi Sambada, M.T.

Pembimbing Kedua



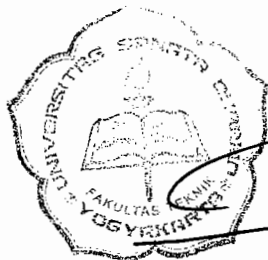
Ir. FX. Agus Unggul Santoso, M.T.



Ir. PK. Purwadi, M.T.

Tugas Akhir ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan  
untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Yogyakarta, 21 Maret 2005  
Fakultas Teknik  
Universitas Sanata Dharma  
Yogyakarta



Dekan



Ir. Greg Heliarko, S.J., S.S., B.ST., M.A., M.Sc

## **PERNYATAAN KEASLIAN KARYA**

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam tugas akhir ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar Kesarjanaan disuatu Perguruan Tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 21 Februari 2005

Penulis



Wahyudi

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis telah dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat untuk dapat menyelesaikan pendidikan Strata-1 di Universitas Sanata Dharma Yogyakarta.

Pada kesempatan ini atas segala bantuan baik material maupun spiritual sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan, dengan hormat penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Romo Dr. Paulus Suparno S.J., M.ST., Rektor Universitas Sanata Dharma, Yogyakarta.
2. Bapak Ir. Greg Heliarko, S.J., S.S., B.ST., M.A., M.Sc., Dekan Fakultas Teknik Universitas Sanata Dharma.
3. Bapak Yosef Agung Cahyanta, S.T., M.T., Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Sanata Dharma.
4. Bapak Ir. YB. Lukiyanto, M.T., Dosen Pembimbing Utama Tugas Akhir.
5. Bapak Ir. FX. Agus Unggul Santoso., Dosen Pembimbing Kedua Tugas Akhir.
6. P.T. Gondang Baru sebagai Pabrik Gula di Klaten
7. Semua anak kost “Rambutan” yang telah memberikan dorongan dan bantuan dalam menyelesaikan tugas ini.
8. Teman-teman Teknik Mesin dan semua pihak yang telah memberikan bantuan serta dukungan sehingga penyusunan Tugas Akhir ini dapat terselesaikan.

Penyusunan tugas akhir ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu segala kritik, koreksi dan saran sangat diperlukan sehingga dimasa mendatang dapat diperbaiki kekurangan yang ada.

Akhir kata penyusun mengharapkan semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dan memberikan tambahan ilmu serta pengetahuan tentang Lokomotif Boiler bagi penulis pada khususnya dan bagi para pembaca pada umumnya dan semoga Tuhan memberikan berkat yang berlimpah atas segala jasa dan pertolongan yang diberikan semua pihak yang telah membantu penulis.

Yogyakarta, 21 Februari 2005

Penulis

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Wahyudi', written in a cursive style.

Wahyudi

## INTISARI

Generator Uap (Boiler) merupakan kesatuan alat, yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap dengan tekanan dan suhu tertentu melalui proses pemanasan, penguapan dan sirkulasi air. Uap yang diproduksi oleh ketel dapat digunakan untuk bermacam – macam fungsi seperti sebagai pemanas atau tenaga pembangkit.

Disini penulis akan merencanakan generator uap lokomotif (Locomotive Boiler) untuk menjalankan berbagai kendaraan khususnya kereta api.

Generator uap ini merupakan jenis generator uap pipa – pipa api. Dengan spesifikasi dibawah ini :

- Daya : 60 kW
- Tekanan : 14 kg/cm<sup>2</sup>
- Bahan bakar : batubara

Dengan hasil perhitungan sebagai berikut :

- Kapasitas ketel : 133,12 kg/jam
- Temperatur air isian : 27 °C
- Temperatur uap hasil : 220 °C
- Diameter luar silinder : 771 mm
- Panjang total ketel : 3092 mm
- Effisiensi : 80 %
- Ruang bakar (p x l x t) : 500 mm x 500 mm x 500 mm
- Jumlah pipa – pipa pi : 28 buah
- Jumlah pipa superheater : 5 buah
- Tinggi cerobong : 749,81 mm



## **ABSTRACT**

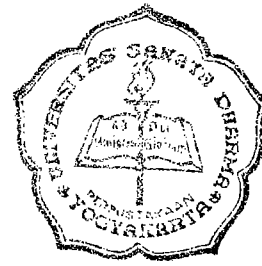
From various researches, the former experts invent that steam is an effective source to produce the energy needed for the industrial machines and transportation.

On that phase, the invention was developed by making steam generator (Boiler). It was a unit of instrument, which is used to change the water into steam with a certain pressure through a boiling process. The steam produced by the kettle can be used for various function such as heater or power plant.

Here the writer will design a locomotive steam generator (Locomotive Boiler) to run various vehicles especially train. This steam generator is a kind of steam generator with the fire pipes. Below are the specifications :

- Power : 60 kW
- Pressure : 14 kg/cm<sup>2</sup>
- Fuel : Coal

## DAFTAR ISI



HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN SOAL .....	ii
HALAMAN PERSETUJUAN PEMBIMBING .....	iii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iv
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA .....	v
KATA PENGANTAR .....	vi
INTISARI .....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR NOTASI.....	xiv
DAFTAR GAMBAR .....	xviii
DAFTAR TABEL .....	xix
BAB I PENDAHULUAN .....	1
I.1 Tinjauan Umum.....	1
I.2 Uap dan Penguapan.....	2
I.3 Pembatasan Masalah .....	3
I.4 Metodologi Perancangan.....	3
I.5 Klasifikasi Generator Uap .....	4
I.5.1 Generator Uap Lorong Api . .....	6
I.5.2 Generator Uap Pipa – Pipa Api .....	7
I.5.3 Generator Uap Pipa – Pipa Air .....	12
I.6 Bagian – Bagian Generator Uap .....	21

BAB II	SPESIFIKASI GENERATOR UAP LOKOMOTIF .....	23
II.1	Spesifikasi Generator Uap .....	23
II.2	Aliran Gas Asap .....	23
II.3	Proses Terbentuknya Uap .....	24
II.4	Kebutuhan Kalor Generator Uap .....	25
II.5	Sirkulasi Air Ketel .....	28
BAB III	PEMBAKARAN BAHAN BAKAR .....	29
III.1	Klasifikasi Bahan Bakar .....	29
III.2	Analisa Bahan Bakar .....	34
III.3	Nilai Pembakaran .....	36
III.4	Kebutuhan Bahan Bakar .....	37
III.5	Kebutuhan Udara Untuk Pembakaran .....	38
III.6	Perhitungan Temperatur Pembakaran .....	40
BAB IV	PERPINDAHAN PANAS .....	44
IV.1	Proses Perpindahan Panas .....	44
IV.2	Perhitungan Perpindahan Panas Pada Ruang Bakar .....	45
IV.3	Perhitungan Temperatur Meninggalkan Ruang Bakar .....	47
IV.4	Perancangan Pipa Api .....	49
IV.4.1	Perpindahan Panas Pada Pipa – Pipa Api .....	51
IV.5	Perhitungan Perpindahan Panas Pada Komponen	
	Pemanas Lanjut (Superheater) .....	59
BAB V	PERANCANGAN SILINDER KETEL .....	69
V.1	Perhitungan Silinder Ketel Pada Ruang Bakar .....	69

V.2 Silinder Ketel Pada Pipa – Pipa Api .....	71
V.3 Perhitungan Jarak Antara Pipa – Pipa Api .....	72
V.4 Perhitungan Rangka Pendukung .....	72
V.5 Perhitungan Sabungan Las .....	74
BAB VI DINDING DAN ISOLASI KETEL .....	78
VI.1 Perancangan Dinding Ketel dan Isolasi Ketel .....	79
VI.1.1 Perhitungan Kerugian Panas Melalui Dinding Silinder.....	81
VI.2 Perhitungan Bagian Dalam Plat Penutup Isolasi Silinder Ketel .....	83
VI.3 Perancangan Isolasi Tutup Belakang Silinder Ketel .....	84
VI.4 Pemeriksaan Kerugian Panas dan Dinding Isolasi Ketel .....	87
BAB VII CEROBONG ASAP .....	88
VII.1 Cerobong Asap .....	88
VII.2 Perancangan Cerobong Asap .....	90
VII.2.1 Perhitungan Kerugian Aliran Gas Asap Didalam Cerobong .....	93
VII.2.2 Perhitungan Kerugian aliran Gas Asap Didalam Ketel .....	95
BAB VIII AIR ISIAN KETEL .....	101
VIII.1 Pembentukan Kerak dan Lumpur .....	102
VIII.2 Pencegahan Pembentukan Kerak dan Lumpur .....	103
VIII.3 Syarat – syarat Air Umpan .....	106

VIII.4 Syarat – syarat Air Ketel .....	106
VIII.5 Proses – Proses Air Sebelum Air Masuk Isian .....	106
BAB IX ALAT – ALAT PERTOLONGAN DAN PERLENGKAPAN .....	110
IX.1 Kran Blow Down .....	110
IX.2 Gelas Penduga .....	111
IX.3 Peluit Bahaya .....	112
IX.4 Manometer Pengukur Tekanan .....	113
IX.5 Katup Keamanan .....	114
IX.6 Garis Api .....	115
IX.7 Sumbat Leleh (Prop Timah) .....	116
IX.8 Aparat Pengisi (Feed Connection) .....	117
IX.9 Keran Uap Induk .....	118
BAB X OPERASI DAN PERAWATAN KETEL .....	119
X.1 Latar Belakang Operasi dan Perawatan .....	119
X.2 Cara Pengoperasian .....	119
X.3 Alat Keamanan Pengoperasian .....	120
X.3.1 Alat Pengaturan Otomatis Berdasarkan Level air .....	121
X.3.2 Alat Pengaturan Otomatis Berdasarkan Perubahan Tekanan .....	123
X.4 Program Operasi dan Perawatan .....	125
X.4.1 Perawatan Pada Saat Ketel Beroperasi .....	129
X.4.2 Perawatan Pada Saat Ketel Tidak Beroperasi .....	130

BAB XI KESIMPULAN .....	133
-------------------------	-----

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

## DAFTAR NOTASI

$H_a$	= entalpy air masuk ketel (Btu/lb)
$H_u$	= entalpy uap jenuh (Btu/lb)
$M_a$	= massa air yang dibutuhkan tiap jam
$Q$	= panas yang dibutuhkan (Btu/jam)
$H_t$	= temperatur bahan bakar
$HHV$	= nilai pembakaran bahan bakar atas bahan bakar (Btu/jam)
$LHV$	= nilai pembakaran bahan bakar bawah (Btu/jam)
$M_b$	= kebutuhan bahan bakar tiap jam (lb/jam)
$M_g$	= gas asap yang dihasilkan (lb/jam)
$M_u$	= jumlah uap yang dihasilkan tiap jam (lb/jam)
$M_{uts}$	= kebutuhan udara (lb udara/jam)
$U_t$	= udara teoritis yang dibutuhkan (lb udara/lb bahan bakar)
$U_{ts}$	= kebutuhan udara yang sebenarnya (lb udara/lb bahan bakar)
$\eta_k$	= efisiensi ketel (%)
$A$	= luas efektif nyala api (ft <sup>2</sup> )
$A_{p1}$	= luas penampang dalam (ft <sup>2</sup> )
$A_{pn}$	= luas penampang untuk luas jumlah pipa
$A_0$	= luas permukaan tiap pipa (ft <sup>2</sup> )
$C_{pg}$	= panas jenis gas asap (btu/lb <sup>0</sup> f)
$D$	= diameter luar pipa (ft)

E	= emisivitas bahan yang menerima panas radiasi
Fpp	= faktor sifat – sifat efek dalam film gas
Ft	= faktor temperatur
L	= panjang pipa
N	= jumlah pipa
P	= tekanan kerja dalam ketel (Psia)
Pa	= tekanan atmosfer (Psia)
Q	= laju perpindahan panas secara konduksi dan konveksi
Qa	= total panas yang diserap (Btu/hr)
Qf	= kerugian panas melalui dinding
Qr	= panas radiasi yang diserap pada ruang bakar (Btu/hr)
Qv <sub>0</sub>	= panas yang diterima pipa
Qv	= panas total
Re	= reynolds number
Tg <sub>1</sub>	= temperatur gas asap meninggalkan ruang bakar
Tg <sub>2</sub>	= temperatur gas asap meninggalkan pipa – pipa api
Tv	= temperatur film
U	= koefisien perpindahan panas total
Ua	= konduktansi panas film air pada tekanan kerja (Btu/ft <sup>2</sup> )
$\frac{U}{hv}$	= konduktansi panas konveksi film gas air (Btu/ft <sup>2</sup> jam <sup>0</sup> f)
Ucg	= konduktansi panas konveksi film gas asap (Btu/ft <sup>2</sup> jam <sup>0</sup> f)
Ucl	= dasar penghantar aliran konveksi memanjang (Btu/ft <sup>2</sup> jam <sup>0</sup> f)
Wg	= berat gas asap yang dihasilkan per lb bahan bakar



a	= tebal kompor (in)
b	= panjang kompor (in)
c	= nilai minimum yang diijinkan karena stiffness dan pengerjaan bahan
f	= beban
F <sub>t</sub>	= gaya dinding silinder ketel (lb)
F <sub>m</sub>	= gaya pada arah melintang (lb)
r	= jari – jari silinder dalam (in)
T <sub>m</sub>	= tebal minimum dinding ketel (in)
Y	= koefisien faktor temperatur ketel
d <sub>1</sub>	= diameter dalam silinder ketel
d <sub>2</sub>	= diameter silinder ketel sebelum diisolasi
d <sub>3</sub>	= diameter ketel setelah diisolasi
d <sub>4</sub>	= diameter ketel setelah diisolasi dan ditutup pelan
f	= faktor gesekan Moody
K <sub>1</sub>	= konduktivitas panas bahan silinder ketel
K <sub>2</sub>	= konduktivitas panas penutup
K <sub>3</sub>	= konduktivitas panas bahan isolasi ketel
K <sub>a</sub>	= konduktivitas panas film air pada tekanan air
Q <sub>dk</sub>	= panas yang hilang melalui dinding dan isolasi ketel
T <sub>s</sub>	= temperatur luar tutup ketel
Q <sub>g</sub>	= panas yang terbawa oleh gas asap
Q losses	= kerugian panas

$Q_{si}$	= kerugian panas dinding silinder ketel dan isolasi
$T_{ge}$	= temperatur gas asap masuk cerobong
$V_{ud}$	= volume jenis udara
$T_{um}$	= temperatur udara masuk ruang bakar
$B$	= tekanan barometer

## DAFTAR GAMBAR

Gambar I.1. Generator Uap Schots .....	10
Gambar I.2. Generator Uap Chocran .....	11
Gambar I.3. Generator Uap Lokomotif .....	12
Gambar I.4. Generator Uap Seksi .....	19
Gambar I.5. Generator Uap Yarrow .....	20
Gambar I.6. Generator Uap Pancaran .....	21
Gambar II.1. Siklus Rankine .....	25
Gambar IV.1. Monogram Panas Jenis .....	48
Gambar IV.2. Proses Perpindahan Suhu .....	53
Gambar IV.3. Diagram Faktor Bilangan Reynold untuk Temperatur Film Gas pada Berbagai Diameter Pipa .....	54
Gambar IV.4. Diagram Konduktansi Panas Konveksi Panas Dasar Aliran Melintang untuk Laju Massa Gas pada Berbagai Diameter Pipa .....	55
Gambar IV.5. Diagram Pengaruh Temperatur Gas Film pada Faktor Sifat Fisik untuk Arah Aliran Gas Melintang .....	56
Gambar IV.6. Diagram Faktor Temperatur karena Perubahan Massa Velocity dari Keseluruhan Lapisan Film Dasar untuk Aliran Memanjang dari Udara Gas atau Uap .....	56

Gambar VI.1. Lapisan Isolasi Ketel secara Sederhana .....	79
Gambar VI.2. Aliran Panas dari Gas Asap ke Udara .....	84
Gambar VII.1. Diagram Diameter Cerobong Berdasarkan Jumlah Gas Asap yang Mengalir .....	91
Gambar VII.2. Diagram Hubungan antara Temperatur Gas Asap Keluar Cerobong Dengan Dimensi Cerobong .....	92
Gambar VII.3 Diagram Hubungan Antara Tinggi Cerobong untuk Harga Tarikan Cerobong dan Temperatur rata – rata Gas Dalam Cerobong. ....	92
Gambar VII.4. Diagram Hubungan Faktor Gesekan dengan Diameter Cerobong Berdasarkan Bilangan Reynold .....	94
Gambar VII.5. Kekerasan Relatif dari Berbagai Permukaan .....	96
Gambar VII.6. Viskositas Absolut untuk Beberapa Gas Ideal pada Tekanan Atmosfir .....	97
Gambar VII.7. Diagram untuk Mendapatkan Faktor Gesekan .....	97
Gambar IX.1. Katup Penguras .....	110
Gambar IX.2. Gelas Penduga .....	111
Gambar IX.3. Peluit Bahaya .....	112
Gambar IX.4. Manometer Bourdon .....	113
Gambar IX.5. Katup Keamanan dengan Muatan Pegas Langsung .....	114
Gambar IX.6. Garis Api .....	115
Gambar IX.7. Prop Timah .....	116

Gambar IX.8. Kran Penutup ada Dua Macam, Kran putar dan Kran Tutup ...	118
Gambar IX.9. Keran Uap Induk .....	118
Gambar X.1. Kontaktor Transmiting Magnet .....	121
Gambar X.2. Silinder Torak Berpegas .....	124
Gambar X.3. Modulating Pressure Control Device .....	124
Gambar X.4. Component Failure Mode .....	125
Gambar X.5. Managed Maintenance .....	126
Gambar X.6. Aliran Proses Maintenance .....	127

## DAFTAR TABEL

Tabel 1. Thermodynamic of Saturated Water and Steam -- Pressure table.

Tabel 2. Thermodynamic of Superheated Water Steam

Tabel 3. Nilai Enthalpy Gas

Tabel 4. Dimensi Pipa – pipa Baja

Tabel 5. Harga  $\frac{Q}{A}$

Tabel 6. Konduktifitas Panas Bahan Logam dan Paduan

Tabel 7. Sifat Fisis Gas Propertis

Tabel 8. Grimson's Value of B and N

Tabel 9. Harga Tegangan Tarik Maksimum Silinder Api

Tabel 10. Harga Tegangan Tarik Maksimum Pipa Api

Tabel 11. Harga Tegangan Tarik Maksimum Plat Baja

Tabel 12. Konversi Satuan

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **I.1 Tinjauan Umum**

Perkembangan teknologi saat ini dan segala motivasinya tidak begitu saja diterima oleh seluruh lapisan masyarakat. Teknologi yang menghasilkan barang dan jasa selalu dipertimbangkan dari segi resiko dan manfaat yang diakibatkan. Adanya sarana dan prasarana hasil dari perkembangan teknologi yang bermanfaat bagi masyarakat dan dunia industri dituntut untuk dapat bersaing untuk lebih maju, sehingga dapat tercipta teknologi baru ataupun hasil rekasanya. Dalam bidang industri pemakaian teknologi sudah tidak asing lagi untuk industri yang menghasilkan barang atau alat produksi, dalam suatu produksinya membutuhkan mesin produksi yang memadai sehingga diperoleh efisiensi dan hasil yang maksimum.

Dari berbagai penelitian para ahli terdahulu ditemukan uap sebagai suatu sumber energi yang cukup efektif untuk menghasilkan tenaga bagi daya yang diperlukan oleh mesin – mesin industri. Pada tahap selanjutnya penemuan tersebut dikembangkan dengan membuat instalasi pembangkit uap (boiler) yang kemudian kita kenal dengan sebutan generator uap atau ketel uap yaitu suatu kesatuan alat yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap dengan tekanan tertentu melalui proses mendidih.

Untuk mengubah air menjadi uap dibutuhkan sejumlah kalor yang diperoleh dari gas hasil pembakaran. Sedangkan pembakaran dapat terjadi apabila bahan bakar dicampur dengan udara pada temperatur diatas temperatur nyala uap, yang dihasilkan ketel dapat digunakan untuk berbagai keperluan baik media pemanas ataupun penggerak mula. Untuk keperluan pemanas diperlukan uap jenuh dan untuk penggerak mula pada umumnya diperlukan uap yang mempunyai tekanan tinggi dan kondisi uap panas lanjut.

## **I.2 Uap dan Penguapan**

Uap air adalah gas yang timbul fase air (cair) menjadi uap (gas) bila mengalami pemanasan sampai temperatur air sama dengan titik didih air (uap jenuh) atau temperatur lebih tinggi daripada titik didih air (uap jenuh lanjut) dan pada tekanan tertentu.

Uap adalah zat kerja yang baik dan memiliki sifat – sifat :

- Dapat menyimpan sejumlah energi.
- Dapat diproduksi dari air yang murah dan mudah diperoleh.
- Dapat digunakan untuk tujuan pemanas sebelum tenaga digunakan sebagai zat kerja.

Keadaan uap tergantung pada tekanannya oleh karena itu pembentukan uap atau penguapan terjadi pada tekanan konstan yaitu mendekati keadaan yang dialami uap didalam sebuah ketel. Proses penguapan adalah berubahnya molekul – molekul air menjadi uap melalui proses pemanasan, temperatur



pada saat ini mencapai temperatur didih dan apabila api masih ditambah nyalanya, maka temperatur didihnya tidak akan berubah.

Berdasarkan penguapannya uap terbagi menjadi tiga macam yaitu :

1. Uap basah adalah uap yang masih bercampur dengan titik – titik air yang halus dan mempunyai temperatur yang sama.
2. Uap jenuh adalah uap yang mempunyai tekanan dan temperatur didih yang sama dengan tekanan pada titik didih air.
3. Uap panas lanjut adalah uap jenuh yang dipanasi lebih lanjut.

### **I.3 Pembatasan masalah**

Untuk memberikan penekanan pada masalah yang akan dibahas dalam penyusunan dan penulisan skripsi ini, maka penulis hanya akan membahas mengenai generator pipa api, generator pipa api yang dibahas disini adalah generator pipa api dengan jenis generator uap lokomotif (locomotive boiler). Dalam penyusunan dan penulisan skripsi ini akan dibahas mengenai unjuk kerja (performance), thermal design, mechanical design dari boiler ini.

### **I.4 Metodologi perancangan**

Guna melengkapi data – data yang diperlukan dalam penyusunan dan penulisan skripsi ini penyusun memperoleh dengan cara :

1. Tanya jawab, hal ini dilakukan dengan cara mengadakan konsultasi langsung dengan pihak – pihak yang bersangkutan.

2. Observasi, yang merupakan teknik pengumpulan data dengan jalan mengadakan pengamatan langsung terhadap obyek yang sedang diteliti.
3. Study literatur, yang merupakan teknik pengumpulan data dengan cara mengamati dan mempelajari literatur atau referensi dari buku – buku yang berhubungan dengan generator uap (boiler).

### **I.5 Klasifikasi Generator Uap**

Pembagian generator uap dapat dibagi atas bermacam – macam bentuk berdasarkan atas beberapa kriteria, yaitu berdasarkan tekanan kerja, kapasitas uap, posisi dan pemakaiannya.

Pembagian generator uap dapat dituliskan sebagai berikut :

1. Berdasarkan tekanan kerjanya
  - a. Generator uap tekanan rendah :  $< 20$  atm
  - b. Generator uap tekanan sedang :  $20 - 50$  atm
  - c. Generator uap tekanan tinggi :  $50 - 140$  atm
  - d. Generator uap tekanan sangat tinggi :  $> 140$  atm
2. Berdasarkan kapasitas uapnya
  - a. Generator uap kapasitas kecil :  $< 10$  ton/jam
  - b. Generator uap kapasitas sedang :  $10 - 100$  ton/jam
  - c. Generator uap kapasitas tinggi :  $100 - 500$  ton/jam
  - d. Generator uap kapasitas sangat tinggi :  $> 500$  ton/jam

3. Berdasarkan posisi/kedudukannya
  - a. Generator uap horizontal (datar)
  - b. Generator uap vertikal (tegak)
  - c. Generator uap inclined (miring)
4. Berdasarkan tempat pemakaiannya
  - a. Generator darat
  - b. Generator laut
5. Berdasarkan faktor kegunaannya
  - a. Generator uap stasioner

Adalah generator uap yang bersifat tetap, tidak dapat dipindah.  
Biasanya digunakan untuk power plant.
  - b. Generator transportable

Generator uap ini dapat dipindah – pindahkan, seperti pada lapangan minyak dan penggergajian kayu.
  - c. Generator moveable

Adalah generator uap yang dapat bekerja sambil bergerak atau berpindah tempat. Banyak digunakan pada alat transportasi yang bertenaga uap, seperti kereta api.
6. Berdasarkan konstruksinya
  - a. Generator uap lorong api (shell type boiler)
  - b. Generator uap pipa api (fire tube boiler)
  - c. Generator uap pipa air (water tube boiler)

Dari pembagian Generator uap diatas pada umumnya pembagian Generator uap berdasarkan atas konstruksinya, sedang pembagian lainnya merupakan penyesuaian dari pembagian atas konstruksinya.

#### **a. Generator Uap Lorong Api**

Generator uap lorong api adalah generator uap konstruksinya terdiri dari satu atau lebih lorong api yang berbentuk silinder kecil, dimana silinder ini berfungsi sebagai ruang bakar dan saluran gas asap hasil reaksi pembakaran bahan bakar.

Silinder kecil atau lorong api diletakkan didalam tangki air. Sehingga penyerapan panas secara konveksi atau konduksi oleh air dalam tangki terjadi lewat dinding lorong api dan dinding dari tangki air yang dilewati oleh gas asap hasil reaksi dari pembakaran bahan bakar.

Agar sirkulasinya dapat berjalan dengan baik, maka lorong api diletakkan ditengah agak kebawah atau dibawah agak kesamping.

Lorong api biasanya dibuat agak berombak dengan tujuan agar lorong api kaku pada arah radial, sehingga akan lebih kuat untuk menahan tekanan air disekitarnya. Selain itu lorong api dapat lebih elastis pada arah aksial, sehingga apabila ada beda muai antara lorong api dengan silinder tangki ketel uap, tidak akan merusak bagian sambungan pada ujung lorong api tersebut. Juga akan memberikan bidang pemanasan yang lebih luas pada lorong api tersebut.

Keuntungan - keuntungan generator uap lorong api adalah sebagai berikut :

1. Konstruksinya sederhana sehingga perawatannya mudah dan bisa menghemat biaya operasional.
2. Generator ini tidak memerlukan air isian dengan kualitas tinggi atau tidak peka terhadap air kotor.
3. Dapat melayani variasi kapasitas air yang agak besar karena volume air yang ada didalam generator uap cukup besar, kapasitas dapat diperbesar dengan menambah bahan bakar.

Disamping mempunyai keuntungan – keuntungan tersebut diatas ketel ini juga mempunyai kerugian – kerugian antara lain :

1. Volume air didalam ketel terlalu besar sehingga pemanasan awal ketel sampai mendapatkan uap yang sesuai dengan syarat – syarat yang dibutuhkan memakan waktu lama.
2. Luas permukaan yang dipanasi dari gas panas tidak besar sehingga kapasitas dan efisiensi rendah.
3. Tekanan kerja rendah, maksimum yang dapat dicapai hanya 20 atm.

Yang termasuk didalam generator Lorong Api yaitu : generator uap Cornwall, generator uap Lancashire

#### **b. Generator Uap Pipa – Pipa Api**

Generator ini merupakan perkembangan dari generator uap lorong api. Generator uap pipa api adalah generator uap yang konstruksinya terdiri dari sebuah ketel yang berbentuk silinder/tangki yang berisi air, dimana

dalam tangki tersebut terdapat susunan pipa – pipa kecil yang dialiri oleh gas asap yang bersuhu tinggi. Pipa – pipa tersebut disebut dengan pipa – pipa api. Pipa – pipa api ini terendam air sehingga kalor dari gas asap yang mengalir didalam pipa – pipa itu dapat diserap oleh air yang berada disekitar pipa – pipa api. Pada umumnya generator uap ini mempunyai satu atau lebih lorong api, yang berfungsi sebagai ruang bakar.

Keuntungan-keuntungan generator uap pipa -pipa api adalah sebagi berikut:

- a. Luas bidang penghantar panas ke air lebih besar, sehingga kapasitasnya menjadi lebih besar.
- b. Volume air generator uap lebih kecil jika dibandingkan dengan luas bidang pemanas, sehingga pemanasan awalnya lebih cepat dibandingkan generator uap lorong api.
- c. Rendemen atau effisiensinya dapat lebih tinggi karena hampir semua bagian yang dialiri gas asap bersuhu tinggi dialiri air, dengan demikian kalor yang terbuang dapat dikurangi.

Kekurangan –kekurangan generator uap pipa – pipa api sebagai berikut:

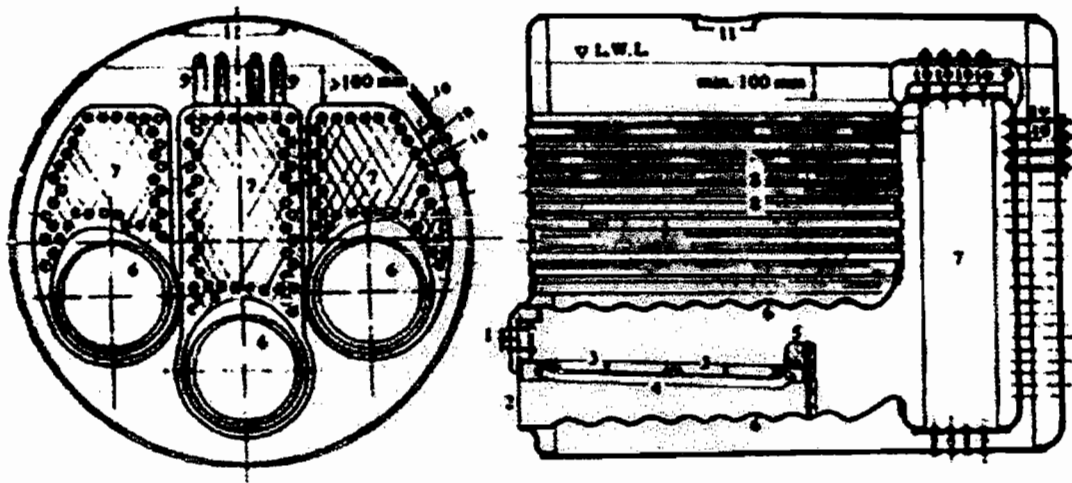
- a. Konstruksi generator uap pipa – pipa api lebih rumit sehingga biaya perawatannya lebih mahal.
- b. Banyak bagian yang berupa bidang datar, dimana bentuk ini kurang kuat terhadap tekanan sehingga harus diberi penahan yang cukup kuat.

Generator uap pipa – pipa api ini memiliki tekanan yang jarang melebihi dari 20 atm, dan kapasitas uapnya tergolong kapasitas yang rendah yaitu kurang dari 10 ton per jam.

Yang termasuk dalam generator uap pipa – pipa api yaitu : generator uap Schots, generator uap Cochran, generator uap Lokomotif atau Lokomobil

a. Generator Schots

Generator uap ini direncanakan agar api atau gas asap selalu bersinggungan dengan dinding – dinding yang berbatasan dengan air atau uap. Silinder api yang dipunyai sebanyak dua atau tiga buah, namun silinder – silinder api tersebut bermuara pada kotak api. Kotak api tersebut seluruhnya terendam didalam air yang terdapat pada drum ketel. Api dan gas asap mengalir dari rangka bakar yang terdapat didalam silinder api, melalui silinder – silinder api sampai ke kotak api dan dari kotak api melalui pipa – pipa api menuju cerobong asap keluar. Tekanan maksimal dari generator uap schots ini sekitar  $18 \text{ Kg/cm}^2$  atau  $1,8 \text{ N/m}^2$ .



Keterangan :

- |                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| 1 = Pintu bahan bakar             | 7 = Kotak api (Flame case)               |
| 2 = Pintu angin bawah             | 8 = Pipa – pipa api (Fire pipes)         |
| 3 = Batang – batang rangka bakar  | 9 = Jembatan penunjang                   |
| 4 = Penyangga batang rangka bakar | 10 = Baut – baut dan mur – mur penunjang |
| 5 = Jembatan api                  | 11 = lubang orang (man hole)             |
| 6 = Silinder api                  |  |

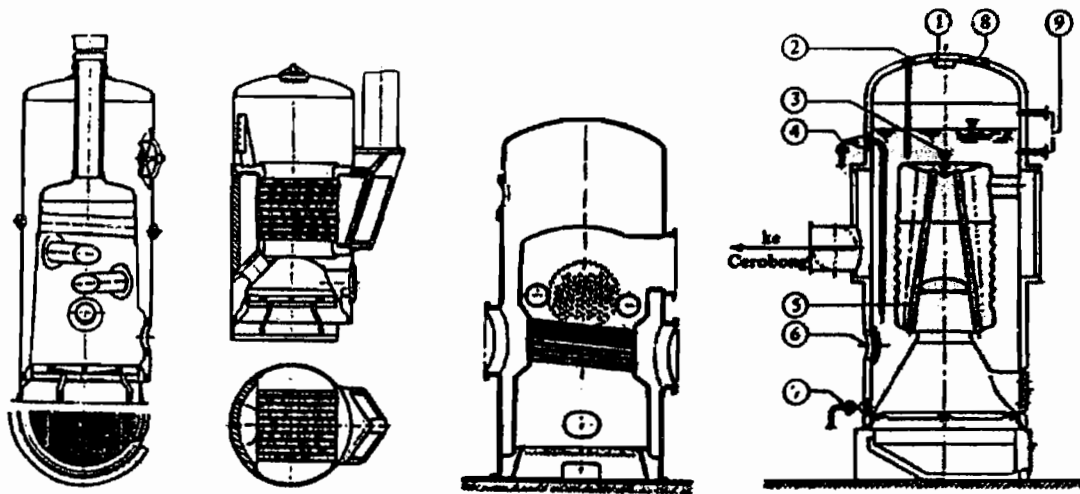
Gambar 1.1 Generator Uap Schots <sup>(1)</sup>

#### b. Generator Uap Chocran

Generator uap ini dipergunakan untuk kapasitas produksi yang kecil sekitar 0,2 – 1,8 ton/jam. Penggunaan generator ini pada mesin – mesin pengangkat atau mesin – mesin pemancang tiang dan dapat dipindah – pindahkan. Effisiensi generator ini rendah sehingga harganya murah. Tekanan didalam tangki generator tidak lebih dari 8 Kg/cm<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Boiler Types Characteristic and Function, Carl. D. Shield, 1961, hal 301



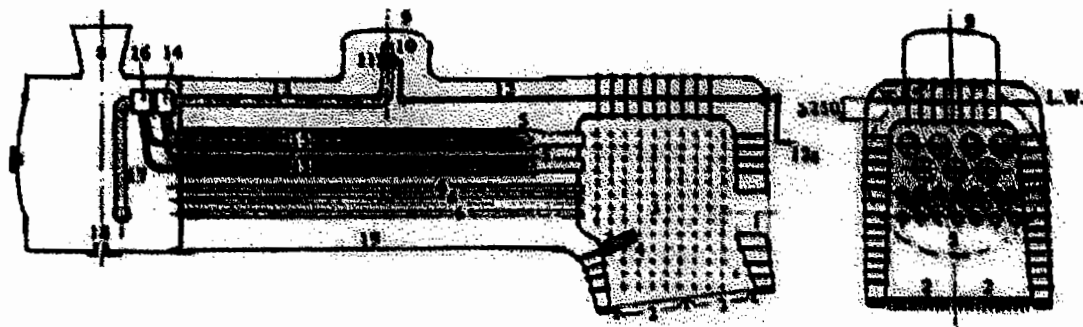


Gambar 1.2 Generator Uap Chocran <sup>(2)</sup>

c. Generator Uap Lokomotif atau Lokomobil

Generator uap jenis ini merupakan penyesuaian dan modifikasi dari ketel uap yang digunakan didalam lokomotif kereta api, ketel uap ini dapat dipindah – pindahkan. Pada bagian belakang generator terdapat sebuah tungku yang merupakan kotak api, dibagian bawah terdapat rangka bakar yang digunakan untuk membakar bahan bakar padat, berupa kayu, batu bara atau bahan bakar padat lainnya. Jika menggunakan bahan bakar cair, maka digunakan pembakar atau burner. Uap hasil pemanasan lanjut yang dihasilkan generator ini akan melakukan ekspansi kedalam mesin uap torak atau turbin uap yang selanjutnya menggerakkan roda – roda lokomotif.

<sup>2</sup> Ketel Uap, Ir. M. J. Djokosetyardjo, PT. Pradnya Paramita, 1989, hal 215



Keterangan :

- |                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| 1 = Pintu bahan bakar               | 11 = Keran uap utama (Main steam valve)     |
| 2 = Batang – batang rangka bakar    | 12 = Batang pengatur pengambilan uap        |
| 3 = Kotak api (Flame case)          | 12a = Tuas (handle) pengatur                |
| 4 = Jembatan api                    | 13 = Pipa uap kenyang menuju superheater    |
| 5 = Tabung – tabung api (Fire tube) | 14 = Header (pembagi) uap kenyang           |
| 6 = Pipa – pipa api (Fire pipes)    | 15 = Pipa–pipa superheater (pemanas lanjut) |
| 7 = Kotak asap (Smoke box)          | 16 = Header (pengumpul) uap dipanaskan      |
| 8 = Cerobong asap                   | 17 = Pipa uap yang dipanaskan lanjut        |
| 9 = Dom uap (Steam dome)            | 18 = Penghembus                             |
| 10 = Pengambil uap                  | 19 = Tangki ketel (Boiler vessel)           |

Gambar 1.3 Generator Uap Lokomotif <sup>(3)</sup>

### c. Generator Uap Pipa - Pipa Air

Generator uap yang bagian pendidihnya terdiri dari dua buah susunan pipa – pipa yang didalamnya berisi air yang harus dididihkan, sedangkan asap akan mengalir diluar pipa – pipa tersebut. Generator uap ini biasanya mempunyai sebuah tangki air yang berfungsi sebagai tempat pemisah antara uap dan air.

Generator uap pipa – pipa air mempunyai keuntungan sebagai berikut :

- a. Effisiensinya dapat lebih tinggi.

<sup>3</sup> Ketel Uap, Ir. M. J. Djokosetyardjo, PT. Pradnya Paramita, 1989, hal 210

- b. Dapat digunakan untuk generator uap dengan tekanan kerja tinggi.
- c. Dapat digunakan pada ketel uap dengan kapasitas besar.
- d. Dapat digunakan untuk ketel uap dengan volume air isian kecil sehingga pemanasan awal relatif cepat.

Namun demikian ketel uap jenis ini juga mempunyai kelemahan dibandingkan ketel uap jenis yang lain yaitu :

- a. Konstruksinya tidak lagi sederhana, sehingga perawatan dan perbaikannya lebih sulit.
- b. Memerlukan air isian dengan kualitas yang lebih baik dibandingkan dengan ketel uap jenis lainnya.

Berdasarkan atas sirkulasi air, maka generator uap pipa – pipa air dapat dibedakan atas :

- a. Generator uap pipa – pipa air sirkulasi alam (Natural Circulation Water Tubes Boiler)
- b. Generator uap pipa – pipa air sirkulasi Paksa (Forced Circulation Boiler)

a. Generator Uap Pipa – pipa Air Sirkulasi Alam

Proses terjadinya sirkulasi alam didalam generator uap pipa – pipa air dikarenakan perbedaan berat jenis air yang dipanasi dengan air yang tidak dipanasi. Pipa – pipa air didalam ketel uap dapat dibagi menjadi dua kelompok yaitu :

Kelompok I : Kelompok pipa – pipa air yang tidak dipanasi atau jika mendapatkan pemanasan adalah dari gas asap yang suhunya telah rendah.

Kelompok II : Kelompok pipa – pipa air yang mendapatkan pemanasan dari gas asap yang bersuhu tinggi.

Pada ujung atas kedua kelompok pipa itu dipasang pada tangki ketel uap atas, begitu juga untuk ujung yang bawah. Air yang terdapat pada susunan pipa – pipa kelompok I yang kurang mendapat panas tidak sampai mendidih sehingga pada pipa – pipa ini berisi air yang tidak bercampur uap. Susunan pipa – pipa pada kelompok II dipanasi, air didalamnya mendidih yang berarti didalam pipa – pipa ini berisi air dan uap. Dikarenakan berat jenis air lebih berat daripada berat jenis campuran air dan uap, menyebabkan terjadinya sirkulasi air sebagai berikut :

1. Air didalam kelompok II mengalir keatas, Kelompok pipa yang air didalamnya mengalir keatas disebut pipa - pipa naik (riser tubes).
2. Air didalam Kelompok I mengalir ke bawah disebut pipa – pipa turun (down comer tubes).

Setelah pemanasan berlangsung beberapa saat, suhu air dalam ketel uap mencapai titik didih, suhu air didalam tangki, di down comes tubes dan di riser tubes menjadi sama besar yaitu sama dengan titik didih air. Karena pemanasan di riser tubes tetap berlangsung, air didalam riser tubes mendidih sebagian berubah menjadi uap, maka akan terjadilah sirkulasi sebagai berikut :

1. Campuran air dan uap di riser tubes mengalir keatas masuk ke header atas. Didalam header atas ini uap air akan terpisah, lepas keatas permukaan air didalam tangki.
2. Air didalam down comer tubes mengalir turun kemudian masuk ke header atas sehingga masuk ke riser tubes lagi.

Sirkulasi air didalam generator uap pipa – pipa air terus terjadi selama pemanasan berlangsung, karena air didalam riser tubes mendidih, maka riser tubes juga disebut pipa didih. Pada generator uap pipa – pipa air, sirkulasi air didalamnya terutama untuk mengusahakan agar seluruh pipa – pipa didihnya dibasahi air. Dengan demikian suhu pipa – pipa didih dapat dianggap sama dengan suhu air didalamnya.

Sehubungan dengan alasan tersebut diatas maka ketika bersirkulasi kecepatan aliran air didalam pipa – pipa didih harus diusahakan pada kecepatan yang optimum, yang harganya tergantung pada tekanan kerjanya ataupun sedikit lebih cepat. Kecepatan aliran yang terlalu besar akan menyebabkan penyerapan kalor menjadi rendah/kurang baik. Sedangkan untuk kecepatan aliran yang terlalu lambat selama masih berbentuk air, penyerapan panasnya baik. Akan tetapi, sebentar saja kadar uapnya dapat meningkat dengan cepat sehingga kadar uap didalam pipa – pipa didih terlalu banyak, sehingga kemungkinan dapat mengakibatkan uap terpisah dari air lalu melapisi permukaan dalam pipa – pipa didih. Akibatnya dinding pipa – pipa didih ada yang tidak dibasahi air.

Tidak terbasahnya dinding dalam pipa – pipa didih ini, dapat mengakibatkan :

1. Suhu pipa – pipa didih menjadi lebih tinggi dari suhu air yang mengalir didalamnya. Jika suhu pipa – pipa ini lebih tinggi dari suhu yang direncanakan, pipa – pipa ini dapat rusak karena semakin tinggi suhunya walau untuk beban yang tetap akan menyebabkan tegangan tarik yang diijinkan menjadi turun.
2. Penyerapan kalor dari gas asap menjadi turun, pada aliran yang terlalu lambat akhirnya juga berakibat tidak baik untuk penyerapan panasnya, juga menyebabkan pipa – pipa bersuhu sangat tinggi (overheating). Oleh karena itu, kecepatan alir didalam pipa – pipa didih harus diperhitungkan dengan teliti terutama jangan terlalu lambat.

b. Generator uap pipa – pipa air sirkulasi Paksa

Generator uap dengan tekanan tinggi, perbedaan berat jenis air dan uap tidak begitu besar, sehingga tidak akan mampu lagi menimbulkan sirkulasi didalam ketel uap.

Maka sirkulasi didalamnya terpaksa dilakukan dengan bantuan pompa. Pada dasarnya generaror uap pipa – pipa air sirkulasi paksa dapat dibagi menjadi :

1. Generator uap pipa – pipa air berpompa langsung

Generator uap berpompa langsung tidak menggunakan tangki generator tempat memisahkan uap dan air sehingga air yang

lebih ringan dan dalam ketel menjadi lebih kecil sehingga pemanasan awal lebih cepat. Dengan volume air yang kecil ini, laju air isian dan udara masuk generator, maka generator ini harus dilengkapi dengan alat kontrol otomatis yang peka dan tanggap terhadap kondisi generator. Karena dalam generator ini batas pipa – pipa yang masih dibasahi dan yang tidak dibasahi aliran air kurang jelas, maka dalam perencanaan diperlukan kualitas bahan pipa yang lebih baik.

Generator uap pipa – pipa air membutuhkan air isian yang berkualitas sangat baik karena terjadinya uap langsung, maka bila ada zat – zat yang tidak menguap akan tertinggal dan melapisi dinding pipa bagian dalam sehingga dapat menimbulkan panas yang berlebih (overheating).

## 2. Generator uap pipa – pipa air pompa keliling

Generator uap jenis ini mempunyai tangki tempat untuk memisahkan air dan uap. Air yang mengalir dalam pipa – pipa dididhanya sebagian yang berubah menjadi uap, didalam tangki generator airnya disirkulasikan kembali.

Dibandingkan dengan generator uap pipa – pipa berpompa langsung, generator ini membutuhkan waktu yang lebih lama untuk pemanasan awal karena volume air lebih besar maka generator ini tidak mengharuskan pengaturan laju pembakaran, laju air isian dan udara masuk generator secara otomatis seperti pada generator berpompa langsung.

pemanasan awal karena volume air lebih besar maka generator ini tidak mengharuskan pengaturan laju pembakaran, laju air isian dan udara masuk generator secara otomatis seperti pada generator berpompa langsung.

Pengaturannya bisa dilakukan dengan sistem manual atau otomatis. Karena tidak semua air menguap, maka seluruh pipa didih masih dibasahi air, sehingga dalam perencanaan generator ini dapat menggunakan pipa – pipa didih dari bahan yang lebih murah namun dengan adanya tangki pemisah uap dan air, konstruksi generator lebih berat. Kelemahan lainnya adalah masih menggunakan pompa untuk sirkulasi air dalam pipa – pipa.

c. Beberapa macam generator uap pipa – pipa air

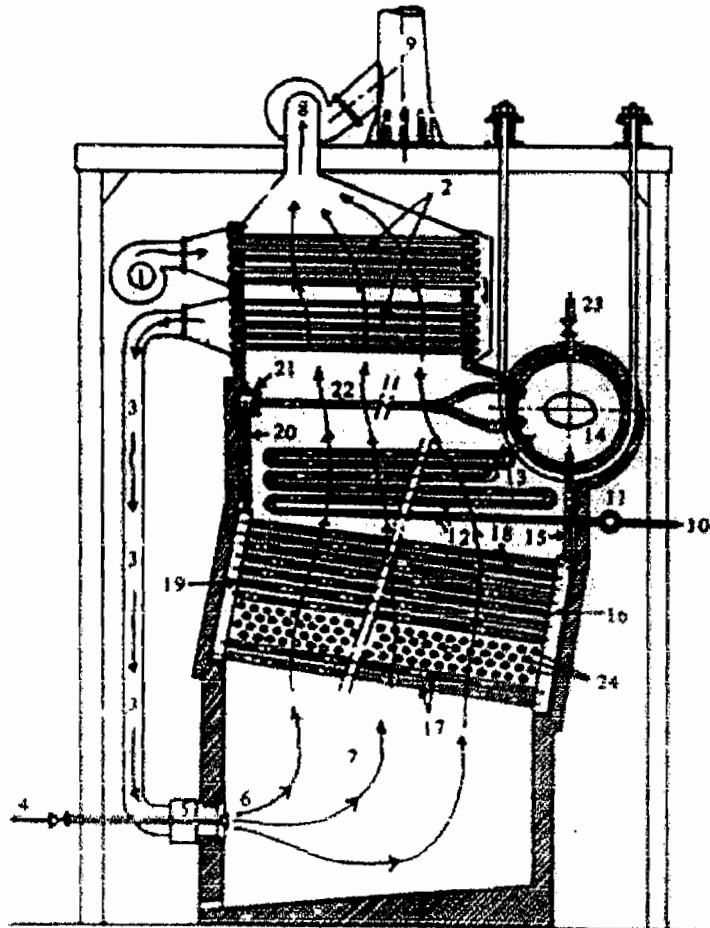
1. Generator uap seksi (Section Boiler) dan variannya

Yaitu generator uap yang terdapat pipa – pipa turun (down comers pipes) pada dasar generator yang berdiameter sekitar 10 cm. Pipa – pipa turun tersebut berakhir dibawah pada kotak – kotak seksi (water section boxes) yaitu berupa kotak air yang dibuat berkelok – kelok dan pada setiap lekukan tersebut terdapat pipa – pipa penguap air (evaporator pipes) yang berdiameter 6 – 8 cm, yang ditempatkan didaerah pancaran api ataupun didaerah aliran gas asap atau daerah konveksi. Api atau gas asap mengalir diantara pipa – pipa dan menyerahkan panasnya.

Satu perangkat generator uap seksi terdiri dari :



Sebuah pipa air turun (down comes pipe), Sepasang kotak seksi air dan kotak seksi uap. Sejumlah pipa – pipa penguap air, Sejumlah pipa – pipa uap naik

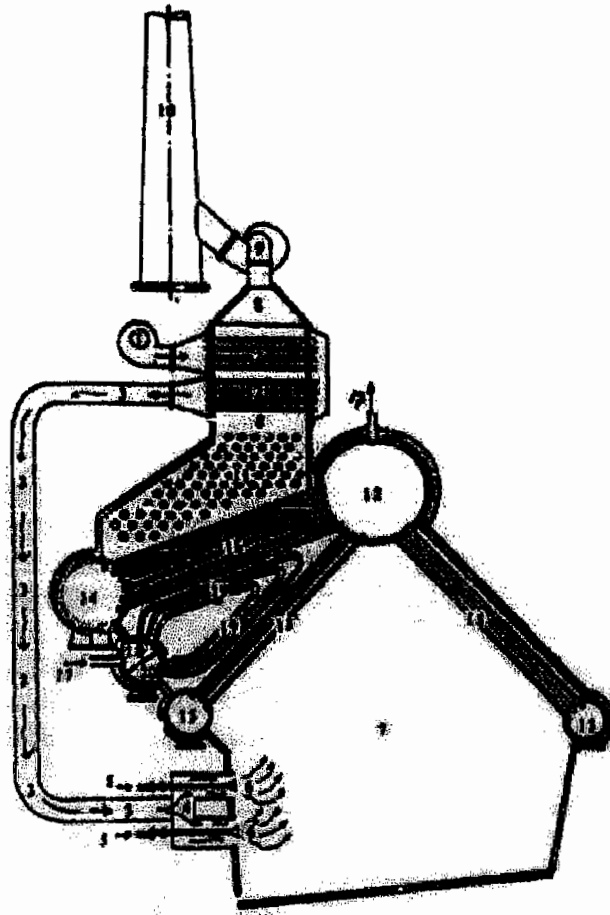


Gambar 1.4 Generator Uap Seksi <sup>(4)</sup>

## 2. Generator uap Yarrow

Yaitu generator uap yang banyak digunakan di kapal laut dan pada pembangkit uap untuk pembangkit tenaga listrik. Generator uap ini memiliki tekanan kurang dari 80 kgf/cm<sup>2</sup> dan berkapasitas antara 30 – 80 ton/jam.

<sup>4</sup> Ketel Uap, Ir. M. J. Djokosetyardjo, PT. Pradnya Paramita, 1989, hal 216

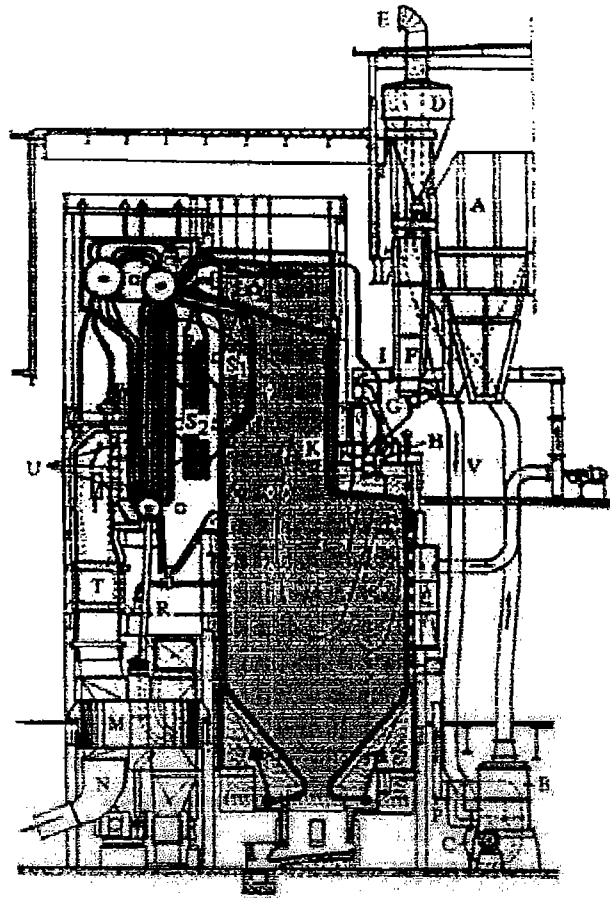


Gambar 1.5 Generator Uap Yarrow <sup>(5)</sup>

### 3. Generator uap Pancaran

Yaitu generator uap yang memiliki pipa – pipa pancaran yang keseluruhannya menerima panas secara pancaran (radiasi) dari api didalam tungku, sehingga pipa – pipa penguap merupakan dinding tungku keseluruhannya. Dengan demikian dinding tungku disebelah dalam akan dilapisi dengan pipa – pipa penguap yang berdiri vertikal. Adapun jarak antara pipa – pipa penguap tersebut dari besarnya fraksi pendinginan yang disesuaikan dengan bahan bakar yang digunakan dalam tungku.

<sup>5</sup> Ketel Uap, Ir. M. J. Djokosetyardjo, PT. Pradnya Paramita, 1989, hal 227



Gambar 1.6 Generator Uap Pancaran <sup>(6)</sup>

### I.7 Bagian – bagian dari Generator Uap

Secara umum bagian – bagian dari ketel uap yaitu sebagai berikut :

- a. Alat bakar atau burner

Alat ini berfungsi untuk mencampur bahan bakar dan udara untuk pembakaran.

- b. Ruang bakar atau furnace

Ruang bakar ini berfungsi untuk tempat berlangsungnya proses pembakaran.

- c. Bagian pendidihan atau penguapan (evaporator)

<sup>6</sup> Ketel Uap, Ir. M. J. Djokosetyardjo, PT. Pradnya Paramita, 1989, hal 243

Bagian pendidihan ini berfungsi sebagai tempat untuk mendidihkan air hingga terbentuknya uap air.

d. Superheater

Berfungsi untuk menjadi uap jenuh menjadi uap panas lanjut.

e. Ekonomiser

Ekonomiser berfungsi untuk memanasi air ketel sehingga mendekati titik didihnya sebelum air masuk evaporator.

f. Pemanas udara (air heater)

Air heater berfungsi untuk memanasi udara yang diperlukan dalam proses pembakaran.

g. Drum uap (steam drum)

Drum uap ini berfungsi untuk mengumpulkan uap, pemisah uap dan pemasukan uap.

Disamping bagian – bagian utama terdapat juga peralatan – peralatan pemanas air yang biasa digunakan sebagai alat bantu antara lain :

a. Alat pengontrol

Alat pengontrol ini berfungsi untuk mengatur generator uap agar beroperasi sesuai rencana.

b. Alat pengaman

Merupakan alat keamanan generator uap pada saat beroperasi sehingga tidak terjadi hal – hal yang tidak dirugikan.

## **BAB II**

### **SPESIFIKASI GENERATOR UAP LOKOMOTIF**

#### **II.1 Spesifikasi Generator Uap**

Generator uap lokomotif (locomotive Boiler) merupakan generator uap jenis pipa – pipa api yang merupakan penyesuaian dan modifikasi dari generator uap yang digunakan didalam lokomotif kereta api, sering juga digunakan diladang – ladang minyak ataupun tempat – tempat penggergajian kayu. Generator uap jenis ini merupakan generator uap pipa – pipa api yang portable dan mudah dipindah – pindahkan dari satu tempat ketempat yang lain.

Dibagian belakang generator uap lokomotif ini terdapat sebuah tungku yang merupakan kotak api, dibagian bawah tungku terdapat ruang bakar yang digunakan untuk membakar bahan bakar padat berupa kayu, batu bara, atau bahan bakar lainnya. Dalam perancangan ini bahan bakar yang digunakan yaitu batu bara.

Uap yang dipanaskan lanjut yang dihasilkan generator uap ini akan melakukan ekspansi didalam mesin uap torak uap yang selanjutnya menggerakkan roda – roda dari lokomotif.

#### **II.2 Aliran gas asap**

Generator uap lokomotif merupakan jenis tungku bakar dalam dan gas panas hasil pembakaran dari dalam dapur (furnace) meninggalkan

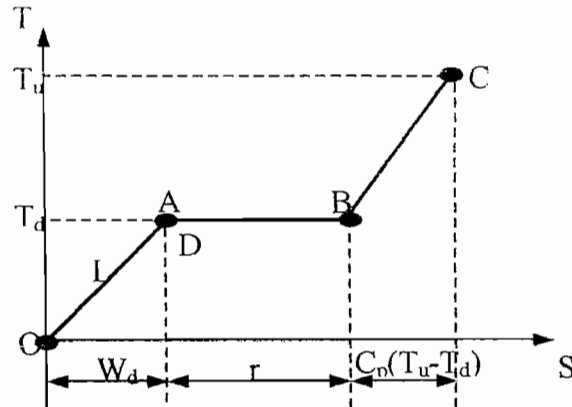
tungku melewati pipa – pipa. Gas asap ini setelah melewati pipa – pipa akan masuk kedalam dan fire smoke dan keluar atmosfer dalam aliran yang cukup pendek, sehingga temperatur keluarnya cukup tinggi sehingga berbahaya bagi udara disekitarnya.

### **II.3 Proses terbentuknya Uap**

Proses pembentukan uap yang terjadi pada generator uap lokomotif dapat diuraikan sebagai berikut :

Mula – mula tangki diisi dengan air pada temperatur  $T_a$ , kemudian tangki dipanasi sehingga temperatur dalam tangki akan naik mencapai titik didih pada temperatur  $T_d$  sehingga akan terbentuk uap. Uap yang terbentuk pada temperatur didih ini disebut sebagai uap jenuh atau uap kenyang (saturated steam), selama tekanan air dan tekanan tangki tetap maka setiap pemberian panasnya hanya akan berakibat menguapnya air tanpa menaikkan temperatur didihnya. Bila tekanan air dan tekanan tangki dinaikkan atau diturunkan maka temperatur didih air dan temperatur uap akan naik atau turun.

Bila uap jenuh tidak dipakai atau dibuang, maka tekanan tangki akan naik karena pembakaran tetap berlangsung didalam ruang bakar. Uap jenuh pada temperatur didih dialirkan pada sebuah pipa atau alat dimana akan terjadi pemanasan lebih lanjut, dimana uap jenuh tersebut dipanaskan lebih lanjut sampai temperatur mencapai temperatur  $T_u$ , maka uap tersebut disebut dengan uap panas lanjut superheated steam.



Gbr 2.1. Siklus Rankine

#### II.4 Kebutuhan Kalor Generator Uap Lokomotif

Berdasarkan data yang diperoleh bahwa sebuah generator uap lokomotif (locomotive boiler) agar dapat berfungsi sebagai alat transportasi dan mampu menarik sejumlah gerbong maka harus memiliki daya yang cukup besar. Maka berdasarkan survei yang telah dilakukan di PT Gondang Baru yaitu sebuah pabrik tebu di Klaten (Yogyakarta) didapat bahwa generator uap memiliki :

- Daya = 60 kW  
= 80,46 HP
- Tekanan Kerja = 14 kg / cm<sup>2</sup>  
= 1,373 MPa
- Bahan Bakar = Batu bara



Sehingga dari data – data diatas dapat dihitung kalor yang dibutuhkan tiap – jam adalah sebagai berikut :

Effisiensi dari locomotif boiler = 80% <sup>(7)</sup>

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$80\% = \frac{80,46}{P_{in}} \times 100\%$$

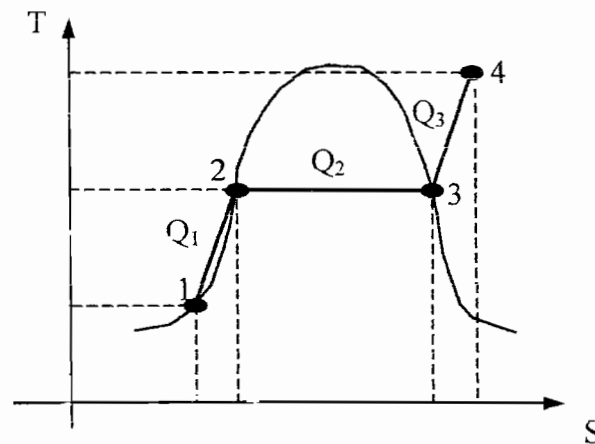
$$P_{in} = 100,575 \text{ Hp}$$

$$= 74998,777 \text{ Watt}$$

$$= 74998,777 \text{ J/s}$$

$$Q_{in} = 74,999 \text{ KJ/s}$$

Kalor yang dibutuhkan untuk mengubah air yang masuk kedalam ketel kemudian dipanaskan sampai mendidih dan sebagian menjadi uap jenuh maka dibutuhkan kalor sebesar :



Karena  $Q_1$  masih berupa air yang mempunyai temperatur rendah dan belum bisa dipakai untuk menjalankan lokomotif maka  $Q_1$  tidak dipakai dalam rumus dihalaman berikutnya. Suhu uap direncanakan  $220^\circ\text{C}$

Pada tekanan 1,373 MPa, maka temperatur diperoleh dari Tabel 1 sebesar  $194,15^\circ\text{C}$

<sup>7</sup> Carl D Shield, Boiler Type Characteristic Function, hal 25



$$Q_2 + Q_3 = Q_{in} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

$$m_a(h_3 - h_2) + m_a(h_4 - h_3) = Q_{in}$$

Dengan :  $Q_{in}$  = Kalor yang dibutuhkan tiap jam (=74,999 KJ/s)

$h_1$  = Entalpy air masuk ketel pada suhu 27 °C dan tekanan 0,1 MPa  
(= 417,36 KJ/kg) dilihat pada ( tabel 1 )

$h_2$  = Entalpy air panas pada suhu 194,15 °C dan tekanan 1,373 MPa  
( $h_f$  = 826,18 KJ/kg) dilihat pada ( tabel 1 )

$h_3$  = Entalpy uap jenuh pada suhu 194,15 °C dan tekanan 1,373 MPa  
( $h_g$  = 2789,356 KJ/kg) dilihat pada ( tabel 1 )

$h_4$  = Entalpy uap pada suhu 220 °C dan tekanan 1,373 MPa  
( $h$  = 2854,3 KJ/kg) dilihat pada ( tabel 2 )

$m_a$  = Keluaran uap tiap jam (ton/jam)

Maka :  $Q_2 + Q_3 = Q_{in}$

$$m_a(h_3 - h_2) + m_a(h_4 - h_3) = Q_{in}$$

$$m_a(2789,356 - 826,18) + m_a(2854,3 - 2789,356) = 74,999$$

$$m_a(2028,12) = 74,999$$

$$m_a = 0,03698 \text{ Kg/s}$$

$$= 0,133 \text{ ton/jam}$$

$$Q_1 = m_a(h_2 - h_1) \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

$$= 0,03698 (826,18 - 417,36)$$

$$= 15,118 \text{ KJ/s}$$

$$= 54425,388 \text{ KJ/jam}$$

$$Q_2 = m_a(h_3 - h_2) \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

$$= 0,03698 (2789,356 - 826,18)$$

$$= 72,598 \text{ KJ/s}$$

$$= 261353,694 \text{ KJ/jam}$$

$$Q_3 = m_a(h_4 - h_3) \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

$$= 0,03698 (2854,3 - 2789,356)$$

$$= 2,4 \text{ KJ/s}$$

$$= 8645,864 \text{ KJ/jam}$$

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

$$= 15,118 + 72,598 + 2,4$$

$$= 90,116 \text{ KJ/s}$$

$$= 324424,969 \text{ KJ/jam}$$

## II.5 Sirkulasi Air Ketel

Sirkulasi air pada generator uap lokomotif dapat terjadi karena adanya perbedaan berat jenis yang diakibatkan oleh perbedaan suhu karena pembakaran bersuhu tinggi terjadi pada air yang paling dekat dengan keliling permukaan lorong api dan pipa – pipa api, air tersebut bergerak keatas menuju permukaan air didalam silinder tersebut, sedangkan air yang lebih dingin turun kekedua bagian samping dekat permukaan dalam silinder ketel tersebut. Sehingga dapat disimpulkan bahwa air yang bersuhu tinggi berat jenisnya lebih kecil dibandingkan dengan air yang bersuhu rendah.

Proses sirkulasi air pada generator uap lokomotif ini dapat berlangsung terus – menerus selama pemanasan tetap berlangsung.

### **BAB III**

#### **PEMBAKARAN BAHAN BAKAR**

##### **III.1 Klasifikasi Bahan Bakar**

Pembakaran dapat diartikan sebagai suatu reaksi kimia antara bahan bakar dengan udara yang menghasilkan kalor yang berlangsung didalam ruang bakar. Panas dari hasil pembakaran dipergunakan untuk mengubah air menjadi uap, panas ini dihasilkan dari reaksi yang terjadi antara unsur – unsur penyusun bahan bakar dan oksigen dari udara yang berlangsung secara isothermal yang disertai dengan pelepasan kalor. Tidak seperti mesin tenaga yang lain misal diesel dan mesin turbin, pembangkit uap dapat menggunakan bahan bakar dari berkalori rendah sampai dengan kalori tinggi.

Bahan bakar yang digunakan didalam generator uap pada umumnya diklasifikasikan sebagai berikut :

1. Bahan bakar padat yaitu bahan bakar yang berasal dari zat – zat organic, bahan bakar padat mengandung unsur – unsur : C, H, O<sub>2</sub>, N, S, abu dan air yang kesemuanya terikat dalam satu unsur senyawa kimia.  
Contoh : batu bara, kayu, ampas tebu dan arang kayu.
2. Bahan bakar cair yaitu bahan bakar yang berasal dari minyak bumi, minyak bumi berasal dari dalam tanah dengan jalan pengeboran dan memompakannya keatas untuk diolah menjadi minyak bakar.

Contoh : kerosin, gasolin dan minyak diesel.

3. Bahan bakar gas yaitu bahan bakar yang berasal dari dalam tanah dimana terkandung gas bumi atau sering disebut dengan gas alam yang timbul pada saat proses pembentukan minyak bumi, gas, udara dan ( $\text{CH}_4$ ) atau metan.

Contoh : metana ( $\text{CH}_4$ ) dan gas alam cair (LNG)

Persyaratan umum didalam pemilihan bahan bakar untuk generator uap antara lain :

1. Nilai pembakaran yaitu banyaknya kalor yang didapat dari pembakaran senyawa setiap kilogram bahan bakar harus tinggi.
2. Prosentase dari bahan bakar yang tidak terbakar harus sekecil mungkin.
3. Murah dan mudah didapat dan mencukupi kebutuhan untuk jangka waktu yang direncanakan.
4. Praktis dan efisien atau dengan kata lain tidak banyak makan tempat.

Kondisi – kondisi yang harus dipenuhi supaya terjadi pembakaran yang baik, yaitu :

- a. Udara yang cukup.
- b. Temperatur cukup tinggi
- c. Waktu yang cukup untuk berlangsungnya proses pembakaran.
- d. Harus ada unsur -- unsur tertentu dalam bahan bakar yang dalam kesenyawaannya dengan oksigen disertai dengan keluarnya kalor.
- e. Harus terdapat kegiatan yang cukup untuk menambahkan nyala api

Pada proses pembakaran selain kalor juga menghasilkan gas asap. Gas asap yang bersuhu tinggi mempunyai kalor yang belum dipancarkan kesekitarnya oleh nyala api pada proses pembakaran dibawa oleh gas asap. Gas asap bersuhu tinggi dialirkan keluar dapur dilewatkan pada bagian ketel uap, yaitu berupa aliran (konveksi), disinilah gas asap berfungsi sebagai pemanas.

Dalam pembakaran seluruh karbon bereaksi dengan membentuk  $\text{CO}_2$ . Gas  $\text{CO}_2$  ini tidak dapat bereaksi dengan  $\text{O}_2$  lagi.

Proses pembakaran sempurna akan menghasilkan kalor yang maksimum. Pembakaran tidak sempurna sebaiknya dihindari dalam operasi ketel uap. Kedalam ruang bakar dialirkan udara melebihi ketentuan teoritisnya, ini dimaksudkan agar kontak udara dan bahan bakar lebih besar, kelebihan udara dari kebutuhan disebut juga dengan “Excess Air”. Untuk besarnya excess air tergantung dari bahan bakar yang digunakan. Berikut ini yang menentukan banyaknya kebutuhan udara berlebih untuk macam – macam bahan bakar :

- Bahan bakar padat :

1. Batu bara : 10 – 40 % udara berlebih
2. Cocos : 20 – 40 % udara berlebih
3. Kayu : 25 – 50 % udara berlebih
4. Ampas tebu : 25 – 45 % udara berlebih

- Bahan bakar cair

1. Minyak : 8 – 15 % udara berlebih

- Bahan bakar gas

1. Gas alam cair : 5 – 10 % udara berlebih
2. Refrinary gas : 8 – 15 % udara berlebih
3. Furnace gas : 15 – 25 % udara berlebih

Sedangkan udara pada tekanan atmosfer, sebagian besar tersusun dari oksigen dan nitrogen serta sebagian terdiri dari uap air, gas mulia dan CO<sub>2</sub>. Pada perancangan generator uap lokomotif ini digunakan bahan bakar padat alami yaitu batu bara. Sifat – sifat bahan bakar padat berupa batu bara yaitu sebagai berikut :

1. Kandungan zat – zat yang mudah menguap.

Yang dimaksud dengan kandungan zat yang mudah menguap atau volatile meter adalah prosentase atau berat dari zat yang menguap bila dilakukan penguapan (destilasi) kering terhadap bahan bakar tersebut tanpa ada hubungan udara pada temperatur 950 °C, dikurangi dengan prosentase berat dari uap air yang turut serta menguap, sedangkan sisanya berupa kokas bahan bakar tersebut dapat terbakar.

2. Kadar abu

Untuk memperkecil kadar abu didalam bahan bakar batu bara dapat dilakukan dengan memilih batubara yang baik melalui warnanya yang hitam mengkilap. Kadar abu yang tinggi didalam batu bara dapat mempengaruhi proses pembakaran batu bara itu sendiri dan dapat memperbesar kerugian yang disebabkan terdapatnya jumlah bahan

bakar yang terbang bersama abu, lagi pula sehabis pembakaran berlangsung dapat menimbulkan kerak – kerak abu.

Disamping itu kadar abu yang tinggi dalam batu bara akan mempersulit penyalan batu bara serta kemungkinan mencairnya abu pada temperatur pembakaran yang menutupi celah rangka bakar yang akan dilalui oleh udara primer, sehingga penyaluran udara primer akan terganggu.

### 3. Kadar air

Kadar air didalam batu bara bertambah saat proses pencucian batu bara sehabis penambangannya. Bertambahnya kadar air didalam batu bara dapat disebabkan karena penimbunan batu bara diudara terbuka atau bila butiran – butiran batu bara semakin halus, jumlah kadar air dan abu didalam batu bara akan menurunkan nilai pembakaran (Heating Value) dari batu bara itu tersebut.

### 4. Proses membawa sendiri dan merusak sendiri

Proses merusak dengan sendirinya, berlangsung karena batu bara ditumpuk secara terbuka diudara bebas untuk jangka waktu yang cukup lama, hal ini terjadi karena kandungan zat arang atau karbon (C) dan hidrogen (H) menyusut sedangkan zat asamnya justru bertambah yang disebabkan proses oksidasi secara perlahan – lahan antara udara bebas disekitarnya dengan tumpukan batu bara tersebut yang berlangsung dalam jangka waktu yang cukup lama.

Proses dimulai dengan absorpsi oksigen dari udara bebas oleh batu bara yang akan terjadi pada permukaan – permukaan batu bara, lambat laun berkat temperatur yang agak tinggi oksigen tersebut akan terikat secara kimiawi. Bila proses tersebut berlangsung terus sedangkan proses tersebut akan menimbulkan panas, panas tersebut menyebabkan proses dipercepat sehingga akan menimbulkan proses lebih lanjut yaitu proses membara dengan sendirinya.

### III.2 Analisa Bahan Bakar

Untuk menentukan banyaknya energi yang diperlukan untuk mengubah air menjadi uap didalam ketel uap, maka perlu diketahui terlebih dahulu komposisi bahan bakarnya. Adapun komposisi bahan bakar batu bara untuk generator uap yang direncanakan yaitu :

**Tabel 3.1 Komposisi Batu bara Bukit Asam**

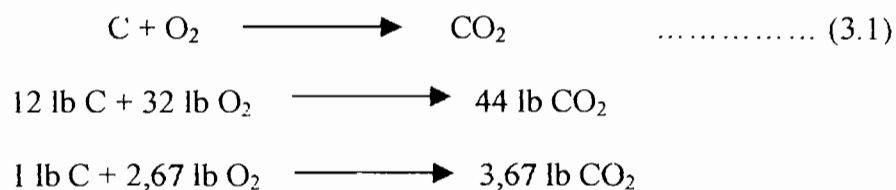
Nama	Rumus	Persen (%)
Karbon	C	63,5
Hydrogen	H <sub>2</sub>	5,8
Oksigen	O <sub>2</sub>	15,2
Nitrogen	N <sub>2</sub>	1,0
Belerang	S	0,5
Abu	Ash	5,0
Air	H <sub>2</sub> O	9,0

(Sumber : Ketel Uap, Ir. M. J. Djokosetyardjo, PT. Pradnya Paramita. 1989. hal 42)



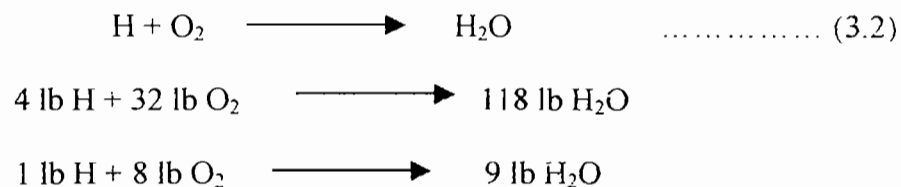
Proses pembakaran adalah suatu reaksi kimia yang menimbulkan panas dan proses tersebut membutuhkan oksigen ( $O_2$ ) yang diambil dari udara pembakaran. Berikut dapat dituliskan reaksi pembakaran unsur bahan bakar yaitu proses pembakaran sempurna tiap 1 lb oksigen yang dibutuhkan untuk pembakaran C dan H dalam 1 lb bahan bakar :

Karbon (C) terbakar sempurna menjadi  $CO_2$  menurut persamaan <sup>(7)</sup>



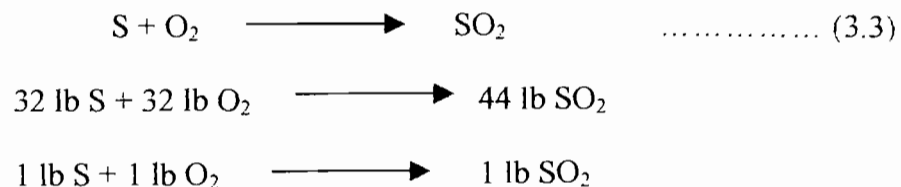
Jadi setiap pembakaran 1 lb karbon (C) dibutuhkan oksigen ( $O_2$ ) sebesar 2,67 lb.

Hidrogen (H) terbakar sempurna menjadi  $H_2O$  menurut persamaan <sup>(8)</sup>



Jadi setiap pembakaran 1 lb hidrogen (H) dibutuhkan oksigen ( $O_2$ ) sebesar 8 lb.

Belerang (S) terbakar sempurna menjadi  $SO_2$  menurut persamaan <sup>(9)</sup>



<sup>7</sup> Ketel Uap, Ir. M. J. Djokosetyardjo, PT. Pradnya Paramita, 1989, hal 72

<sup>8</sup> Ketel Uap, Ir. M. J. Djokosetyardjo, PT. Pradnya Paramita, 1989, hal 72

<sup>9</sup> Ketel Uap, Ir. M. J. Djokosetyardjo, PT. Pradnya Paramita, 1989, hal 72

Jadi setiap pembakaran 1 lb belerang (S) dibutuhkan oksigen ( $O_2$ ) sebesar 1 lb.

### III.3 Nilai Pembakaran

Yang dimaksud dengan nilai pembakaran bahan bakar adalah jumlah kalor yang dilepaskan atau dapat dibebaskan dengan cara pembakaran persatuan volume ( $Btu/ft^3$ ) bahan bakar, karena bahan bakar mengandung  $H_2O$ . Dalam hal ini  $H_2O$  dapat berupa air atau uap air, suhubungan dengan hal ini maka nilai pembakaran dapat dibedakan menjadi :

a. Nilai pembakaran atas atau high heat value (HHV)

Yaitu apabila uap air yang terbentuk sebagai reaksi pembakaran antara hidrogen dan oksigen seluruhnya mengembun sehingga terdapat dalam bentuk cair.

b. Nilai pembakaran bawah atau low heat value (LHV)

Yaitu apabila  $H_2O$  yang terbentuk dari reaksi pembakaran seluruhnya masih dalam bentuk uap.

Nilai pembakaran bawah jauh lebih rendah daripada nilai pembakaran atas karena sebagian panas tidak ikut dibebaskan karena akibat diperlukan untuk mempertahankan  $H_2O$  dalam bentuk uap, tetapi dalam teknik generator uap yang diperlukan adalah keadaan  $H_2O$  yang tidak mengembun menjadi cair maka dapat bereaksi dengan belerang (S) membentuk  $H_2SO_4$  yang dapat mengikis baja atau besi.

Dengan menggunakan (tabel komposisi Batubara Bukit Asam) HHV dan LHV dengan menggunakan komposisi kimia dapat dihitung :

$$HHV = 33915C + 144033 \times \left( H - \frac{O_2}{8} \right) + 10468 \times S \quad (10) \dots\dots\dots (3.4)$$

$$= 33915 \times 0,635 + 144033 \times \left( 0,058 - \frac{0,152}{8} \right) + 10468 \times 0,005$$

$$= 27205,65 \text{ KJ/kg}$$

$$= 11698,43 \text{ Btu/lb bahan bakar}$$

$$LHV = 33915C + 121423 \times \left( H - \frac{O_2}{8} \right) + 10468 \times S - 2512 \left( H_2O + \frac{O_2}{8} \right) \quad (11) \quad (3.5)$$

$$= 33915 \times 0,635 + 121423 \times \left( 0,058 - \frac{0,152}{8} \right) + 10468 \times 0,005 - 2512 \left( 0,09 + \frac{0,152}{8} \right)$$

$$= 26050,054 \text{ KJ/kg}$$

$$= 11201,52 \text{ Btu/lb bahan bakar}$$

#### III.4 Kebutuhan Bahan Bakar

Kebutuhan bahan bakar diperhitungkan berdasarkan dari jumlah kalor yang dipergunakan dengan nilai pembakaran bawah (LHV) yaitu sebagai berikut :

$$Mb = \frac{Mu \times (h_4 - h_2)}{\eta \times (LHV)} \text{ Kg/jam} \quad (12) \dots\dots\dots (3.6)$$

Dengan : Mb = Kebutuhan bahan bakar tiap jam (Kg/jam)

Mu = Jumlah uap yang dihasilkan tiap jam (Kg/jam)

$$= 133,128 \text{ Kg/jam}$$

<sup>10</sup> Ketel Uap, Ir. M. J. Djokosetyardjo, PT. Pradnya Paramita, 1989, hal 41

<sup>11</sup> Ketel Uap, Ir. M. J. Djokosetyardjo, PT. Pradnya Paramita, 1989, hal 41

<sup>12</sup> Combustion Engineering, Otto De Lorenzi, 1959, hal 25 – 6

$h_2$  = Entalpy air panas pada suhu  $194,15^{\circ}\text{C}$  dan tekanan  $1,373\text{ MPa}$   
 (=  $826,18\text{ KJ/kg}$ ) dilihat pada ( tabel 1 )

$h_4$  = Entalpy uap pada suhu  $220^{\circ}\text{C}$  dan tekanan  $1,373\text{ MPa}$   
 (=  $2854,3\text{ KJ/kg}$ ) dilihat pada ( tabel 2 )

LHV = Nilai pembakaran bawah (=  $26050,054\text{ KJ/kg}$ )

$\eta$  = Efisiensi ketel uap (=  $80\%$ ) <sup>(13)</sup>

$$\begin{aligned}\text{Maka : } Mb &= \frac{133,128 \times (2854,3 - 826,18)}{0,80 \times (26050,054)} \\ &= 12,956\text{ Kg/jam} \\ &= 28,563\text{ lb/jam}\end{aligned}$$

### III.5 Kebutuhan Udara Untuk Pembakaran

Untuk membakar bahan bakar didalam dapur ketel diperlukan adanya oksigen yang diambil dari udara. Jumlah udara pembakaran yang diperlukan untuk membakar bahan bakar tersebut secara sempurna dapat dihitung berdasarkan susunan kimia bahan bakar tersebut.

Pada dasarnya bahan bakar terdiri atas unsur – unsur kimia : karbon (C), zat air (H), zat pembakar (O), belerang (S), air dan abu, sedangkan zat yang akan terbakar dan memerlukan udara atau oksigen adalah C, H dan S sedangkan udara tersebut tersusun dari dua unsur utama yaitu nitrogen (N) dan oksigen (O), dalam presentase volume udara tersusun dari  $21\%\text{ O}_2$ ,  $79\%\text{ N}_2$  sedangkan dalam presentase berat tersusun dari  $23,15\%\text{ O}_2$ ,  $77\%\text{ N}_2$ , sehingga secara umum kebutuhan oksigen secara teoritis untuk pembakaran dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

<sup>13</sup> Carl D Shield, Boiler Type Characteristic Function, hal 25

$$WO_{2th} = 2,67 \times C + 7,94 \times H_2 + 0,998 \times S \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

Dimana C, H<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> adalah fraksi berat dari karbon, hidrogen, sulfur dan yang dikandung oleh bahan bakar dengan menggunakan harga komposisi bahan bakar maka dapat dihitung :

$$\begin{aligned} WO_{2th} &= 2,67(0,635) + 7,94(0,058) + 0,998(0,005) \\ &= 2,161 \text{ lb/lb bahan bakar} \end{aligned}$$

Didalam udara terdapat oksigen sebesar 23,15% sehingga kebutuhan udara teoritis untuk pembakaran setiap 1 lb bahan bakar adalah :

$$\begin{aligned} M_{ur} &= \frac{WO_{2th}}{23,15\%} = \frac{2,1610 \text{ lb udara / lb bahan bakar}}{0,2315} \quad \dots\dots\dots (3.8) \\ &= 9,3348 \text{ lb udara/lb bahan bakar} \end{aligned}$$

Untuk menjamin pembakaran bahan bakar dengan sempurna maka perlu digunakan udara tambahan sebesar 40% dari tabel excess air, jadi kebutuhan udara untuk pembakaran adalah :

$$\begin{aligned} M_u &= M_{ur} \times \text{kelebihan udara} \quad \dots\dots\dots (3.9) \\ &= 9,3348 \text{ lb udara/lb bahan bakar} \times 1,4 \\ &= 13,442 \text{ lb udara/lb bahan bakar} \end{aligned}$$

Untuk udara dengan dry bulb temperatur 80 °F dan kelembaban relatif 60% diperoleh wet bulb sebesar 0,0132 lb H<sub>2</sub>O/lb udara kering, sehingga kebutuhan udara kering adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} M_{uk} &= \frac{1}{1 - 0,0132} \times 13,442 \text{ lb/lb bahan bakar} \quad \dots\dots\dots (3.10) \\ &= 13,6218 \text{ lb/lb bahan bakar} \end{aligned}$$

Sehingga kebutuhan udara untuk pembakaran bahan bakar yang digunakan ( $W_u$ ) adalah :

$$\begin{aligned} W_u &= M_b \times M_{uk} \dots\dots\dots (3.11) \\ &= 28,563 \times 13,6218 \\ &= 389,08 \text{ lb/jam} \end{aligned}$$

### III.6 Perhitungan Temperatur Pembakaran

Dari hasil pembakaran maka dapat dihitung massa gas asap yang terbentuk tiap jamnya. Komposisi unsur bahan bakar tiap 1 lb bahan bakar dihitung dengan (tabel komposisi Batubara Bukit Asam) dan menggunakan persamaan sebagai berikut : <sup>(14)</sup>

$$\begin{aligned} CO_2 &= 3,67 \times C \dots\dots\dots (3.12) \\ &= 3,67 \times 0,635 = 2,3306 \text{ lb/lb bahan bakar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_2O &= 8,94 \times H + H_2O \dots\dots\dots (3.13) \\ &= 8,94 \times 0,058 + 0,09 = 0,6085 \text{ lb/lb bahan bakar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SO_2 &= 2 \times S \dots\dots\dots (3.14) \\ &= 2 \times 0,005 = 0,01 \text{ lb/lb bahan bakar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_2 &= 8,86C + 26,41(H - O_2 / 8) + 3,2S + N_2 \dots\dots\dots (3.15) \\ &= 8,86 \times 0,635 + 26,41 (0,058 - 0,152 / 8) + 3,2 \times 0,005 + 1 \\ &= 6,6821 \text{ lb/lb bahan bakar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} O_2 &= 0,15 \times \text{kebutuhan udara teoritis} \dots\dots\dots (3.16) \\ &= 0,15 \times 13,6128 = 2,0433 \text{ lb/lb bahan bakar} \end{aligned}$$

<sup>14</sup> Babcock and Wilcox, Steam/Its Generation and Use, hal 6-7

$$\text{Abu} = 0,05 \text{ lb/lb bahan bakar} \dots\dots\dots (3.17)$$

Maka jumlah keseluruhannya (Mg) adalah : 11,6745 lb/lb bahan bakar

Jika komposisi tersebut dinyatakan dalam lb mol/lb bahan bakar maka :

$$CO_2 = \frac{2,330 \text{ lb/lb bahan bakar}}{44} = 0,05297 \text{ lb mol/lb bahan bakar} \dots (3.18)$$

$$H_2O = \frac{0,6085 \text{ lb/lb bahan bakar}}{18} = 0,03380 \text{ lb mol/lb bahan bakar} \dots (3.19)$$

$$SO_2 = \frac{0,01 \text{ lb/lb bahan bakar}}{64} = 0,00015 \text{ lb mol/lb bahan bakar} \dots (3.20)$$

$$N_2 = \frac{6,6821 \text{ lb/lb bahan bakar}}{28} = 0,23865 \text{ lb mol/lb bahan bakar} \dots (3.21)$$

$$O_2 = \frac{2,0433 \text{ lb/lb bahan bakar}}{32} = 0,0635 \text{ lb mol/lb bahan bakar} \dots (3.22)$$

Maka jumlah keseluruhan komposisi bahan bakar (Cpg) adalah 0,38907 lb mol/lb bahan bakar.

Sehingga untuk pemakaian bahan bakar sebesar (Mb) = 28,563 lb/jam akan dihasilkan gas sebesar :

$$Wg = Mb \times Mg \dots\dots\dots (3.23)$$

$$= 28,563 \times 11,6745$$

$$= 333,458 \text{ lb/jam}$$

Pembakaran berlangsung dengan tekanan konstan, sehingga panas yang timbul dapat dihitung dengan mengalikan volume gas asap dengan harga enthalpy dengan unsur – unsurnya dengan menggunakan rumus :

$$H_{ic} = \text{lb mol } CO_2 \times H(CO_2) + \text{lb mol } H_2O \times H(H_2O) + \text{lb mol } N_2 \times H(N_2)$$

$$+ \text{lb mol } O_2 \times H(O_2) \quad (15) \quad \dots\dots\dots (3.24)$$

Direncanakan temperatur pembakaran bahan bakar  $H_{ts} = 540^\circ\text{R}$  yaitu dengan asumsi keadaan ruang bakar berada pada temperatur  $27^\circ\text{C}$  atau  $80,6^\circ\text{F}$  dengan menggunakan persamaan diatas dengan menggunakan (Tabel : 3. Nilai Enthalpy Gas) :

$$\begin{aligned} H_{tc} &= 0,05297 \text{ lb mol/lb bahan bakar} \times 4055 \text{ Btu/lb mol} + 0,03380 \text{ lb mol/lb} \\ &\quad \text{bahan bakar} \times 4286 \text{ Btu/lb mol} + 0,23865 \text{ lb mol/lb bahan bakar} \\ &\quad \times 3751 \text{ Btu/lb mol} + 0,06385 \text{ lb mol/lb bahan bakar} \times 3746 \text{ Btu/lb mol} \\ &= 1494,025 \text{ Btu/lb bahan bakar} \end{aligned}$$

Temperatur pembakaran ( $T_c$ ) dapat dicari dengan menggunakan metode try and error :

$$H_{tc} - H_{ts} = LHV \text{ atau } H_{tc} - H_{ts} = 11201,52 \text{ Btu/lb bahan bakar}$$

Dicoba dahulu dengan temperatur pembakaran bahan bakar  $T_c = 3000^\circ\text{R}$

$$H_{tc} = CO_2 = 0,05297 \text{ lb mol/lb bahan bakar} \times 34817 \text{ Btu/lb mol} = 1844,256$$

$$H_2O = 0,0338 \text{ lb mol/lb bahan bakar} \times 28287 \text{ Btu/lb mol} = 956,1$$

$$N_2 = 0,23865 \text{ lb mol/lb bahan bakar} \times 22760 \text{ Btu/lb mol} = 5431,674$$

$$O_2 = 0,06385 \text{ lb mol/lb bahan bakar} \times 28818 \text{ Btu/lb mol} = 1840,03$$

---


$$\text{Jumlah} = 10072,06$$

$$H_{3000} - H_{540} = 10072,06 < LHV$$

---

<sup>15</sup> MM.EL – Wakil, Instalasi Pembangkit Daya I, Jakarta, 1992, hal 119



Dicoba lagi dengan temperatur pembakaran ( $T_c$ ) = 3600 °R maka :

$$H_{ic} = CO_2 = 0,05297 \text{ lb mol/lb bahan bakar} \times 43424 \text{ Btu/lb mol} = 2300,17$$

$$H_2O = 0,0338 \text{ lb mol/lb bahan bakar} \times 35311 \text{ Btu/lb mol} = 1193,512$$

$$N_2 = 0,23865 \text{ lb mol/lb bahan bakar} \times 27872 \text{ Btu/lb mol} = 6651,653$$

$$O_2 = 0,06385 \text{ lb mol/lb bahan bakar} \times 29173 \text{ Btu/lb mol} = 1862,7$$

---


$$\text{Jumlah} = 12008,034$$

$$H_{3600} - H_{540} = 12008,034 > \text{LHV}$$

Dengan cara interpolasi, maka dapat dihitung temperatur pembakaran bahan bakar ( $T_c$ ) sebagai berikut :

$$T_c = 3000^\circ R + \left( \frac{3600^\circ R - 3000^\circ R}{12008,034 - 10072,06} \right) \times 11201,52 - 10072,06$$

$$= 3350,042^\circ R$$

$$= 2890,372^\circ F$$

$$= 1587,984^\circ C$$

## **BAB IV**

### **PERPINDAHAN PANAS**

#### **IV.1 Proses Perpindahan Panas**

Dalam dapur ketel terjadi rambatan kalor dari sumber panas hasil pembakaran bahan bakar yang digunakan oleh ketel tersebut pada bidang pemanas secara pancaran dan rambatan. Panas yang dihasilkan karena pembakaran bahan bakar dan udara yang berupa gas asap dan api dipindahkan pada air, uap ataupun udara melalui bidang yang dipanaskan.

Ada tiga cara dalam perpindahan panas pada ketel uap yaitu :

a. Perpindahan panas secara radiasi

Perpindahan panas secara radiasi adalah perpindahan panas antara suatu benda ke benda yang lain melalui gelombang – gelombang elektromagnetik tidak tergantung pada ada atau tidaknya media diantara benda yang menerima pancaran tersebut dengan persamaan :

$$Q = 0,173 \times A \times e \times ((T_2)^4 - (T_1)^4)$$

b. Perpindahan panas secara konveksi

Perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan panas yang dilakukan oleh molekul – molekul suatu fluida (cair ataupun gas). Molekul – molekul suatu fluida tersebut dalam gerakannya melayang – layang kesana kemari membawa sejumlah panas. Bila gerakan dari molekul – molekul yang melayang – layang disebabkan karena

perbedaan temperatur didalam fluida itu sendiri maka perpindahan panasnya disebut perpindahan panas konveksi dengan persamaan :

$$Q = h \times A \times \Delta T$$

c. Perpindahan panas secara rambatan atau konduksi

Perpindahan panas secara konduksi adalah perpindahan panas dari suatu bagian benda padat kebagian lain yang sama, atau dari benda padat yang satu ke benda padat yang lain karena terjadi persinggungan fisik tanpa terjadinya perpindahan molekul – molekul dari benda padat itu sendiri. Didalam dinding ketel panas akan dihantarkan oleh molekul – molekul dinding – dinding sebelah luar yang berbatasan dengan api menuju ke molekul – molekul dinding ketel sebelah dalam yang berbatasan dengan air, uap ataupun udara dengan persamaan :

$$Q = k \times A \times \frac{\Delta T}{\Delta L}$$

#### IV.2 Perhitungan Perpindahan Panas pada Bagian Ruang Bakar

Proses pembakaran bahan bakar pada ketel uap terjadi didalam ruang bakar atau furnace. Pada ruang bakar ini perpindahan panas terjadi dengan cara radiasi, konveksi dan konduksi. Perpindahan panas yang paling dominan adalah perpindahan panas secara radiasi karena permukaan yang dipanasi menerima panas secara langsung dari api yang bersuhu tinggi, dari hasil pembakaran bahan bakar dengan oksigen sehingga besarnya panas yang diterima oleh ruang bakar secara radiasi dapat dihitung menggunakan rumus stefan boltzman yaitu :

$$Q_r = 0,173 \times A \times e \times \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \text{ Btu/jam}^3 \quad (16) \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

Dengan  $Q_r$  = Total panas yang diserap secara radiasi (Btu/jam)

$A$  = Luas efektif nyala api ( $\text{ft}^2$ )

$\sim 0,5 \text{ m} = 1,64 \text{ ft}$  (direncanakan)

$= (S \times S) \times 4$

$S$  = Sisi kotak api

Temperatur gas asap meninggalkan ruang bakar diperkirakan sebesar

$$1300 \text{ } ^\circ\text{R} = 840,33 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Sehingga :  $A = (1,64 \times 1,64) \times 4 = 10,758 \text{ ft}^2$

$T_1$  = Temperatur rata – rata ( $^\circ\text{R}$ )

$$= \left( \frac{T \text{ pembakaran} - T \text{ gas asap meninggalkan ruang}}{2} \right) \dots\dots (4.2)$$

$$= \left( \frac{3350,042 + 1300}{2} \right)$$

$$= 2325,021 \text{ } ^\circ\text{R} = 1865,351 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$e$  = emisifitas bahan yang menerima panas radiasi untuk bahan

$$\text{silinder} = 0,79 \quad (17)$$

$$T_2 = (T_{\text{titik didih air}} + T_p) \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

$T_2$  = temperatur permukaan yang menerima panas radiasi dalam  $^\circ\text{R}$  <sup>(18)</sup>

$T_p$  = Beda suhu permukaan dan titik didih air  $< 50 \text{ } ^\circ\text{F}$ ).

Dengan demikian harga  $T_p = 49 \text{ } ^\circ\text{F}$  dapat diterima.

<sup>16</sup> Carl D Shield, Boiler Type Characteristic Function, hal 162

<sup>17</sup> Carl D Shield, Boiler Type Characteristic Function, hal 162

<sup>18</sup> Carl D Shield, Boiler Type Characteristic Function, hal 165

Jadi harga  $T_2 = 381,47 + 49$

$$= 430,47 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Maka besarnya panas radiasi yang diterima pipa – pipa radiasi adalah :

$$\begin{aligned} Q_r &= 0,173 \times 10,758 \times 0,79 \times \left[ \left( \frac{1865,351}{100} \right)^4 - \left( \frac{430,47}{100} \right)^4 \right] \\ &= 177512,796 \text{ Btu/jam} \\ &= 187283,1 \text{ KJ/jam} \end{aligned}$$

#### IV.3 Perhitungan Temperatur Gas Asap Meninggalkan Ruang Bakar

Temperatur gas asap yang meninggalkan ruang bakar diperkirakan sebesar  $1300 \text{ } ^\circ\text{R}$ , maka dengan menentukan temperatur gas asap meninggalkan ruang bakar, maka harga tersebut dapat diperiksa dengan rumus sebagai berikut :

$$Q_r = Mb(LHV - \eta - (W_g \times C_{pg} \times T_g)) \text{ KJ/jam}^{(19)} \dots\dots\dots (4.4)$$

Dengan :

$$Q_r = \text{Panas yang diserap secara radiasi} = 187283,1 \text{ KJ/jam}$$

$$Mb = \text{Kebutuhan bahan bakar tiap jam} = 28,563 \text{ lb/jam}$$

$$\begin{aligned} LHV &= \text{Nilai pembakaran bawah} = 26050,054 \text{ KJ/Kg} \\ &= 11818,054 \text{ KJ/lb m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_g &= \text{Berat gas asap yang dihasilkan per lb bahan bakar} \\ &= 333,458 \text{ lb/jam} \end{aligned}$$

$$C_{pg} = \text{Panas jenis gas asap} = 0,389 \text{ Btu/lb m}$$

<sup>19</sup> Ir. Syamsir A Muin, Pesawat – pesawat Konversi Energi I (Ketel Uap), Rajawali, hal 48

Dengan menggunakan monogram panas jenis gas panas pada tekanan 1 MPa dan temperatur 1300 °R dan dengan komposisi gas asap, maka :

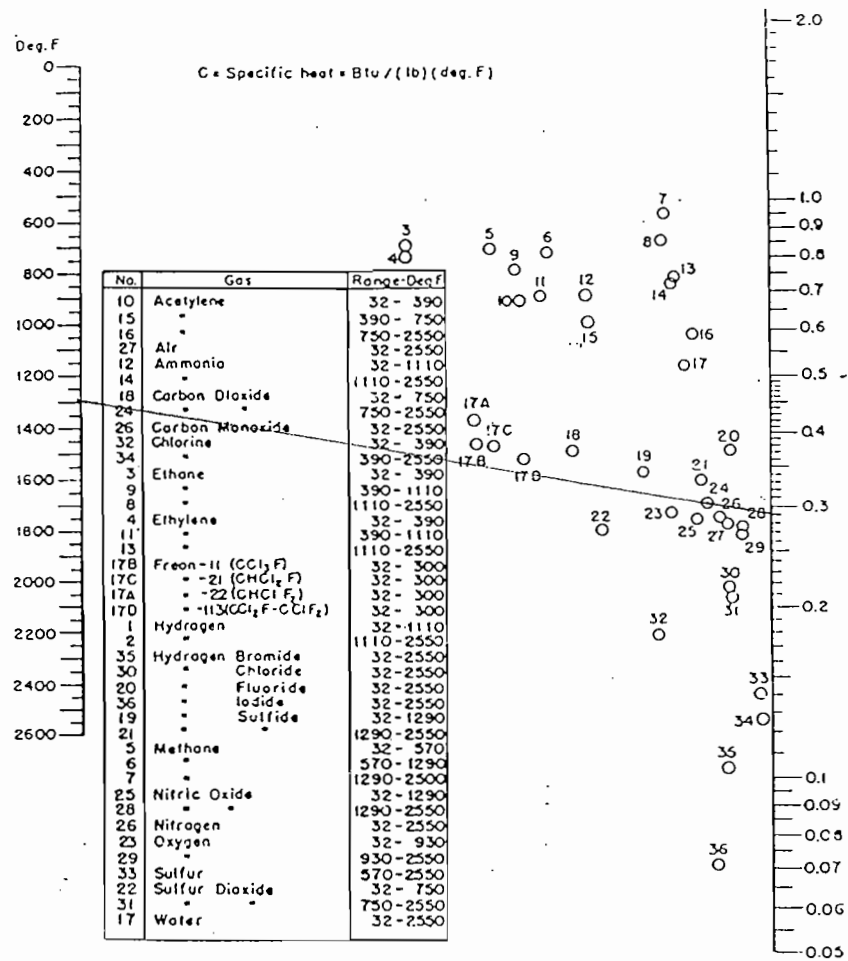


FIG. 3. Specific heats of gases at 1 atm. (Perry, "Chemical Engineers' Handbook," 3d ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950.)

Gambar IV.1 Monogram panas jenis

(Sumber : Jhon H. Perry, Chemical Engineer and Function, Mc. Grawhill New York, hal 128)

$$C_p = \frac{\text{massa komposisi gas asap}}{\text{jumlah berat komposisi gas asap}} \times \text{panas jenis} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

Sehingga diperoleh :

$$C_p \text{ CO}_2 = \frac{2,3306}{11,6745} \times 0,29 = 0,0579$$

$$C_p \text{ H}_2\text{O} = \frac{0,6085}{11,6745} \times 0,49 = 0,0255$$

$$C_p \text{ SO}_2 = \frac{0,01}{11,6745} \times 0,2 = 0,000171$$

$$C_p \text{ N}_2 = \frac{6,6821}{11,6745} \times 0,28 = 0,1602$$

$$C_p \text{ O}_2 = \frac{2,0433}{11,6745} \times 0,26 = 0,0455$$

Jumlah keseluruhan adalah 0,2893 Btu/lb °F

Dengan memasukkan harga – harga diatas, diperoleh :

$$Q_r = Mb(LHV - \eta - (W_g \times C_{pg} \times T_g)) \text{ Btu/jam}$$

$$187283,1 = 28,563 (11818,054 - 0,8 - (333,458 \times 0,389 \times T_g))$$

$$T_g = 1411,65 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$= 766,472 \text{ } ^\circ\text{C}$$

#### IV.4 Perancangan Pipa Api

Pada generator uap panas yang diterima oleh air selain dihantarkan oleh dinding silinder juga akan dihantarkan oleh pipa – pipa api melalui dinding – dindingnya. Pembakaran bahan bakar dan oksigen yang terjadi pada ruang bakar yang menghasilkan panas tidak seluruhnya akan diterima oleh air yang kemudian akan diubah menjadi uap khususnya uap jenuh, hal

ini terjadi karena adanya kerugian yang disebabkan karena panas terbangun melalui cerobong asap. Hal ini disebabkan karena adanya perbedaan temperatur udara luar dengan temperatur bagian dalam ketel, sehingga menimbulkan kerugian panas yang mengalir melalui dinding ketel dan isolasi ketel keudara luar.

Pada generator uap ini diperkirakan akan mengalami kerugian panas sebesar 0,8 % dari seluruh panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar pada ruang bakar sehingga dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$\begin{aligned} Q_F &= \eta \times LHV \times Mb & \dots\dots\dots (4.6) \\ &= 0,8 \times 11818,054 \times 28,563 \\ &= 270047,261 \text{ lb/jam} \end{aligned}$$

Dengan :  $Q_F$  = kerugian panas melalui dinding ketel (lb/jam)

$M_b$  = kebutuhan bahan bakar (lb/jam)

LHV = nilai pembakaran bawah (lb/jam)

Sehingga :

$$\begin{aligned} Q_{total} &= Q_f + Q & \dots\dots\dots (4.7) \\ &= 270047,261 + 324424,946 \\ &= 594472,207 \text{ lb/jam} \end{aligned}$$

panas yang diterima oleh air melalui dinding pipa api

$$\begin{aligned} Q_{Pa} &= Q_t - Q_r & \dots\dots\dots (4.8) \\ &= 594472,207 - 187283,1 \\ &= 407189,107 \text{ lb/jam} \end{aligned}$$





Dalam perancangan ini pipa – pipa yang digunakan pipa dengan ukuran 1 inch (dari Tabel : 4. Dimensi Ukuran Pipa Baja) dengan :

Diameter dalam (ID) = 1,049 inchi

Diameter luar (OD) = 1,315 inchi

Panjang pipa (L) = 6,56 ft = 2 m (direncanakan)

#### IV.5.1 Perpindahan Panas pada Pipa – pipa Api

Perpindahan panas dari asap ke api melalui bidang pemanas dinding – dinding pipa – pipa api dimana pipa – pipa api menerima panas dari gas asap yang mengalir didalamnya secara konveksi selanjutnya panas tersebut dirambatkan dari permukaan dinding yang bersuhu lebih rendah yaitu permukaan bagian luar pipa yang berbatasan dengan air secara konduksi kemudian panas dari permukaan dinding bagian luar tersebut dipindahkan ke air secara konveksi.

Laju perpindahan panas yang terjadi dari gas asap ke air berdasarkan rumus keseimbangan panas yaitu :

$$Q = U \times A \times \Delta t_m \quad (20) \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

Dengan : Q = Laju perpindahan panas (Btu/jam)

U = Konduktansi panas gabungan (Btu/ft<sup>2</sup> jam °F)

A = Luas total bidang pemanas

$\Delta t_m$  = Beda suhu antara sumber dan penerima sumber

Jika luas bidang pemanas (luas bidang permukaan tiap pipa ) adalah :

$$A_0 = \pi \times OD \times L \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

<sup>20</sup> Babcock and Wilcox, Steam/Its Generation and Use, hal 11-22

$$= 3,14 \times \frac{1,315}{12} \times 6,561 = 2,257 \text{ ft}^2$$

Luas bidang pemanas untuk n jumlah pipa :

$$A = n \times A_0 \quad \dots\dots\dots (4.11)$$

Jumlah pipa yang direncanakan adalah 28 buah maka :

$$A_0 = 28 \times 2,257 = 63,213 \text{ ft}^2$$

Untuk menghitung konduktansi film gas :

$$Ap_1 = \frac{\pi}{4} \times ID^2 \quad \dots\dots\dots (4.12)$$

$$= \frac{3,14}{4} \times \left( \frac{1,049}{12} \right)^2 = 0,005998 \text{ ft}^2$$

Luas penampang dalam, untuk 28 buah pipa adalah :

$$Ap_n = n \times Ap_1 \quad \dots\dots\dots (4.13)$$

$$= 28 \times 0,005998$$

$$= 0,168 \text{ ft}^2$$

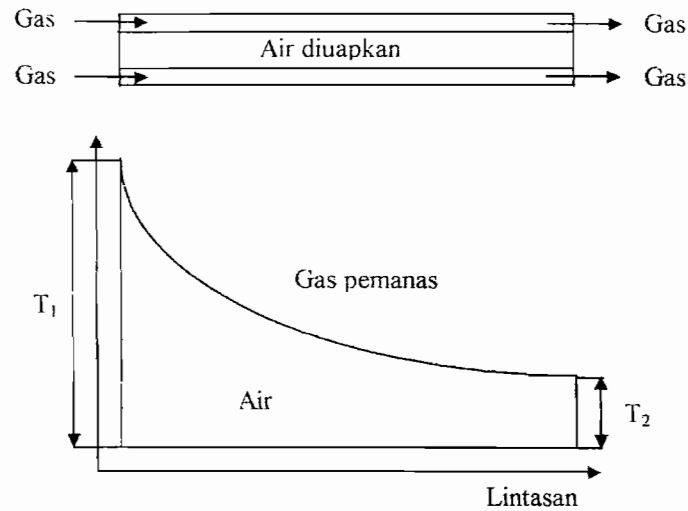
Sehingga untuk menghitung massa gas velocitynya adalah dengan menggunakan rumus :

$$W_g = \frac{W_u}{Ap_n} \quad \dots\dots\dots (4.14)$$

$$= \frac{389,08}{0,168}$$

$$= 2315,952 \text{ lb/jam ft}^2$$

Karena suhu kedua fluida berubah dari inlet ke outlet maka  $\Delta t_m$  dihitung sebagai log mean difference :



Gambar IV.2 : Proses Perpindahan Suhu.

$$\Delta tm = \frac{Tg_1 - Tg_2}{\log C \frac{Tg_1}{Tg_2}} \dots\dots\dots (4.15)$$

Dengan :  $Tg_1$  = Temperatur gas meninggalkan ruang bakar

$$= 1300^{\circ}R = 840,33^{\circ}F$$

$Tg_2$  = Temperatur gas meninggalkan pipa – pipa api

$$= 500^{\circ}F \text{ (direncanakan)}$$

Sehingga :

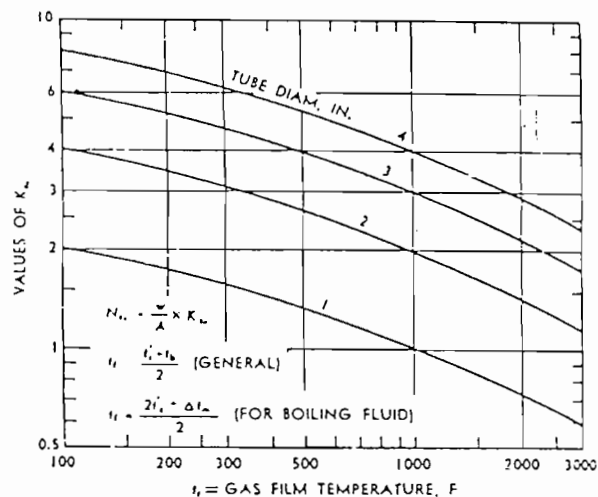
$$\begin{aligned} \Delta tm &= \frac{840,33 - 500}{\log e \frac{840,33}{500}} \\ &= 466,205^{\circ}F \end{aligned}$$

Temperatur gas asap :

$$\begin{aligned}
 T_f &= T \text{ titik didih air} + \frac{\Delta t_m}{2} \quad \dots\dots\dots (4.16) \\
 &= 381,47 + \frac{466,205}{2} \\
 &= 614,572 ^\circ\text{F}
 \end{aligned}$$

Untuk film gas dengan temperatur  $614,572 ^\circ\text{F}$  dan diameter luar pipa (OD) = 1,315 inchi dengan menggunakan (gambar IV.3) dapat diperoleh harga  $K_{re} = 1,4$  . jadi bilangan Reynoldnya adalah :

$$\begin{aligned}
 Re &= K_{re} \times Wg \quad ^{(21)} \quad \dots\dots\dots (4.17) \\
 &= 1,4 \times 333,458 \\
 &= 466,842
 \end{aligned}$$



Gambar IV.3 : Diagram faktor bilangan Reynold untuk temperatur film gas pada berbagai diameter pipa.

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam/Its Generation and Use, hal 11 – 28)

<sup>21</sup> Babcock and Wilcox, Steam/Its Generation and Use, hal 11 – 28

Sehingga dapat diketahui bahwa aliran gas asap dalam susunan pipa – pipa dididih konveksi adalah turbulen disisi luar pipa, sehingga untuk konduktansi panas konveksi film gas dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$U_{cg} = U_{cc} \times F_{pp} \times F_t \quad (22) \quad \dots\dots\dots (4.18)$$

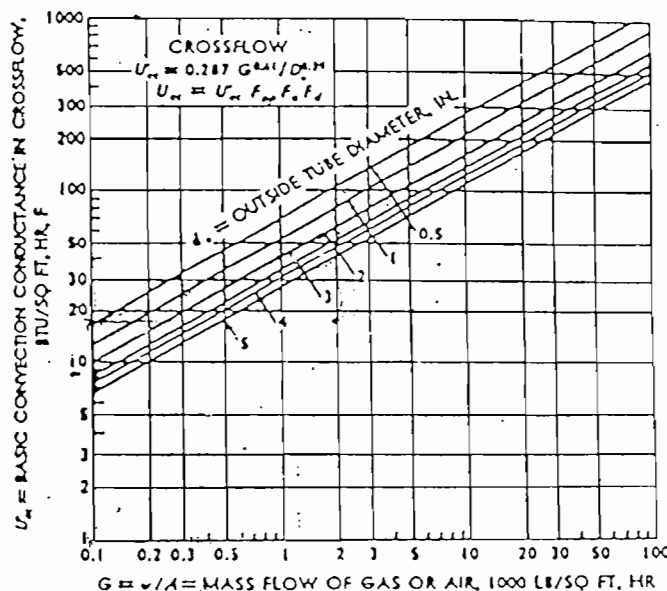
Dengan :  $U_{cg}$  = Konduktansi panas konveksi film gas asap (Btu/ft<sup>2</sup> jam °F)

$U_{cc}$  = Dasar penghantar aliran konveksi memanjang (Btu/ft<sup>2</sup> jam °F)

$F_{pp}$  = Faktor sifat – sifat fisik, efek dari film gas

$F_t$  = Faktor temperatur

Berdasarkan (gambar IV.4) untuk gas massa flow  $W_g = 333,458$  lb/jam ft<sup>2</sup> dan diameter dalam pipa = 1,049 inchi, maka besarnya konduktansi dasar ( $U_{cl}$ ) adalah = 26 Btu/ft<sup>2</sup> jam °F



Gambar IV.4 Diagram konduktansi panas konveksi panas dasar aliran melintang untuk laju aliran massa gas pada berbagai diameter pipa.

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam/Its Generation and Use, hal 11 – 29)

<sup>22</sup> Babcock and Wilcox, Steam/Its Generation and Use, hal 11 – 29

sedangkan sifat – sifat fisis efek dari film temperatur, untuk  $(t_f) = 614,572$

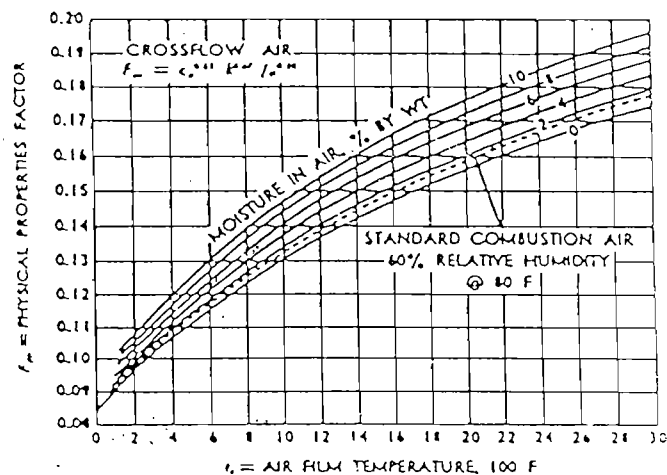
$^{\circ}\text{F}$  dan 4,35 % berat  $\text{H}_2\text{O}$  didalam gas asap menggunakan (gambar IV.5)

maka akan diperoleh faktor sifat fisik, efek film gas  $(F_{pp}) = 0,123$

Sehingga untuk temperatur film  $(t_f) = 614,572$   $^{\circ}\text{F}$  dengan menggunakan

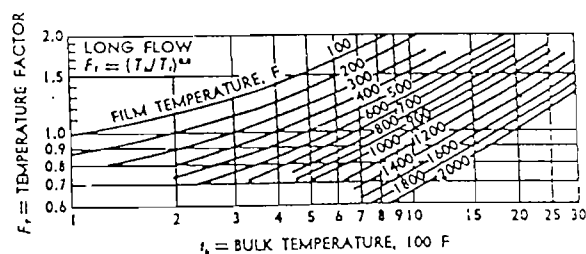
temperatur borongan (bulk temperatur) gas  $= \frac{840,33 + 500}{2} = 670,165$   $^{\circ}\text{F}$

Dapat dicari harga faktor temperatur  $(f_t) = 1,05$



Gambar IV.5 Diagram pengaruh temperatur gas film  $(t_f)$  pada faktor sifat fisik untuk arah aliran gas melintang.

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam/Its Generation and Use, hal 11 – 31)



Gambar 4.6 Diagram faktor temperatur karena perubahan massa velocity dari keseluruhan lapisan film dasar untuk aliran memanjang dari udara gas atau uap.

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam/Its Generation and Use, hal 11 – 31)

Dari harga – harga yang didapat, maka dapat dihitung konduktansi panas film gas yaitu :

$$U_{cg} = 26 \times 0,123 \times 1,05$$

$$= 3,358 \text{ Btu/ft jam } ^\circ\text{F}$$

Perhitungan konduktansi panas film air dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$H_p = h_a \left( \frac{P}{P_a} \right)^{0,4} \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^\circ\text{F} \quad \dots\dots\dots (4.19)$$

Dengan :

$H_p$  = Konduktansi panas film air pada tekanan kerja (Btu/ft<sup>2</sup> jam °F)

$H_a$  = Konduktansi panas konveksi film air pada tekanan atmosfer  
(Btu/ft<sup>2</sup> jam °F)

$P$  = Tekanan kerja dalam ketel (= 1,373 MPa = 199,14 psia)

$P_a$  = tekanan atmosfer (= 14,7 psia)

$$\text{Apabila } \frac{Q}{A} = \frac{324424,946}{63,213}$$

$$= 5132,25$$

Jika syarat (Tabel : 5. harga  $\frac{Q}{A}$ ) adalah :  $5000 < \frac{Q}{A} < 75000$

Maka  $\frac{Q}{A}$  memenuhi syarat.

Dengan :  $\Delta T = T_{\text{surface}} - T_{\text{saturated}} \quad \dots\dots\dots (4.20)$

$$= 12 ^\circ\text{F (direncanakan)}$$

$$\text{Sehingga } h_a = 0,168 \times (\Delta T)^3 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^\circ\text{F} \quad \dots\dots\dots (4.21)$$

$$= 0,168 \times (12)^3$$

$$= 290,3 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^\circ\text{F}$$

Setelah didapat harga  $h_a$  kemudian harga – harga tersebut dimasukkan kedalam rumus diatas yaitu :

$$H_p = U_a = 290,3 \times \left( \frac{199,14}{14,7} \right)^{0,4} \quad \dots\dots\dots (4.22)$$

$$= 823,348 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^\circ\text{F}$$

$$T \text{ saturated rencana} = 381,47 ^\circ\text{F}$$

$$Q_{pa} = U_a \times A \times (T \text{ surface} - T \text{ saturated}) \quad \dots\dots\dots (4.23)$$

$$324424,946 = 823,348 \times 63,213 \times (T \text{ surface} - 381,47)$$

$$T \text{ surface} = 387,7 ^\circ\text{F}$$

$$\text{Pemeriksaan } T \text{ surface} = \left( \frac{387,7 - 381,47}{387,7} \right) \times 100\% = 1,61\%$$

Konduktifitas dari bahan pipa (K) diambil dari (Tabel . 6. Konduktifitas Panas Bahan Logam dan Paduan) sebesar 108 Btu/ft<sup>2</sup> jam °F, sehingga dengan memasukkan harga – harga yang telah didapat, maka dapat dicari harga U, yaitu sebagai berikut :

$$U = \frac{1}{\left[ \frac{1}{U_{eg} \frac{OD}{ID}} \right] + \left[ \frac{0,5 \times OD \times \text{Loge} \frac{OD}{ID}}{K} \right] + \left[ \frac{1}{H_p} \right]} \quad \dots\dots\dots (4.24)$$



$$= \frac{1}{\left[ \frac{1}{3,358 \frac{1,315}{1,049}} \right] + \left[ \frac{0,5 \times 1,315 \times \log e \frac{1,315}{1,049}}{108} \right] + \left[ \frac{1}{823,348} \right]}$$

$$= 4,13 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^\circ\text{F}$$

Jadi laju perpindahan panas pada pipa – pipa api adalah :

$$Q = U \times A \times \Delta tm \quad \dots\dots\dots (4.25)$$

$$= 4,13 \times 63,213 \times 466,205$$

$$= 121711,995 \text{ Btu/jam}$$

$$= 128411,023 \text{ KJ/jam}$$

#### IV.6 Perhitungan Perpindahan Panas pada Komponen Pemanas Uap Lanjut (Superheater)

Pemanas Uap Lanjut atau Superheater adalah alat untuk memanaskan uap kenyang atau uap jenuh menjadi uap panas lanjut. Uap yang dipanaskan lanjut, bila digunakan untuk melakukan kerja dengan jalan ekspansi didalam turbin atau mesin uap tidak akan mengembun, sehingga mengurangi kemungkinan timbulnya bahaya yang disebabkan terjadinya pukulan balik Back Stroke yang diakibatkan mengembunnya uap belum pada waktunya sehingga menimbulkan vakum ditempat yang tidak semestinya didaerah ekspansi.

Perhitungan panas pada superheater terjadi secara konveksi dan konduksi pada tahap pertama pipa superheater dipanaskan oleh gas asap yang mengalir secara konveksi sehingga dapat dihitung dengan menggunakan rumus dan menggunakan (Tabel 4 Dimensi Pipa – pipa Baja):

Direncanakan ukuran dan jumlah superheater :

$d_o$  = Diameter luar pipa = 1,050 inchi

$d_i$  = Diameter dalam pipa = 0,824 inchi

$L$  = Panjang pipa superheater = 5 ft = 60 inchi

$ST$  = Jarak antar pipa = 4 inchi

$N_w$  = Jumlah pipa yang melebar (tubes/row) = 12

Perhitungan temperatur gas asap keluar superheater :

$$T_2 = T_1 - \left( \frac{Q_{sh}}{M_g \times C_p} \right) \quad (23) \quad \dots\dots\dots (4.26)$$

Dengan :

$T_1$  = Temperatur gas asap masuk superheater =  $260^\circ\text{C} = 500^\circ\text{F}$

$T_2$  = Temperatur gas asap keluar superheater

$Q_{sh}$  = Laju perpindahan kalor = 8645,864 KJ/jam  
= 8194,81 Btu/jam

$M_g$  = Laju aliran massa gas = 389,08 lb/jam

$C_p$  = Kalor spesifik gas rata – rata  $500^\circ\text{F} = 0,389 \text{ Btu/lb }^\circ\text{F}$

Penurunan temperature gas asap sebesar :

$$\begin{aligned} T_{drop} &= \frac{Q_{sl}}{(M_g \times C_p)} \quad \dots\dots\dots (4.27) \\ &= \frac{8194,81}{(389,08 \times 0,389)} \\ &= 54,144^\circ\text{F} = 12,3^\circ\text{C} \end{aligned}$$

<sup>23</sup> Babcock and Wilcox, Steam/Its Generation and Use, hal 14 – 7

Jadi temperatur gas asap meninggalkan superheater :

$$\begin{aligned} T_2 &= T_1 - T_{\text{drop}} & \dots\dots\dots (4.28) \\ &= 260 - 12,3 \\ &= 247,7^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

**Perhitungan temperatur film gas :**

$$T_f = \frac{T_{\text{gas}} + T_{\text{r uap}}}{2} \quad (24) \quad \dots\dots\dots (4.29)$$

Dengan :

$T_{\text{r gas}}$  = Temperatur rata – rata gas asap

$T_{\text{r uap}}$  = Temperatur rata – rata uap

$T_f$  = Temperatur film gas

$T_s$  = Temperatur uap jenuh

$T_{\text{sh}}$  = Temperatur uap panas lanjut

Temperatur rata – rata gas asap :

$$\begin{aligned} T_{\text{r gas}} &= \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (25) & \dots\dots\dots (4.30) \\ &= \frac{260 + 247,7}{2} \\ &= 253,85^{\circ}\text{C} = 488,93^{\circ}\text{F} \end{aligned}$$

Temperatur rata – rata uap :

$$T_{\text{r uap}} = \frac{T_s + T_{\text{sh}}}{2} \quad (26) \quad \dots\dots\dots (4.31)$$

<sup>24</sup> Waste Heat Boiler Desbook, V. Ganapathy, hal 180

<sup>25</sup> Waste Heat Boiler Desbook, V. Ganapathy, hal 180

$$= \frac{194,15 + 220}{2}$$

$$= 207,075 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sehingga temperatur film gas (persamaan 4.26) :

$$T_f = \frac{253,85 + 207,075}{2}$$

$$= 230,462 \text{ } ^\circ\text{C} = 446,832 \text{ } ^\circ\text{F}$$

**Perhitungan fluks massa gas (G) :**

$$G = \frac{M_g}{A_g} \dots\dots\dots (4.32)$$

$$G = \frac{M_g \times 12}{(N_w \times L)(ST - d_0)}$$

Dengan :

G = Fluks massa gas (lb/jam ft<sup>2</sup>)

M<sub>g</sub> = Aliran massa gas asap = 389,08 lb/jam

N<sub>w</sub> = jumlah pipa yang melebar (Tubes/row)

L = Panjang pipa uap (inch)

d<sub>0</sub> = Diameter luar pipa (inch)

Besarnya fluks massa gas asap adalah :

$$G = \frac{389,08 \times 12}{(12 \times 5)(4 - 1,050)}$$

$$= 26,378 \text{ lb/jam ft}^2$$

<sup>26</sup> Waste Heat Boiler Desbook, V. Ganapathy, hal 180

**Perhitungan koefisien perpindahan kalor konveksi ( $h_c$ ) :**

Pada kondisi  $T_f = 446,832$  °F, maka harga – harga dibawah ini diperoleh dari (Tabel : 7. Sifat Fisis Gas Propertis ) yaitu ;

$$C_p = 0,2665 \quad \mu = 0,06076 \quad k = 0,022$$

Diketahui dan menggunakan (Tabel : 8. Grimson's Value of B and N) :

$$ST/d = 3 \quad \text{maka } B = 0,286 \quad N = 0,608$$

$$G = 26,378 \text{ lb/h ft}^2$$

Angka Reynold :

$$\begin{aligned} Re &= \frac{G \times d_o}{12 \times \mu} & \dots\dots\dots (4.33) \\ &= \frac{26,378 \times 1,050}{12 \times 0,06076} \\ &= 37,986 \end{aligned}$$

Angka Nusselt :

$$\begin{aligned} Nu &= B \times Re^N & \dots\dots\dots (4.34) \\ &= 0,286 \times 37,986^{0,608} \\ &= 2,61 \end{aligned}$$

Koefisien perpindahan kalor konveksi :

$$\begin{aligned} h_c &= \frac{12 \times Nu \times k}{d_o} & \dots\dots\dots (4.35) \\ &= \frac{12 \times 2,61 \times 0,022}{1,050} \\ &= 0,656 \text{ Btu/ft}^2 \text{ h } ^\circ\text{K} \end{aligned}$$

**Perhitungan koefisien perpindahan panas pada pipa superheater (hi) :**

$$h_i = \frac{2,44 \times W^{0,8} \times C_p}{d_i^{1,8}} \quad (27) \quad \dots\dots\dots (4.36)$$

Dengan :

hi = Koefisien perpindahan panas pipa superheater (Btu/ft<sup>2</sup> h<sup>0</sup> F)

W = Besarnya aliran uap setiap aliran

M<sub>s</sub> = Kapasitas aliran uap total = 133,128 Kg/jam  
 = 293,5 lb/jam

S = jumlah aliran uap

C<sub>p</sub> = Kalor spesifik rata – rata gas

T<sub>r gas</sub> = 488,93<sup>0</sup>F dengan harga C<sub>p</sub> = 0,389 Btu/lb<sup>0</sup>F

Dengan jumlah aliran uap = 6 aliran, besarnya aliran (W) adalah :

$$\begin{aligned} W &= \frac{M_s}{s} \quad \dots\dots\dots (4.37) \\ &= \frac{293,5}{6} \\ &= 48,916 \text{ lb/jam} \end{aligned}$$

Sehingga koefisien perpindahan panas (persamaan 4.36) :

$$\begin{aligned} &= \frac{2,44 \times 48,916^{0,8} \times 0,389}{0,824^{1,8}} \\ &= 30,216 \text{ Btu/ft}^2 \text{ h}^0 \text{ F} \end{aligned}$$

<sup>27</sup> Waste Heat Boiler Desbook, V. Ganapathy, hal 139

**Perhitungan koefisien perpindahan panas non – luminous ( $h_n$ ) :**

Diketahui :

$$\sigma = \text{Konstanta Stefan – Boltzman} = 1,712 \times 10^{-9} \text{ Btu/h ft}^2 \text{ R}^{(28)}$$

$L_e$  = Panjang pipa radiasi rata – rata

$ST = SL$  = Jarak antar pipa = 4 inchi

$$L_e = \frac{1,08 \times (ST \times SL - 0,785 \times d_o^2)}{d_o \times 0,0254} \quad (29) \quad \dots\dots\dots (4.38)$$

$$= \frac{1,08 \times (4 \times 4 - 0,785 \times 1,050^2)}{1,050 \times 0,0254}$$

$$= 0,152 \text{ ft}$$

$F$  = Faktor efektifitas gas asap = 0,9

$K$  = Faktor bahan bakar = 0,886

$\varepsilon_g$  = Emisifitas gas

$$\varepsilon_g = 0,9 \times (1 - e^{-K \cdot L_e}) \quad \dots\dots\dots (4.39)$$

$$= 0,9 \times (1 - e^{-0,886 \times 0,152})$$

$$= 0,1134$$

$K_m$  = Untuk bahan pipa yang terbuat dari baja karbon = 25

$f f_o$  = Faktor pengotor = 0,001

$$h_n = \frac{\sigma \times F \times \varepsilon_g \times \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{sh}}{100} \right)^4}{(T_1 - T_{sh})} \quad (30) \quad \dots\dots\dots (4.40)$$

<sup>28</sup> Waste Heat Boiler Desbook, V. Ganapathy, hal 141

<sup>29</sup> Waste Heat Boiler Desbook, V. Ganapathy, hal 147

<sup>30</sup> Waste Heat Boiler Desbook, V. Ganapathy, hal 180

$$= \frac{0,1712 \times 0,9 \times 0,1134 \times \left( \frac{500 + 460}{100} \right)^4 - \left( \frac{220 + 460}{100} \right)^4}{(500 + 460) - (220 + 460)}$$

$$= 0,3966 \text{ Btu/ft}^2 \text{ h } ^\circ\text{F}$$

Koefisien perpindahan panas menyeluruh :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{(h_c + h_n)} + \left( \frac{1}{h_i} \times \frac{d_o}{d_i} \right) + ffo + \left( ffo \times \frac{d_o}{d_i} \right) + \left( \frac{d_o}{24 \times k_m} \right) + \ln \left( \frac{d_o}{d_i} \right) \quad (31) \dots (4.41)$$

$$= \frac{1}{(0,656 + 0,3966)} + \left( \frac{1}{30,216} \times \frac{1,050}{0,824} \right) + 0,001 + \left( 0,001 \times \frac{1,050}{0,824} \right) + \left( \frac{1,050}{24 \times 25} \right) + \ln \left( \frac{1,050}{0,824} \right)$$

$$U = \frac{1}{1,1587}$$

$$= 0,863$$

**Logmen temperatur difference (LTMD) :**

$$LTMD = \frac{(T_1 - T_{sh}) - (T_2 - T_s)}{\ln \frac{T_1 - T_{sh}}{T_2 - T_s}} \quad (32) \dots \dots \dots (4.42)$$

Dengan :

$T_1$  = Temperatur gas masuk superheater =  $260^\circ\text{C}$

$T_2$  = Temperatur gas keluar superheater =  $247,7^\circ\text{C}$

$T_s$  = Temperatur uap jenuh =  $194,15^\circ\text{C}$

$T_{sh}$  = Temperatur uap keluar superheater =  $220^\circ\text{C}$

$$LTMD = \frac{(260 - 220) - (247,7 - 194,15)}{\ln \frac{260 - 220}{247,7 - 194,15}}$$

$$= 46,446^\circ\text{C} = 115,603^\circ\text{F}$$

<sup>31</sup> Waste Heat Boiler Desbook, V. Ganapathy, hal 135

<sup>32</sup> Babcock and Wilcox, Steam/Its Generation and Use, hal 14-6



**Perhitungan laju perpindahan kalor pada superheater ( $Q_{sh}$ ) :**

Luas permukaan total :

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{Q_s}{U \times LMTD} \quad (33) \dots\dots\dots (4.43) \\
 &= \frac{8194,81}{0,863 \times 115,603} \\
 &= 82,14 \text{ ft}^2
 \end{aligned}$$

Jumlah pipa – pipa pada superheater :

$$\begin{aligned}
 NH &= \frac{A}{\pi \times \frac{d_o}{12} \times N_w \times L} \dots\dots\dots (4.44) \\
 &= \frac{82,14}{3,14 \times \frac{1,050}{12} \times 12 \times 5} \\
 &= 4,98 \approx 5 \text{ tubes/row}
 \end{aligned}$$

Jadi laju perpindahan kalor pada superheater :

$$\begin{aligned}
 Q_{sh} &= U \times A \times LMTD \dots\dots\dots (4.45) \\
 &= 0,807 \times 87,775 \times 115,603 \\
 &= 8194,81 \text{ Btu/jam} \\
 &= 8645,852 \text{ KJ/jam}
 \end{aligned}$$

Pemeriksaan laju perpindahan kalor pada pipa – pipa superheater :

$$\frac{8645,852 - 8645,864}{8645,852} \times 100\% = 0,000138\%$$

<sup>33</sup> Babcock and Wilcox, Steam/Its Generation and Use, hal 14-6

Dari hasil perhitungan pipa superheater, uap yang dihasilkan bersuhu  $220^{\circ}\text{C}$  maka dihasilkan  $Q_{sh} = 8194,81$  Btu/jam sedangkan laju perpindahan kalor yang dibutuhkan pipa superheater untuk jumlah pipa 1 tubes/row dengan ukuran pipa  $d_o = 1,050$  inch dan  $d_i = 0,824$  inch adalah 8645,852 KJ/jam.

## **BAB V**

### **PERANCANGAN SILINDER KETEL**

Agar pengoperasian generator uap dapat berjalan lancar dan baik dalam arti cukup aman maka harus didukung oleh bagian – bagian dari generator uap yang cukup baik dan mampu untuk beroperasi, sehingga untuk meyakinkan hal – hal tersebut diatas maka akan diperhitungkan kekuatan dari generator uap itu sendiri dengan demikian generator uap dapat dijamin dalam hal kekuatannya sehingga cukup aman dalam pengoperasiannya.

#### **V.1 Perhitungan silinder ketel pada ruang bakar**

Pada perancangan generator uap jenis lokomotif ini silinder ketel berfungsi untuk memisahkan antara uap dan air. Pada generator uap ini yang digunakan direncanakan menggunakan bahan dari jenis baja karbon SA 515 65 (Tabel : 9. Material untuk Silinder Ketel) dimana bahan ini mempunyai kekuatan tarik yang diizinkan sebesar 16250 pada temperatur 650<sup>0</sup>F bahan ini mengandung 0,3 % Carbon (C), 0,3 % Silicon (Si), Mangan (Mn) dan Phospor (P) serta mengandung Sulfur (S) sehingga menyebabkan bahan tersebut mempunyai sifat yang tahan terhadap korosi dan tahan pada suhu dan tekanan yang cukup tinggi.

Untuk menghitung diameter dari ketel maka dapat digunakan rumus sebagai berikut :

$$D = 2 \times d \text{ (ft)} \quad (34) \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

Dengan : D = diameter silinder ketel pada ruang bakar

d = diameter rata – rata ruang bakar = 1,64 ft

Sehingga :  $D = 2 \times 1,64$

$$= 3,281 \text{ ft}$$

$$= 39,372 \text{ inchi}$$

Tebal minimum silinder ketel dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$tm = \frac{P \times r}{\sigma \times E - (1 - y) \times P} + C \quad (35) \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

Dengan : tm = Tebal minimum dinding ketel (inch)

P = Tekanan kerja ketel = 1,373 Mpa = 199,14 Psia

r = Jari – jari silinder ketel bagian dalam = 19,686 inchi

$\sigma$  = tekanan kerja pada bahan yang diijinkan pada temperatur 650 °F

E = Effisiensi sambungan pada arah memanjang

Y = Koefisien friksi temperatur

C = Nilai minimum yang diijinkan karena stabilitas dan pengerjaan  
bahan adalah 0,065 karena diameter pipa lebih dari 1 inch

Sehingga :

$$tm = \frac{199,14 \times 19,686}{16250 \times 0,9 - (1 - 0,7) \times 199,14} + 0,065$$

$$= 0,334 \text{ inchi}$$

<sup>34</sup> Pesawat – pesawat Konversi Energi, Ir. Syamsir A. Muin, 1988, hal 334

<sup>35</sup> Steam-Plant operation, Evert B. Woodruff, Hebert B. Lammers, New York, 1977, hal 70

karena nilai tersebut adalah nilai minimal maka untuk menjamin kekuatan dan keamanan diambil tebal dinding ketel sebesar  $0,334 \times 2 = 0,668$  inchi.

## V.2 Silinder Ketel Pada Pipa – Pipa Api

Pada perancangan silinder ketel pada pipa api ini digunakan bahan baja SA-213 T22. Tegangan tarik maksimal dari bahan ini yaitu sebesar 15000 psi. Maka ukuran untuk silinder api yaitu sebagai berikut :

Diameter dalam silinder (ID) = 29,527 inchi

Diameter luar silinder (OD) = 30,352 inchi

Tebal dari silinder dapat diperiksa kembali dengan menggunakan rumus :

$$tm = \frac{P \times D}{2 \times \sigma + 2 \times Y \times P} + C \quad (36) \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

Dengan : tm = tebal minimum dinding silinder ketel pada pipa – pipa api (in)

P = tekanan kerja ketel = 199,14 psia

D = diameter luar = 30,352 inchi

$\sigma$  = kekuatan tarik maksimal bahan = 15000 psia

Y = koefisian factor temperatur sebesar 0,7 pada temperatur kurang dari 1150 <sup>0</sup>F

Sehingga :

$$\begin{aligned} tm &= \frac{199,14 \times 30,354}{2 \times 15000 + 2 \times 0,7 \times 199,14} + 0,065 \\ &= 0,335 \text{ inchi} \end{aligned}$$

<sup>36</sup> Industrial Piping, Charles T Littleton, 2<sup>nd</sup> Edition, New York, 1962, hal 30

Sehingga dari syarat untuk tebal lorong api tidak boleh kurang dari 0,31 inch dan tidak boleh lebih dari 0,81 inch maka tebal silinder sebesar 0,335 inch telah memenuhi syarat.

### V.1.3 Perhitungan Jarak Antar Pipa – pipa Api

Untuk dapat menghitung jarak antar pipa – pipa api, maka harus disesuaikan dengan tekanan yang bekerja pada pipa – pipa api tersebut dengan diameter nominal dari pipa api tersebut sehingga dapat dihitung sebagai berikut :

Berdasarkan tekanan kerja dari pipa yaitu pada 199,14 psia, maka diambil bahan pipa SA 213 T22.

Dengan : Diameter dalam pipa = 1,049 inch

Diameter silinder pipa = 30,354 inch

Jumlah pipa = 28

Untuk menghitung jarak pipa :

$$S = 0,5 \times do \quad \dots \dots \dots (5.4)$$

$$= 0,5 \times 1,049$$

$$= 0,5245$$

S = jarak antar pipa api.

Sehingga didapat jarak antara diameter luar pipa – pipa api = 0,5245 mm

### V.1.4 Perhitungan Rangka Pendukung

Pada perancangan generator uap ini akan terjadi suatu gaya yang disebabkan karena pengoperasian pada ketel uap, sehingga untuk menahan gaya dorong dalam ketel uap ini digunakan penahan atau rangka pendukung

ketel uap yang terbuat dari baha baja tahan karat atau korosi dengan kemampuan menahan beban kurang lebih sebesar 40000 Psi. Dengan perincian sebagai berikut :

Diameter batang penahan pipa = 1 inchi

Diameter silinder ketel = 39,372 inchi

Tekanan kerja ketel maximum = 199,14 psia

Jarak dari pipa api yang tertinggi = 12 inchi (direncanakan)

Tebal lebar tabung = 11,22 / 16 inchi

Jarak dari dinding silinder ketel dengan bagian lebar tabung yang diperhitungkan untuk ditahan dengan batang penahan dapat dihit ung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$d = \frac{5T}{\sqrt{P}} \quad (37) \quad \dots\dots\dots (5.5)$$

$$= \frac{5 \times 11,22}{\sqrt{199,14}}$$

$$= 3,975 \text{ inchi}$$

Luas bagian tube yang harus ditahan oleh batang penahan dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$A = (D - 2 \times d)^2 \times \frac{\pi}{8} - \left( \frac{D}{2} - h + 2 \right) \times (D + 2 \times d) \quad \dots\dots\dots (5.6)$$

$$= (39,372 - 2 \times 3,975)^2 \times \frac{3,14}{8} - \left( \frac{39,372}{2} - 12 + 2 \right) \times (39,372 + 2 \times 3,975)$$

$$= 118,458 \text{ in}^2$$

<sup>37</sup> Steam-Plant operation, Evert B. Woodruff, Hebert B. Lammers, New York, 1977, Hal 615

Sehingga jumlah beban secara keseluruhan yang diterima oleh batang penahan, yaitu :

$$\begin{aligned} F &= P \times A^{(38)} && \dots\dots\dots (5.7) \\ &= 199,14 \times 118,458 \\ &= 23589,9 \text{ lb} \end{aligned}$$

Untuk setiap penampang batang yang mampu menahan beban sebesar :

$$\begin{aligned} F &= \sigma \times \frac{\pi}{4} \times d^2 && \dots\dots\dots (5.8) \\ &= 40000 \times \frac{3,14}{4} \times 1^2 \\ &= 31400 \end{aligned}$$

Sehingga jumlah penahan yang diperlukan untuk menahan ketel uap yaitu :

$$\begin{aligned} n &= \frac{F}{f} && \dots\dots\dots (5.9) \\ &= \frac{31400}{23589,9} \\ &= 1,33 \approx 2 \text{ buah} \end{aligned}$$

### V.1.5 Perhitungan Sambungan Las

Dalam pembuatan silinder ketel pada perancangan ketel uap ini seluruh pengerjaan pembuatan sambungan dilakukan dengan jalan pengelasan. Untuk mendapatkan silinder ketel dengan arah memanjang dapat dibuat dengan cara melekuukkan plat baja dengan menggunakan mesin pelengkung atau dengan mesin pengerol plat, sedangkan untuk memperoleh sambungan silinder ketel dengan arah melintang dimana dilakukan

<sup>38</sup> Steam-Plant operation, Evert B. Woodruff, Hebert B. Lammers, New York, 1977, Hal 616



sambungan dengan bahan dasar plat baja yaitu plat yang akan ditembus oleh pipa – pipa dan lorong – lorong api pada dinding ketel, hal ini dilakukan setelah pembuatan penyambungan dengan arah memanjang selesai dilakukan dengan tujuan mempercepat dan mempermudah pengerjaan silinder ketel.

Perhitungan sambungan dengan arah memanjang :

Karena adanya tekanan dalam ketel menyebabkan terjadinya gaya – gaya yang akan diterima oleh silinder sebesar :

$$F_t = D \times L \times P \quad \dots\dots\dots (5.10)$$

Dengan :  $F_t$  = gaya pada dinding silinder ketel

$D$  = diameter dalam silinder ketel = 39,372 inch

$L$  = panjang silinder ketel = 98,425 inchi

$P$  = tekanan kerja ketel = 199,14 psia

Maka :  $F_t = 39,372 \times 98,425 \times 199,14$

$$= 771705,157 \text{ lb}$$

Sedangkan tegangan yang diijinkan pada arah sambungan las memanjang dapat dihitung sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{F_t}{a \times b} \quad \dots\dots\dots (5.11)$$

Dengan :  $F_t$  = Gaya dinding silinder ketel (lb) = 771705,157 lb

$a$  = Tebal kampuh =  $\frac{1}{2}(\sqrt{2} \times S)$

dimana  $S$  = tebal plat = 1,2066 inchi

$$a = \frac{1}{2}(\sqrt{2} \times 1,2066) = 0,8532$$



$$\begin{aligned}
 b &= \text{panjang kampuh} = L - 3a \\
 &= 98,425 - 3 \times 0,8532 \\
 &= 95,865 \text{ inchi}
 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \frac{771705,157}{0,8532 \times 95,865} \\
 &= 9434,97 \text{ psia}
 \end{aligned}$$

Dari syarat tegangan yang diijinkan sebesar 70000 psia, karena tegangan yang terjadi lebih kecil sehingga sambungan las pada arah memanjang pada silinder ketel tersebut sudah cukup kuat dan memenuhi syarat.

Perhitungan sambungan pada arah melintang.

Untuk menghitung gaya yang diterima dinding ketel untuk sambungan las pada arah melintang digunakan rumus :

$$\begin{aligned}
 F_m &= \frac{\pi \times D^2 \times P}{4} \dots\dots\dots (5.12) \\
 &= \frac{3,14 \times 39,372^2 \times 199,14}{4} \\
 &= 242327,73 \text{ lb}
 \end{aligned}$$

Sehingga tegangan yang diterima oleh sambungan las dengan arah melintang, yaitu sebagai berikut :

$$F_m = \frac{F_m}{a \times l} \dots\dots\dots (5.13)$$

Dengan :  $F_m$  = Gaya pada arah melintang

$$= 242327,73 \text{ lb}$$

$$a = \text{Tebal kampuh} = 0,8532$$

$$\begin{aligned} L = \text{Panjang kampuh} &= \pi \times D - 3 \times a \\ &= 3,14 \times 39,372 - 3 \times 0,8532 \\ &= 121,068 \text{ inch} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Sehingga : } Fm &= \frac{242327,73}{0,853 \times 121,068} \\ &= 2346,507 \text{ psia} \end{aligned}$$

Dari syarat tegangan yang diizinkan yaitu sebesar 70000 Psi, maka tegangan pada arah melintang lebih kecil, sehingga sambungan las pada arah melintang sudah cukup kuat dan memenuhi syarat yang ada.

## **BAB VI**

### **DINDING DAN ISOLASI KETEL**

Akibat pembakaran bahan bakar yang terjadi pada ruang bakar akan menyebabkan adanya perbedaan temperatur nyala api dan gas asap sehingga menimbulkan panas yang cukup tinggi hal ini menyebabkan dinding ketel harus diisolasi agar dapat mengurangi kerugian panas tersebut.

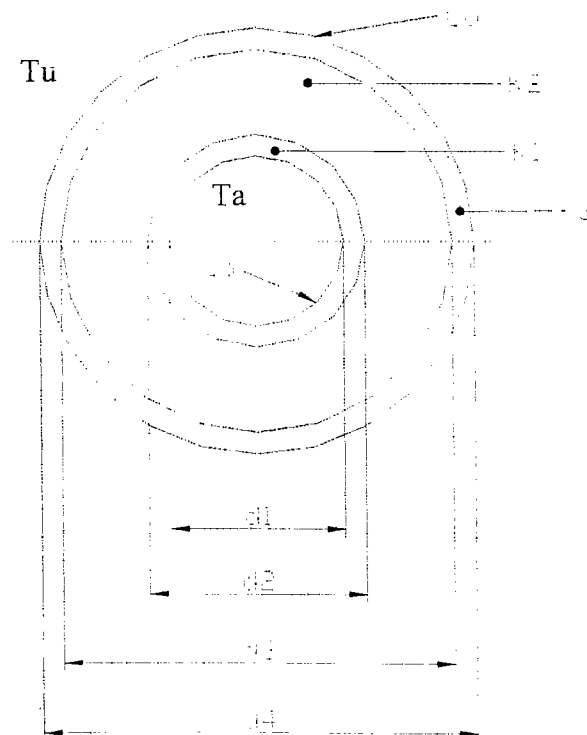
Walaupun pembuatan isolasi pada dinding ketel dibuat sedemikian rupa dan sebaik mungkin, namun fungsinya hanya dapat memperkecil kerugian panas saja, karena belum dapat sepenuhnya untuk meniadakan kerugian panas yang terjadi akibat temperatur tersebut, akan tetapi apabila ditinjau dari segi keamanan menjadi lebih baik. Setelah dinding ketel diisolasi maka temperatur dinding ketel sebelah luar akan menjadi lebih kecil atau lebih rendah tetapi sedikit lebih tinggi diatas temperatur udara luar. Dinding luar ketel yang baik haruslah memenuhi syarat – syarat sebagai berikut :

- a. Tahan terhadap temperatur tinggi
- b. Tahan terhadap korosi dari debu dan gas asap yang terjadi
- c. Konstruksi harus cukup kuat terhadap pemuaian, tekanan dan kemungkinan adanya gempa.
- d. Kerugian panas melalui dinding ketel harus sekecil mungkin
- e. Kebocoran pada dinding ketel harus dapat dicegah

- f. Pemanasan dan pemeliharaan harus dapat dipertanggungjawabkan secara ekonomis
- g. Temperatur dinding ruang bakar tidak boleh mengganggu kenyamanan disekitar pengoperasian ketel
- h. Getaran dan kebisingan akibat pembakaran dan aliran gas asap haruslah dapat diredam
- i. Dinding ketel sebelah luar harus tahan terhadap perubahan cuaca
- j. Mudah dalam pemeliharaan dan perawatan

### VI.1 Perancangan Dinding dan Isolasi Ketel

Konstruksi dinding ketel dirancang agar mempunyai konduktifitas rendah sehingga kerugian panas kecil. Dinding dan isolasi ketel yang direncanakan dapat ditentukan sebagai berikut :



Gambar VI.1 Lapisan Isolasi Ketel secara sederhana

Keterangan :

$T_a$  = Temperatur titik didih air dalam ketel =  $194,15^{\circ}\text{C} = 381,47^{\circ}\text{F}$

$T_u$  = Temperatur udara luar =  $80,6^{\circ}\text{F}$

$d_1$  = Diameter dalam silinder ketel = 29,527 inch

$d_2$  = Diameter luar silinder ketel = 30,254 inch

$d_3$  = Diameter ketel setelah diisolasi = 32,354 inch

$d_4$  = Diameter ketel setelah diisolasi dan dilapisi dengan plat aluminium  
= 32,854 inch

$U_u$  = koefisien perpindahan panas konveksi, dalam perancangan ini  
direncanakan sebesar =  $4 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^{\circ}\text{F}$  batas konduktansi panas film  
udara antara  $0,2 - 8 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^{\circ}\text{F}$  <sup>(39)</sup>

$K_1$  = Konduktifitas panas bahan ketel (Carbon Steel) <sup>(40)</sup>  
=  $26 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^{\circ}\text{F/ft}$   
=  $312 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^{\circ}\text{F/in}$

$K_2$  = Konduktifitas panas bahan isolasi ketel (Glass Wool) <sup>(41)</sup>  
=  $0,022 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^{\circ}\text{F/ft}$   
=  $0,264 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^{\circ}\text{F/in}$

$K_3$  = Konduktifitas panas bahan plat aluminium <sup>(42)</sup>  
=  $117 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^{\circ}\text{F/ft}$   
=  $1404 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^{\circ}\text{F/in}$

<sup>39</sup> Carl D Shield, Boiler Type Characteristic Function, hal 160

<sup>40</sup> J.P. Holman, Perpindahan Kalor, Erlangga, hal 584

<sup>41</sup> J.P. Holman, Perpindahan Kalor, Erlangga, hal 584

<sup>42</sup> J.P. Holman, Perpindahan Kalor, Erlangga, hal 584

### VI.1.1 Perhitungan Kerugian Panas Melalui Dinding Silinder

Luas permukaan silinder ketel yang telah diisolasi dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$A = \pi \times d_2 \times L + 2 \times \frac{\pi}{4} \times (d_2)^2 \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

$$= 3,14 \times \frac{30,354}{12} \times \frac{98,425}{12} + 2 \times \frac{3,14}{4} \times \left(\frac{30,354}{12}\right)^2$$

$$= 69,117 \text{ ft}$$

Sedangkan untuk menghitung koefisien perpindahan panas konveksi adalah sebagai berikut :

$$Ua = ha \times \left( \frac{P}{Pa} \right)^{0,4} \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

Dengan :

$ha$  = koefisien perpindahan panas konveksi pada tekanan atm.

$P$  = tekanan uap = 199,14 psia

$Pa$  = tekanan atmosfer = 14,7 psia

Sedangkan untuk menghitung koefisien perpindahan panas konveksi dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$ha = 0,168 \times (\Delta T)^3 \quad \dots\dots\dots (6.3)$$

Pada perancangan ini direncanakan temperatur permukaan dalam dinding silinder ketel sebesar 369,47 °F, dimana temperatur tersebut ditentukan lebih kecil atau lebih rendah dibandingkan temperatur titik didih air yaitu sebesar 381,47 °F, hal ini disebabkan karena adanya film air sehingga terdapat selisih sebesar 12 °F sehingga :

$$\begin{aligned}
 ha &= 0,168 \times (12)^3 \\
 &= 290,304 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^\circ\text{F}
 \end{aligned}$$

Setelah diketahui nilai koefisien perpindahan panas konveksi = 290,304 Btu/ft<sup>2</sup> jam °F, maka jumlah koefisien perpindahan panas konveksi :

$$\begin{aligned}
 Ua &= 290,304 \times \left( \frac{199,14}{14,7} \right)^{0.4} \dots\dots\dots (6.4) \\
 &= 823,36 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^\circ\text{F}
 \end{aligned}$$

Dari perkiraan temperatur permukaan dalam dinding silinder ketel dapat di cek dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$Q_{pa} = Ua \times A \times \Delta T$$

$$324424,946 = 823,36 \times 69,117 \times (Ta - Ts)$$

$$324424,946 = 823,36 \times 69,117 \times (381,47 - Ts)$$

$$Ts = 381,47 ^\circ\text{F}$$

Dari perkiraan temperatur permukaan dalam dinding silinder terdapat perbedaan sebesar :

$$\frac{381,47 - 369,47}{381,47} \times 100\% = 3,1\%$$

Karena perbedaan sangat kecil maka temperatur permukaan dalam dinding dapat diterima.

Perhitungan kerugian panas melalui dinding ketel yaitu dengan rumus :



$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{A \times (T_a - T_u)}{\left( \frac{d4}{d1} \times \frac{1}{U_a} \right) + \left( \frac{d4}{2K1} \times \ln \frac{d2}{d1} \right) + \left( \frac{d4}{2K2} \times \ln \frac{d3}{d2} \right) + \left( \frac{d4}{2K3} \times \ln \frac{d4}{d3} \right) \times \left( \frac{1}{U_r} \right)} \quad (43) \dots (6.5) \\
 &= \frac{69,117 \times (381,47 - 80,6)}{\left( \frac{32,854}{29,527} \times \frac{1}{823,36} \right) + \left( \frac{32,854}{2 \times 312} \times \ln \frac{30,354}{29,527} \right) + \left( \frac{32,854}{2 \times 0,264} \times \ln \frac{32,354}{30,354} \right)} \\
 &\quad + \left( \frac{32,854}{2 \times 1404} \times \ln \frac{32,854}{32,354} \right) \times \left( \frac{1}{4} \right) \\
 &= 1481,011 \text{ Btu/jam}
 \end{aligned}$$

## VI.1.2 Perhitungan Temperatur Bagian Dalam Luar Plat Penutup Isolasi

### Ketel

Untuk menghitung temperatur bagian luar plat penutup isolasi silinder ketel digunakan rumus sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{A \times (T_a - T_i)}{\left( \frac{d4}{d1} \times \frac{1}{U_a} \right) + \left( \frac{d4}{2K1} \times \ln \frac{d2}{d1} \right) + \left( \frac{d4}{2K2} \times \ln \frac{d3}{d2} \right) + \left( \frac{d4}{2K3} \times \ln \frac{d4}{d3} \right)} \dots \dots \dots (6.6) \\
 1481,011 &= \frac{69,117 \times (381,47 - 80,6)}{\left( \frac{32,854}{29,527} \times \frac{1}{823,36} \right) + \left( \frac{32,854}{2 \times 312} \times \ln \frac{30,354}{29,527} \right) + \left( \frac{32,854}{2 \times 0,264} \times \ln \frac{32,354}{30,354} \right)} \\
 &\quad + \left( \frac{32,854}{2 \times 1404} \times \ln \frac{32,854}{32,354} \right)
 \end{aligned}$$

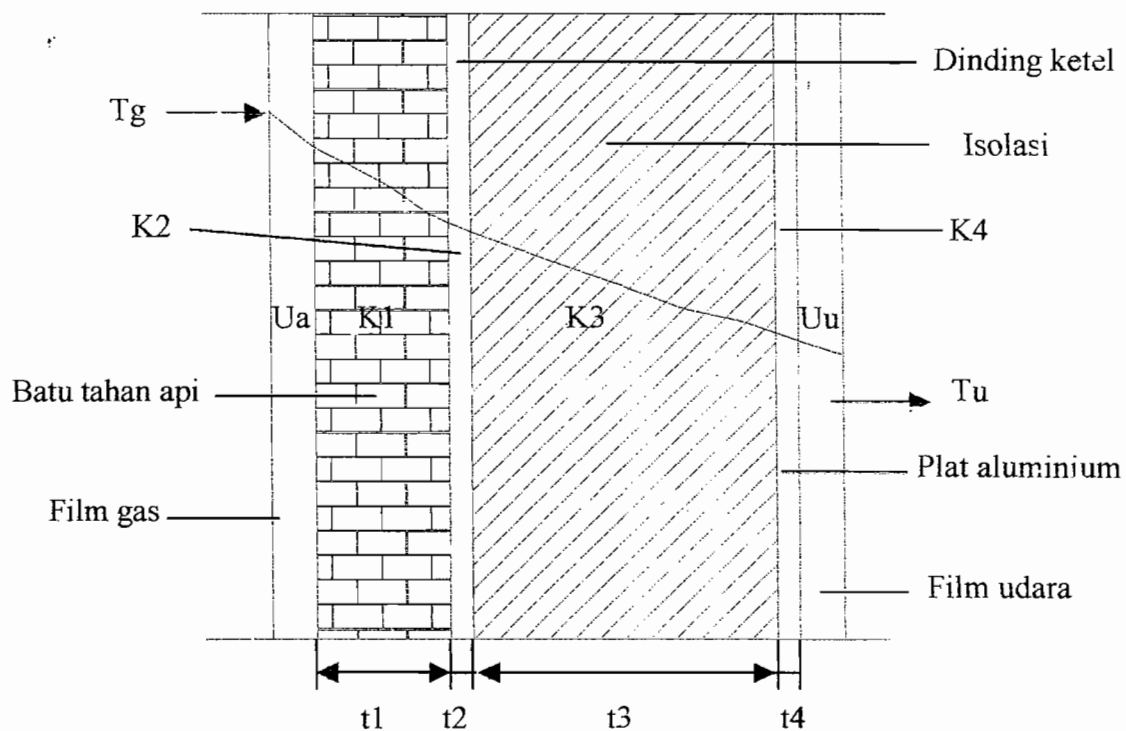
$$T_i = 81,616 \approx 82^{\circ}\text{F}$$

<sup>43</sup> Babcock and Wilcox, Steam/Its Generation and Use, New York, hal 4

### VI.1.3 Perancangan Isolasi Tutup Belakang Silinder Ketel

Pada perancangan isolasi pada penutup bagian belakang digunakan batu tahan api (fire brick) dengan tujuan dapat mengisolasi panas yang ditimbulkan akibat pembakaran bahan bakar dengan baik sehingga ketel uap lokomotif ini akan semakin aman pada saat pengoperasiannya.

Maka akan direncanakan tebal dari batu tahan api tersebut sebesar 4 inchi dari tebal isolasinya yaitu 3 inchi sehingga dalam perhitungannya digunakan rumus sebagai berikut :



Gambar VI.2 Aliran panas dari gas asap ke udara

$$Q_{th} = \frac{A_{ts} \times (T_g - T_u)}{\frac{1}{U_a} + \frac{t_1}{K_1} + \frac{t_2}{K_2} + \frac{t_3}{K_3} + \frac{t_4}{K_4} + \frac{1}{U_u}} \quad \dots\dots\dots (6.7)$$

Dengan :

$A_{ts}$  = luas penampang tutup belakang

$$\begin{aligned} A_{ts} &= \frac{\pi}{4} \times \left( \frac{d_1}{12} \right)^2 \\ &= \frac{3,14}{4} \times \left( \frac{29,527}{12} \right)^2 \\ &= 4,804 \text{ ft}^2 \end{aligned}$$

$T_g$  = temperatur penampang gas asap dalam lemari api

$$= 840,33 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$T_u$  = temperatur udara luar

$$= 27 \text{ } ^\circ\text{C} = 80,6 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$U_a$  = Koefisien perpindahan panas konveksi

$$= 10,052 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^\circ\text{F}$$

$t_1$  = tebal batu tahan api

$$= 4 \text{ inch} = 0,333 \text{ ft}$$

$K_1$  = koefisien perpindahan panas konveksi batu tahan api

$$= 0,27 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^\circ\text{F/ft} = 3,272 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^\circ\text{F/inch} \quad ^{(44)}$$

$t_2$  = tebal silinder ketel

$$= 1,206 \text{ inch} = 0,1 \text{ ft}$$

$K_2$  = konduktansi panas bahan silinder ketel (Carbon Steel)

<sup>44</sup> J.P. Holman, Perpindahan Kalor, Erlangga, hal 584

$$= 26 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^\circ\text{F/ft} = 312 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^\circ\text{F/inch} \quad (45)$$

$t_3$  = tebal isolasi

$$= 3 \text{ inch} = 0,25 \text{ ft}$$

$K_3$  = konduktansi panas bahan isolasi

$$= 0,022 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^\circ\text{F/ft} = 0,264 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^\circ\text{F/inch} \quad (46)$$

$t_4$  = tebal plat aluminium

$$= 0,5 \text{ in} = 0,04167 \text{ ft}$$

$K_4$  = konduktansi panas aluminium

$$= 117 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^\circ\text{F/in} = 1404 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^\circ\text{F/in} \quad (47)$$

$U_u$  = konduktifitas panas film udara =  $4 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^\circ\text{F}$  batas

konduktansi panas film udara antara  $0,2 - 8 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^\circ\text{F}$  <sup>(48)</sup>

Sehingga dari data – data diatas dapat ditentukan kerugian panas melalui dinding silinder ketel adalah sebagai berikut :

$$Q_{tb} = \frac{4,804 \times (840,33 - 80,6)}{\frac{1}{10,052} + \frac{0,333}{0,27} + \frac{0,1}{26} + \frac{0,25}{0,022} + \frac{0,04167}{117} + \frac{1}{4}}$$

$$= 281,819 \text{ Btu/jam}$$

Dan temperatur pada permukaan luar plat penutup isolasi sebagi berikut :

$$Q_{tb} = \frac{A_{tb} \times (T_g - T_s)}{\frac{1}{U_a} + \frac{t_1}{K_1} + \frac{t_2}{K_2} + \frac{t_3}{K_3} + \frac{t_4}{K_4}} \quad \dots\dots\dots (6.8)$$

<sup>45</sup> J.P. Holman, Perpindahan Kalor, Erlangga, hal 584

<sup>46</sup> J.P. Holman, Perpindahan Kalor, Erlangga, hal 584

<sup>47</sup> J.P. Holman, Perpindahan Kalor, Erlangga, hal 584

<sup>48</sup> J.P. Holman, Perpindahan Kalor, Erlangga, hal 584

$$281,819 = \frac{4,804 \times (840,33 - T_s)}{\frac{1}{10,052} + \frac{0,333}{0,27} + \frac{0,1}{26} + \frac{0,25}{0,022} + \frac{0,04167}{117}}$$

$$T_s = 85,264 ^\circ\text{F}$$

#### VL1.4 Pemeriksaan Kerugian Panas Melalui Dinding dan Isolasi Ketel

Jumlah kerugian panas yang terjadi pada ketel ditimbulkan karena hilangnya panas melalui dinding ketel dan isolasi ketel yaitu dari jumlah kerugian panas pada silinder dijumlah dengan kerugian panas pada tutup belakang silinder ketel.

Untuk menghitung jumlah kerugian panas yang ditimbulkan melalui dinding dan isolasi ketel digunakan rumus sebagai berikut :

$$Q_{si} = Q + Q_{tb} \quad \dots\dots\dots (6.9)$$

$$= 1481,011 + 281,819$$

$$= 1762,83 \text{ Btu/jam}$$

Sehingga panas yang dihasilkan oleh pembatasan bahan bakar dalam jumlah persen yaitu sebagai berikut :

$$Q = \frac{Q_{si}}{LHV \times M_b} \times 100\%$$

$$Q = \frac{1762,83}{11818,054 \times 28,563} \times 100\%$$

$$= 0,522 \%$$

## **BAB VII**

### **CEROBONG ASAP**

#### **VII.1 Cerobong Asap**

Cerobong asap digunakan untuk menghisap gas asap hasil reaksi pembakaran dari ruang bakar dan membuang gas asap tersebut keluar udara bebas pada kecepatan dan ketinggian tertentu dan karena gas asap tersebut mengandung debu dan meracuni lingkungan yang sangat berbahaya bagi kehidupan manusia ataupun kehidupan lainnya. Cerobong harus dibangun cukup tinggi agar gas asap tersebut tidak mengganggu lingkungan sekitarnya.

Cerobong dapat dibangun dari batu bata, beton bertulang atau plat baja. Konstruksi yang paling ringan adalah plat baja, tetapi memiliki kekurangan yaitu terjadi pengkaratan atau korosi, sedangkan kelebihan dibandingkan dengan batu bata yaitu mudah dan cepat dalam pembuatannya, lebih ringan untuk diameter dan tinggi yang sama, harga lebih murah dan tidak memakan tempat. Adapun tinggi dan rendahnya cerobong dapat dipengaruhi oleh kondisi daerah setempat. Misalnya untuk daerah yang berpenduduk padat dan berangin lembut maka harus dibangun lebih tinggi dengan tujuan untuk mencegah agar tidak mengganggu lingkungan. Cara untuk menarik dan menghisap gas asap hasil dari

pembakaran masuk ke cerobong dan kemudian dikeluarkan ke udara bebas ada dua sistem, yaitu sebagai berikut :

1. Sistem tarikan alam (Natural Draft)

Bila aliran udara masuk ruang bakar dan aliran gas asap dari ruang bakar melewati bagian-bagian dari ketel hingga dibuang keluar ketel melalui cerobong hanya oleh tarikan cerobong itu sendiri sehingga akibat adanya perbedaan berat jenis gas asap itu sendiri sebagai akibat adanya perbedaan berat jenis gas asap dan udara luar.

2. Sistem tarikan paksa (Forced Draft)

Bila tarikan yang ditimbulkan oleh cerobong itu sendiri tidak mampu menimbulkan aliran udara masuk ruang bakar dan gas asap melewati bagian – bagian ketel tersebut untuk dibuang melalui cerobong maka perlu dibantu dengan fan atau blower.

Pada sistem tarikan paksa terdapat tiga jenis sistem tarikan yaitu sebagai berikut :

- a. Sistem tarikan isap (induced Draft Fan)

Pada tarikan isap fan digunakan untuk menghisap gas asap dari dalam ketel dan membuang keluar lewat cerobong sehingga tungku atau ruang bakar bertekanan sedikit lebih rendah dari tekanan udara atau sering disebut dengan Under Pressure Furnace.

- b. Tarikan tekan (Forced Draft Fan)

Bila gas asap dihembuskan keluar ruang bakar oleh fan yang dipasang pada dinding ruang bakar bertekanan lebih besar dari

tekanan udara luar yang disebut dengan tungku bertekanan atau sering disebut dengan Pressurized Furnace.

c. Tarikan Kombinasi antara asap dan tekan

Tarikan kombinasi yaitu tarikan gabungan antara tarikan tekan dan tarikan isap yang dipasang bersama sehingga tekanan didalam ruang bakar sama dengan tekanan udara luar.

## VII.2 Perencanaan Cerobong

Dalam perencanaan cerobong asap pada sebuah ketel uap sangat tergantung pada beberapa hal diantaranya yaitu :

- Jumlah kerugian tahanan total terhadap gas asap mulai dari dapur sampai cerobong.
- Temperatur rata – rata gas asap lewat cerobong dan temperatur udara sekelilingnya.
- Jumlah aliran gas.
- Tekanan udara luar.

Pada perancangan ketel uap ini cerobong dibuat dari plat baja dengan data

– data sebagai berikut :

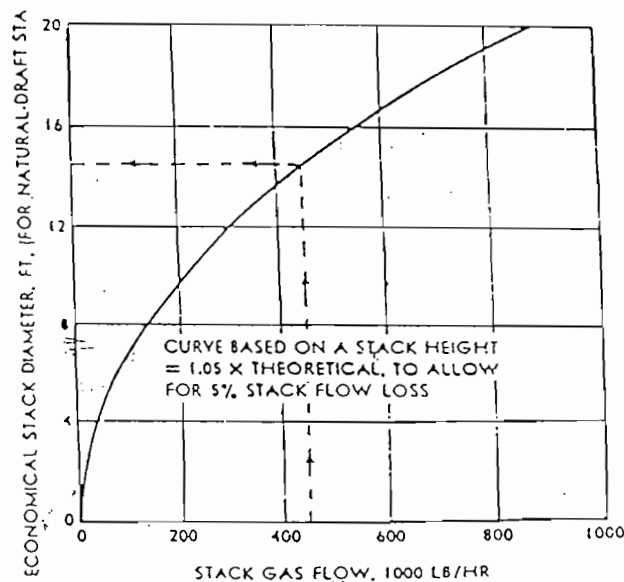
- Tinggi cerobong (L) = 2,46 ft (direncanakan)
- Temperatur gas asap masuk ( $T_{g4}$ ) =  $247,7^{\circ}\text{C} = 477,86^{\circ}\text{F}$
- Temperatur udara luar ( $T_a$ ) =  $27^{\circ}\text{C} = 80,6^{\circ}\text{F}$
- Tekanan udara luar (B) = 30 in Hg
- Jumlah aliran gas asap (ma) = 133,128 kg/jam = 293,5 lb/jam



Dari (gambar VII.1), untuk aliran gas asap didalam cerobong (stack gas flow) sebanyak 293,5 lb/jam, diperoleh diameter cerobong ( $D$ ) = 0,95 ft. Dengan menggunakan perencanaan diameter sebanyak 1,45 ft dan tinggi 2,46 ft serta temperatur gas asap masuk cerobong =  $477,86^{\circ}\text{F}$ , maka dari (gambar VII.2) didapat temperatur gas asap keluar cerobong ( $T_{go}$ ) =  $475^{\circ}\text{F}$ . Sehingga temperatur rata – rata didalam cerobong yakni :

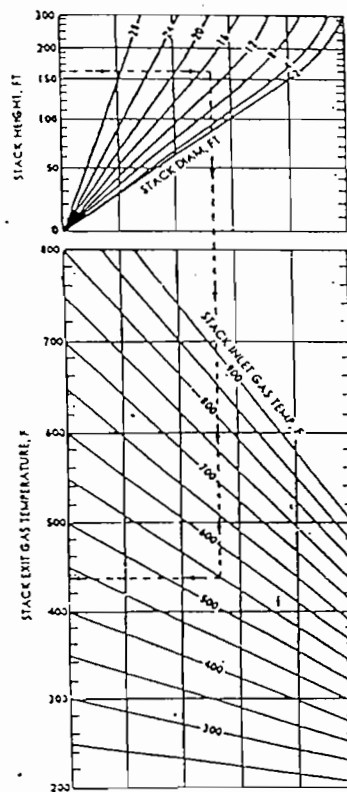
$$T_g = \frac{(477,86 + 475)}{2} = 476,43^{\circ}\text{F}$$

Untuk  $T_g = 476,43^{\circ}\text{F}$  dan tinggi cerobong 2,46 ft, dengan menggunakan (gambar VII.3) diperoleh tarikan teoritis sebesar ( $T_c$ ) = 0,15 in.  $\text{H}_2\text{O}$



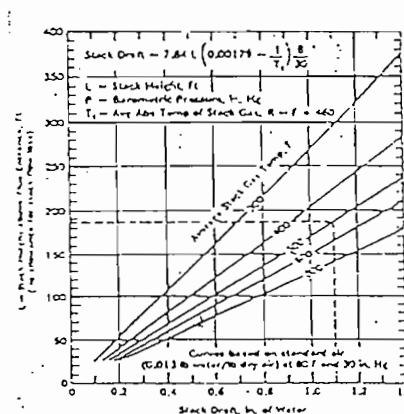
Gambar VII.1 Diagram diameter cerobong berdasarkan jumlah gas asap yang mengalir

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam/Its Generation and Use, hal 5 – 7)



Gambar VII.2 Diagram hubungan antara temperatur gas asap keluar cerobong dengan dimensi cerobong

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam/Its Generation and Use, hal 5 – 6)



Gambar VII.3 Diagram hubungan antara tinggi cerobong untuk harga tarikan cerobong dan temperatur rata – rata gas dalam cerobong.

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam/Its Generation and Use, hal 17 – 5)

Besarnya tarikan cerobong teoritis dapat juga diketahui melalui rumus sebagai berikut :

$$P_{ct} = 7,84 \times L \times \left( 0,0079 - \frac{1}{T_{gr}} \right) \times \frac{B}{30} \quad \dots\dots\dots (7.1)$$

Dengan : L = Tinggi cerobong

$$= 2,46 \text{ ft}$$

B = Tekanan udara luar

$$= 30 \text{ in Hg}$$

$T_{gr}$  = Temperatur absolute gas asap rata – rata didalam cerobong

$$= 476,43 \text{ } ^\circ\text{F} = 936,1 \text{ } ^\circ\text{R}$$

Sehingga besarnya tarikan cerobong teoritis :

$$P_{ct} = 7,84 \times 2,46 \times \left( 0,0079 - \frac{1}{936,1} \right) \times \frac{30}{30}$$

$$= 0,1317 \text{ in H}_2\text{O}$$

### VII.2.1 Perhitungan Kerugian Aliran Gas Asap Di Dalam Cerobong

Untuk menghitung kerugian aliran gas asap didalam cerobong

(stack flow lose) menggunakan rumus dibawah ini :

$$SFL = \frac{2,76}{B} \times \frac{T_g}{D_r^4} \times \left[ \frac{mg}{100000} \right] \times \left[ \frac{fxl}{100000} + 1 \right] \quad (49) \quad \dots\dots\dots (7.2)$$

Dengan :  $m_a$  = Jumlah gas asap yang mengalir didalam cerobong

$$= 133,128 \text{ kg/jam} = 293,5 \text{ lb/jam}$$

B = Tekanan barometer = 30 in.Hg

$T_g$  = Temperatur rata – rata gas asap didalam cerobong

<sup>49</sup> Steam Generation and Use, Babcock and Wilcox, New York, hal 17

$$= 476,43 + 459,67 = 936,1 \text{ } ^\circ\text{R}$$

Dt = Diameter dalam cerobong = 0,95 ft

F = Factor gesekan

L = Finggi cerobong = 2,46 ft

Untuk menentukan bilangan Reynold dicari dengan persamaan :

$$N_{RE} = \frac{20000 \times Wg}{Tg \times D_i} \quad \dots\dots\dots (7.3)$$

$$= \frac{20000 \times 293,5}{936,1 \times 0,95}$$

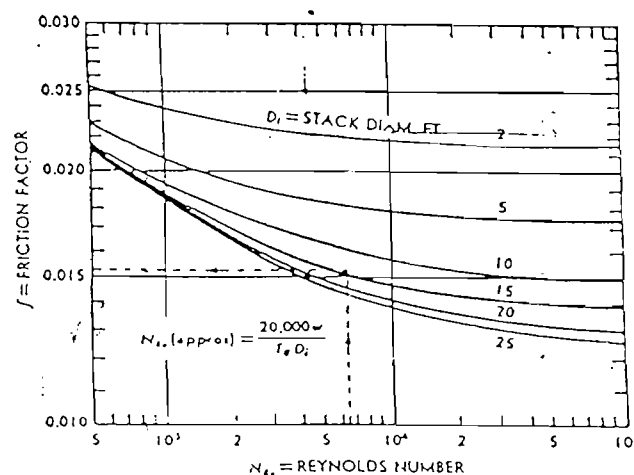
$$= 6600,734$$

Dari (gambar VII.4) untuk D = 1,45 ft dan  $N_{RE} = 6600,73$  didapat  $f = 0,024$

Sehingga kita dapat mencari *stack flow lose* yaitu :

$$SFL = \frac{2,76}{30} \times \frac{936,1}{(0,95)^4} \times \left[ \frac{293,5}{100000} \right] \times \left[ \frac{0,024 \times 5}{100000} + 1 \right]$$

$$= 0,31 \text{ in H}_2$$



Gambar VII.4 Diagram hubungan faktor gesekan dengan diameter cerobong berdasarkan bilangan Reynold.

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam/Its Generation and Use, hal 5 – 6)

### VII.2.2 Perhitungan Kerugian Aliran Gas Asap Di Dalam Ketel

Untuk mengetahui besarnya aliran gas asap selama mengalir didalam ketel, berikut ini akan dihitung hambatan dalam lorong api dan pipa – pipa api :

- a) Hambatan aliran gas asap pada saat melewati lorong silinder api dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$\Delta P_1 = f \times \left( \frac{L}{D_r} \right) \left( 460 + \left( \frac{T_1 + 2T_2}{3} \right) \right) \left( \frac{\left( \frac{G_g}{10^3} \right)}{14400} \right)^{(50)} \dots\dots\dots (7.4)$$

Dengan : f = Faktor gesekan

L = Panjang silinder lorong api = 6,561 f ft = 78,732 inch

G<sub>g</sub> = Gas massa velocity = 2315,952 lb/jam ft<sup>2</sup>

D<sub>r</sub> = Diameter rata – rata silinder lorong api = 29,527 inch

T<sub>1</sub> = Temperatur udara masuk lorong api = 27 °C = 80,6 °F

T<sub>2</sub> = Temperatur gas asap keluar lorong api = 840,33 °F

Harga F didapat dengan cara :

$$N_{RE} = \frac{G_g \times D_r}{12 \times \mu} \quad (51) \quad \dots\dots\dots (7.5)$$

Temperatur rata – rata gas asap didalam lorong api yaitu :

$$T_a = \frac{(80,6 + 840,33)}{2} = 460,465 \text{ } ^\circ\text{F}$$

<sup>50</sup> Steam Generation and Use, Babcock and Wilcox, New York, hal 13

<sup>51</sup> Steam Generation and Use, Babcock and Wilcox, New York, hal 10

Sehingga dari (gambar VII.5) didapat  $\mu = 0,058$  maka :

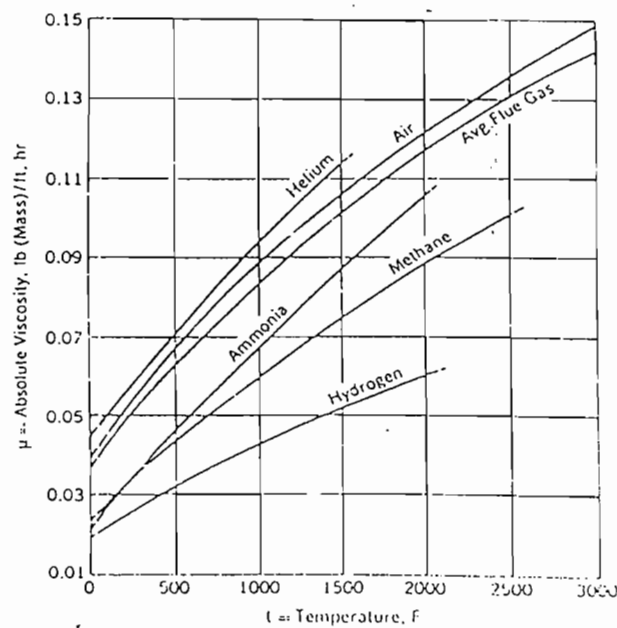
$$N_{RE} = \frac{2315,952 \times 29,527}{12 \times 0,058}$$

$$= 98780,676$$

Untuk  $D_r = 29,527$  inchi maka didapat dari (gambar VII.6) relative

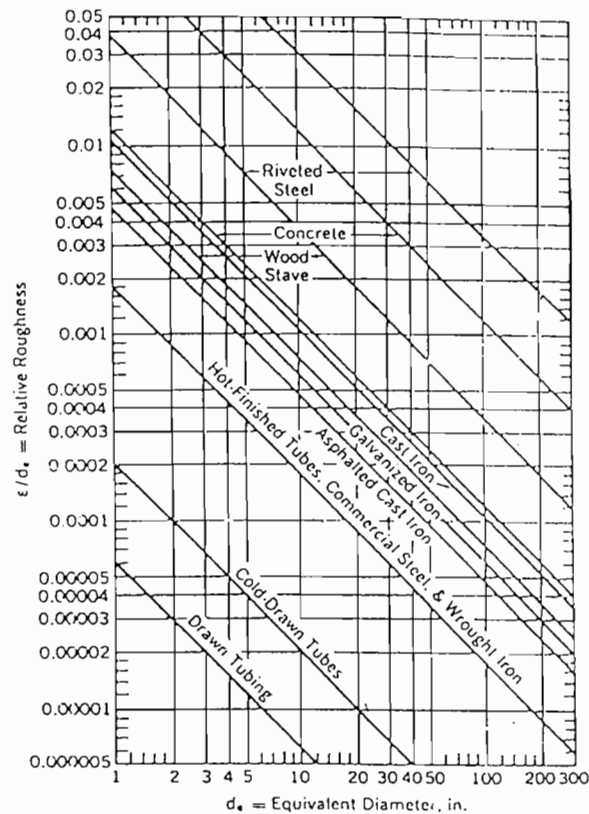
roughness  $(\frac{\epsilon}{D}) = 0,00016$  untuk  $N_{RE} = 98780,676$  maka dari (gambar

VII.7) didapat koefisien gesek  $(f) = 0,018$



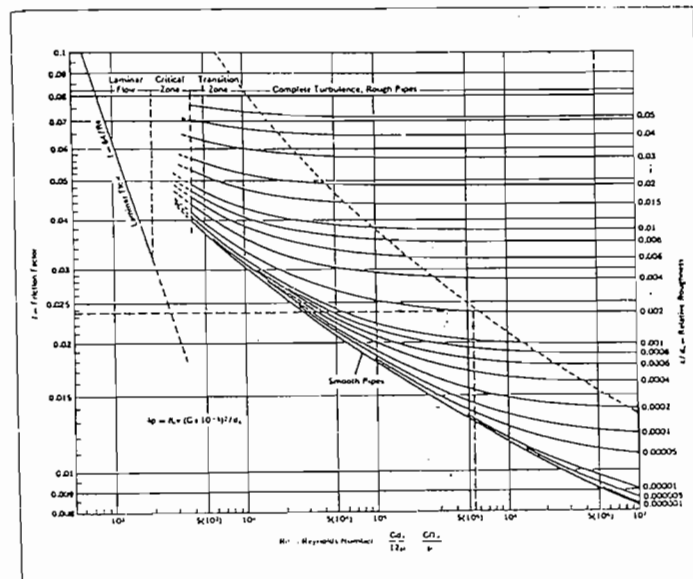
Gambar VII.5 Kekerasan relatif dari berbagai permukaan.

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam/Its Generation and Use, hal 17 – 4)



Gambar VII.6 Viskositas absolut untuk beberapa gas ideal pada tekanan atmosfer

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam/Its Generation and Use, hal 8 – 9)



Gambar VII.7 Diagram untuk mendapatkan faktor gesekan.

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam/Its Generation and Use, hal 8 – 10)

Dengan memasukkan harga – harga tersebut kedalam persamaan hambatan aliran gas asap diatas maka didapat hambatan aliran gas asap didalam silinder lorong api :

$$\Delta P_1 = 0,018 \times \left( \frac{78,732}{29,527} \right) \left( 460 + \left( \frac{80,6 + 2 \times 840,33}{3} \right) \right) \left( \frac{\left( \frac{2315,952}{10^3} \right)^2}{14400} \right)$$

$$= 0,0065 \text{ in H}_2\text{O}$$

b) Perhitungan hambatan aliran gas asap melewati pipa – pipa api ( $\Delta P_2$ ) :

Hambatan aliran gas asap saat melewati pipa – pipa dihitung dengan menggunakan rumus :

$$\Delta P_2 = f \times \left( \frac{L}{D_e} \right) \left( 460 + \left( \frac{T_1 + 2T_2}{3} \right) \right) \left( \frac{\left( \frac{G_g^2}{10^3} \right)}{14400} \right)$$

Dengan : f = Faktor gesekan

L = Panjang silinder lorong api = 6,561 ft = 78,732 inch

$G_g$  = Gas massa velocity = 2315,952 lb/jam ft<sup>2</sup>

$T_1$  = Temperatur udara di lorong api = 840,33 °F

$T_2$  = Temperatur udara keluar lorong api = 500 °F

$D_e$  = Diameter ekivalen = 28 × 1,049 = 29,372 inch

Temperatur rata – rata gas asap didalam lorong api :

$$T_a = \frac{(840,33 + 500)}{2} = 670,165 \text{ } ^\circ\text{F}$$



Sehingga dari (gambar VII.5) didapat  $\mu = 0,07$  maka harga

bilangan Reynold :

$$\begin{aligned} N_{RE} &= \frac{G_g \times D_r}{12 \times \mu} \\ &= \frac{2315,952 \times 29,372}{12 \times 0,07} \\ &= 80981,121 \end{aligned}$$

Untuk  $d_e = 1,049$  inchi maka didapat dari (gambar VII.6) relatif

roughness  $(\frac{\epsilon}{D}) = 0,0000052$  sehingga untuk  $N_{RE} = 80981,121$  maka dari

(gambar VII.7) didapat koefisien gesek  $(f) = 0,0185$  sehingga :

$$\begin{aligned} \Delta P_2 &= 0,0185 \times \left( \frac{78,732}{29,372} \right) \left( 460 + \left( \frac{840,33 + 2 \times 500}{3} \right) \right) \left( \frac{\left( \frac{2315,952^2}{10^3} \right)}{14400} \right) \\ &= 0,00856 \text{ in H}_2\text{O} \end{aligned}$$

Jadi jumlah hambatan dan aliran gas asap adalah :

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_1 + \Delta P \\ &= 0,0065 + 0,00856 \\ &= 0,01615 \text{ in H}_2\text{O} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan diatas dapat ditentukan prosentase perbandingan kerugian tekanan aliran gas asap didalam cerobong dengan tarikan cerobong teoritis adalah :

$$P_c = \frac{0,01506}{0,31} \times 100\% = 4,853\%$$

Ternyata prosentase perbandingan kerugian tarikan cerobong (SFL) stock gas flow dengan kerugian tarikan cerobong teoritis ( $P_c$ )  $< 5\%$ . Jadi cerobong yang direncanakan tidak memenuhi syarat untuk dijadikan tarikan alam. <sup>(52)</sup>

Untuk dapat mengatasi tarikan alam digunakan nozel yang akan ditempatkan dalam cerobong. Dalam nozel dialiri uap jenuh yang diambil dari pipa uap jenuh sebelum masuk pipa superheater yang nantinya akan mengeluarkan uap secara cepat melalui cerobong sehingga gas asap panas ikut cepat terbawa keluar melalui cerobong.



---

<sup>52</sup> Steam Generation and Use, Babcock and Wilcox, New York, hal 17 – 4

## **BAB VIII**

### **AIR ISIAN KETEL**

Air isian ketel harus mempunyai kualitas agar diperoleh hasil yang optimal. Air ketel adalah fluida kerja yang digunakan pada generator uap yang nantinya akan diubah menjadi uap. Air ketel harus bersih atau tidak mengandung garam, senyawa organik zat – zat yang mudah mengendap seminimal mungkin, sehingga tidak mengganggu dalam operasional boiler. Air ketel yang kurang bersih dapat menimbulkan akibat sebagai berikut :

- Pembentukan kerak yang dapat mengurangi daya hantar panas pada dinding pipa ketel dan kemungkinan timbul overheating pada pipa ketel.
- Timbulnya korosi akan menyebabkan rapuhnya bagian – bagian ketel.
- Timbulnya buih akan menyebabkan gangguan operasi ketel.

Macam – macam kandungan dalam air dapat diuraikan sebagai berikut :

a) Garam – garam keras (Hardness salt)

Yaitu garam – garam magnesium dan kalsium seperti :  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{Ca}(\text{SO}_4)$ ,  $\text{Mg}(\text{SO}_4)$ ,  $\text{CaCl}_2$  jenis – jenis ini dapat menyebabkan terbentuknya kerak.

b) Silika

Jenis ini dapat menyebabkan kerak yang sangat keras dan sangat sulit untuk dihilangkan dari permukaan yang dilapisi kerak tersebut.

c) Garam – garam tidak keras (Non hardness salt)

Yaitu garam – garam sulfat ( $\text{SO}_4$ ) dan klorida ( $\text{Cl}_2$ ) jenis ini dapat menyebabkan buih.

d) Zat – zat organik (Organic matter)

Yaitu berupa minyak yang dihasilkan akibat tumbuh – tumbuhan dan binatang. Jenis ini dapat menyebabkan air bersifat asam dan korosif.

e) Benda – benda melayang (Suspended matter)

Dapat ditemukan apabila dilakukan penyaringan terhadap air tersebut. Jenis ini dapat membantu terbentuknya buih.

f) Gas – gas terlarut (Dissolved gases)

Seperti :  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  dan  $\text{N}_2$  jenis ini dapat menyebabkan korosi.

### VIII.1 Pembentukan Kerak dan Lumpur

Pembentukan kerak biasanya disebabkan oleh pengendapan garam yang terlarut dalam air ketel pada waktu air menguap. Jenis garam yang dapat membentuk kerak lumpur terdiri dari dua golongan yaitu yang mengandung karbonat dan yang tidak mengandung karbonat.

Sebagai contoh senyawa – senyawa yang dapat membentuk kerak adalah sebagai berikut :  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,  $\text{MgCO}_3$ , Ca silikat, Mg silikat dll.

Senyawa – senyawa ini dalam praktek dijumpai dalam keadaan campuran dari dua atau lebih persenyawaan. Sifat dari kerak ialah akan melapisi permukaan dalam pipa ketel. Maka dengan adanya kerak pada pipa ketel menyebabkan daya hantar panas dari pipa itu berkurang.

sehingga menyebabkan panas yang dibutuhkan lebih besar dan menyebabkan dinding luar akan lebih tinggi suhunya dan konsumsi bahan bakar lebih besar, maka akan menyebabkan pipa mengalami overheating. Kadar lumpur dalam air dapat dikontrol dari derajat kekeruhan dengan jalan mengukur volume lumpur yang diendapkan atau membuang endapan lumpur setelah pengeringan.

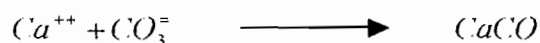
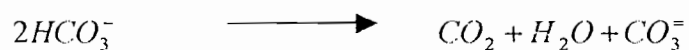
### VIII.2 Pencegahan Pembentukan Kerak dan Lumpur

Untuk mengurangi atau mencegah timbulnya kerak dan Lumpur ialah mengusahakan air isian ketel mengandung garam – garaman sedikit mungkin. Jadi diusahakan hanya sedikit mengandung Ca, Mg, dan silikat. Cara untuk mencegah timbulnya kerak dan lumpur dapat digolongkan menjadi tiga golongan :

Membuang zat – zat yang mudah membentuk kerak dengan jalan membersihkan air isian sebelum masuk ketel.

#### a. Proses thermis

Proses ini dilakukan bila garam yang terkandung didalam air sebagian besar terdiri dari garam bikarbonat. Dengan pemanasan maka garam  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  bikarbonat terurai menjadi  $\text{CO}_2$  dan karbonat mengendap berbentuk  $\text{CaCO}_3$ .



b. Proses kalk-Soda

Dengan proses kalk soda, ion – ion  $\text{Ca}^{++}$  akan diendapkan sebagai  $\text{CaCO}_3$  dan  $\text{Mg}^{++}$  menjadi  $\text{Mg(OH)}_2$  dengan jalan penambahan zat kimia kedalam air yang akan dilunakkan tersebut.

Sebagai zat kimia dipakai : Kalk :  $\text{Ca(OH)}_2$

Soda :  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

c. Proses fosfat

Garam – garam fosfat (misal : calcium fosfat dan magnesium fosfat) sangat sukar larut dalam air, maka memungkinkan dilakukan pelunakan air dengan memberikan alkali fosfat. Umumnya proses ini digunakan untuk penyempurnaan pelunakan sisa kesadahan (lanjutan). Jenis fosfat yang banyak dipakai adalah  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  (padat).

d. Proses pertukaran ion

Sebagai bahan penukar ion dipakai Zeolith (Ze) atau media sintesis lainnya.

e. Proses pembersihan silikat

Senyawa silikat dengan Ca dan Mg akan membentuk kerak yang keras yang akan membahayakan dalam pemanasan ketel. Silikat ini sukar dibersihkan karena terlarut dalam air berupa ion silikat. Batu – batu kerak ini banyak timbul dari bahan – bahan silikat  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{SiO}_3$ . Silikat ini belum bisa dihilangkan dengan Ze saja, kemungkinan untuk menghilangkannya adalah dengan absorpsi, misalnya dengan senyawa Mg,

Al atau Fe, absorpsi dapat dilakukan dalam bentuk jonjot/koloid  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ .

Cara yang lain adalah dengan koagulasi (pengumpalan). Cara ini dilakukan dengan  $\text{Al}_2(\text{SO})_4$ ,  $\text{NaAlO}_2$  pada pH rendah. Senyawa – senyawa ini didalam air terhidrolisasi dan membentuk jonjetan yang dapat menyeret silikat – silikat yang ada didalam air. Kadar  $\text{SiO}_2$  didalam air dibatasi tidak boleh lebih besar dari 0,025 ppm, sedangkan dengan metoda diatas dapat menghilangkan sampai 0,5 mg/l silikat.

Pengendapan bahan – bahan pembentuk kerak dan lumpur.

Pada proses ini dilakukan dengan menambahkan bahan chemical kedalam air ketel sehingga kerak dan bahan pembentuk kerak akan larut kembali berupa lumpur.

a) Penambahan soda

Bila didalam air mengandung kerak  $\text{CaSO}_4$  yang berupa batu dengan penambahan soda  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  maka hal ini dapat menyebabkan terlarutnya batu tersebut sehingga terbentuklah lumpur.

b) Penambahan fosfat

Untuk tekanan lebih besar dari 15 atm, dalam praktek pemakaian soda tidak menguntungkan lagi. Maka untuk tekanan tinggi dan suhu tinggi dapat dilakukan dengan penambahan fosfat terutama sebagai pencegah pembentukan batu gips, maka dipakai natrium fosfat  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ .

### VIII.3 Syarat – syarat Air Umpan

PH air umpan berkisar antara 8,5 sampai 9, kesadahan air sekecil mungkin, kandungan Alkanity total max 100 ppm, Phospat berkisar antara 20 sampai 40 ppm, Clorine  $\pm 75$  ppm, Sulphate  $\pm 200$  ppm, Silica sekecil mungkin ( $< 5$  ppm) dan Oksigen sekecil mungkin ( $< 0,005$  cc/l).

### VIII.4 Syarat – Syarat Air Ketel

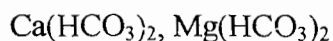
PH air umpan berkisar antara 8,5 sampai 9, Total hardness sekecil mungkin, Total alkanity berkisar antara 100 sampai 800 ppm, Phospat berkisar antara 20 samapai 40 ppm dan Clorine 500 ppm max.

### VIII.5 Kesadahan Air

Air yang terdapat di alam masih banyak mengandung garam – garam terlarut, berupa garam magnesium dan kalsium. Maka air alam dikatakan mempunyai kesadahan yang tinggi. Untuk menurunkan tingkat kesadahan dilakukan proses pelunakan (water treatment) yaitu menurunkan garam – garam yang mengandung didalamnya sekecil mungkin atau dihilangkan sama sekali agar air mempunyai tingkat kesadahan yang rendah.

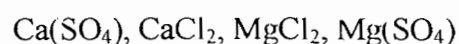
#### 1) Kesadahan yang bersifat sementara.

Kesadahan yang disebabkan oleh garam – garam karbonat seperti :



#### 2) Kesadahan yang bersifat tetap.

Kesadahan yang disebabkan oleh garam – garam non karbonat seperti :





Kesadahan yang bersifat sementara dapat dihilangkan dengan pemanasan, karena karbonat – karbonat tersebut akan mengendap sebagai karbonat normal yang merupakan lumpur yang dapat larut.

#### **VIII.6 Proses - proses Air Sebelum Masuk Ketel**

##### **A. Proses softening**

Adalah menghilangkan kesadahan yaitu menghilangkan Ca dan Mg. Proses softening dilakukan dalam tangki softener yang berisi natrium resin yang pada bawahnya terdapat batu – batu penyangga yang berfungsi juga sebagai filter.

Proses softening akan berjalan dengan baik, bila kesadahan air yang keluar berharga 0,26 jika melebihi angka tersebut maka resin perlu diregenerasi dengan menggunakan regeneran NaCl. Adapun langkah – langkahnya adalah sebagai berikut :

- Black wash

Bertujuan untuk menghilangkan Lumpur yang melekat pada resin, dimana lumpur tersebut menghambat pengikatan Ca dan Mg. Back wash dilakukan dengan cara mengalirkan air dari bagian bawah keatas sehingga kotoran akan terikat dengan aliran air.

- Pemberian garam NaCl

Bertujuan untuk meregenerasi resin yang telah mengikat Ca dan Mg dengan menggunakan larutan NaCl. Kebutuhan NaCl adalah 0,15 sampai 0,25 kg/ltr resin.

- Pencucian

Bertujuan untuk menghilangkan garam – garam yang terbentuk yaitu  $\text{CaCl}_2$  dengan menggunakan air yang dialirkan pada bagian atas.

B. Degassing

Adalah menghilangkan gas – gas yang terkandung dalam air dengan maksud mencegah korosi dalam boiler. Degassing atau daerasi ini terjadi didalam daerator. Dimana airnya keluar dari softener ditampung didalam tangki penampungan air lunak sebelum dialirkan kedalam daerator, kemudian daerator ini diinjeksikan steam sehingga gas  $\text{CO}_2$  dan  $\text{O}_2$  akan keluar.

C. Dosing

Adalah penambahan bahan – bahan kimia kedalam air sebelum masuk ke boiler. Bahan yang ditambahkan adalah  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  dan  $\text{NaSO}_3$ . Bila air terlalu asam maka akan dapat menyebabkan korosi, dan jika terlalu basa akan menyebabkan terjadinya kerak.

D. Elektromagnetik softener

Bertujuan untuk membuat ion  $\text{Ca}$  dan  $\text{Mg}$  yang tidak mengendap lagi dengan jalan melewati air dielektromagnetik sehingga terjadi pengacauan ion karena pengaruh dua magnet yang berbeda.

#### E. Pencegahan buih dan gelombang

Buih dan gelombang yang terjadi dalam ketel uap dapat menyebabkan timbulnya bintik – bintik air ikut dalam aliran uap, sehingga kualitas uap menurun. Adanya buih dan gelombang ini terjadi akibat adanya zat – zat padat yang melayang – layang, bahan – bahan organik, kadar garam terlalu tinggi, minyak dan zat – zat yang mudah menguap dalam ketel.

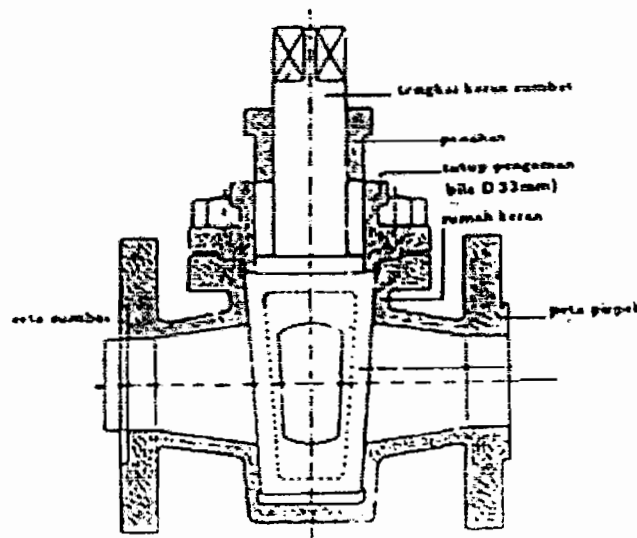
Adanya bintik – bintik air juga dipengaruhi oleh konstruksi ketel. Semakin besar ruangan uap dalam ketel akan semakin kecil kemungkinan bintik – bintik air ikut aliran uap. Untuk mencegah buih dan gelombang selain dengan cara penyulingan digunakan garam barium karbonat. Garam barium karbonat dapat menyebabkan terbentuknya endapan sulfat tanpa adanya kenaikan kadar soda dalam ketel.

## BAB IX

### ALAT – ALAT KEAMANAN KETEL

#### IX.1 Kran Blow Down

Kran untuk aparat pembuang ini berfungsi untuk mengeluarkan air dari dalam ketel sebagian atau seluruhnya. Kran ini dipasang pada bagian ditempat mengendapnya lumpur supaya pada waktu dikeluarkan lumpur juga ikut keluar, untuk ketel pipa air biasanya memakai dua buah kran buang untuk blow off dari ketel biasanya dipakai kran sumbat atau kran buka cepat (quick opening) karena kran ini tidak mudah tersumbat lumpur seperti kran bola air dan kotoran yang dikeluarkan ditampung lebih dahulu pada drum penampung blow off. Down ini biasanya selalu terisi dengan air hampir penuh sehingga pada waktu blow off air yang keluar keselokan pembuang dari drum blow off berupa air yang tidak terlalu panas.

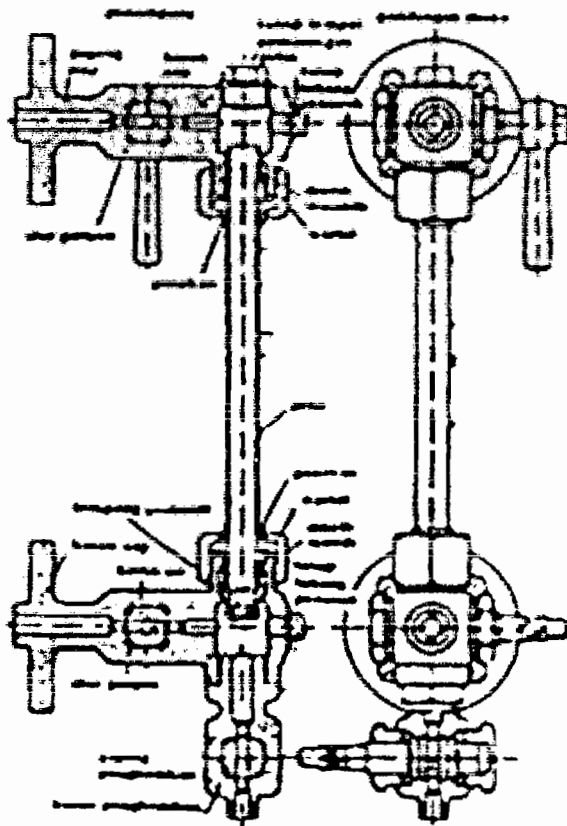


Gambar IX.1 Katup Penguras

(Sumber : Ir. Syamsir A. Muin, Pesawat – pesawat Konversi Energi, hal 344)

## IX.2 Gelas Penduga

Gelas penduga adalah alat untuk menunjukkan tinggi air didalam ketel, kerja alat ini berdasarkan hukum bejana berhubungan. Gelas penduga ini terbuat dari tabung gelas yang transparan yang dipasang tegak pada drum setinggi permukaan air dalam drum. Alat penduga ini terdiri dari tiga bagian yaitu : gagang atas terdapat kran uap, gagang bawah terdapat kran air dan kran cerat. Alat ini dapat dipergunakan sampai kurang lebih  $20 \text{ kg/cm}^2$ . Diameter luar tabung gelas kurang lebih 20 mm dan panjang 30 mm. Tebal dinding 2,5 – 3 mm. Gagang atas dihubungkan dengan ruang uap dari ketel dan gagang bawah dihubungkan dengan ruang air. Bila didalam gelas sama tinggi dan air didalam ketel.

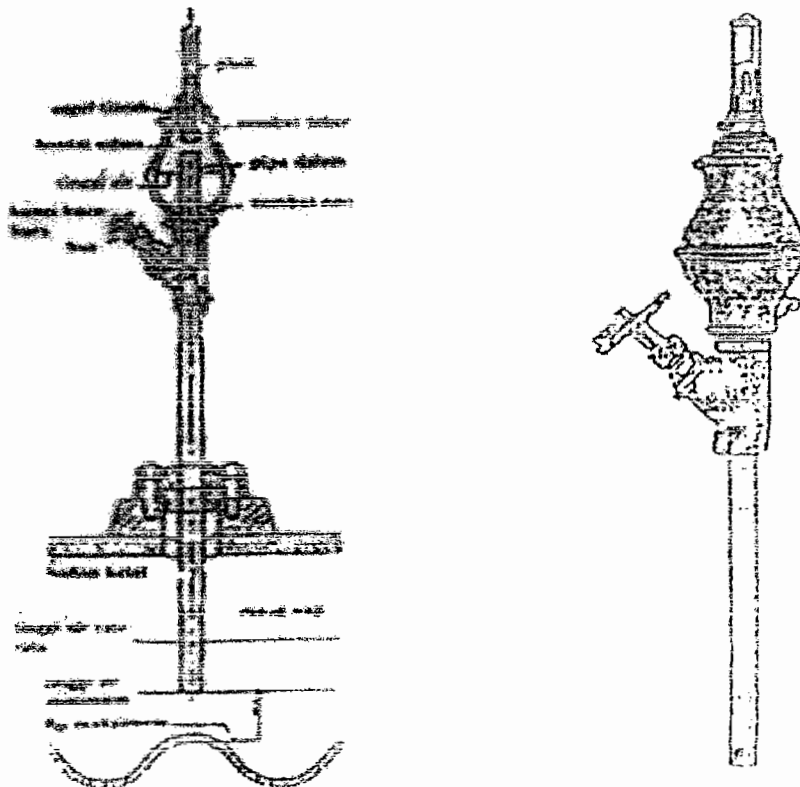


Gambar IX.2 Gelas Penduga

(Sumber : Ir. Syamsir A. Muin, Pesawat pesawat Konversi Energi, hal 350)

### IX.3 Peluit Bahaya

Alat ini berfungsi untuk memberitahukan kekurangan air didalam ketel. Alat ini bagian atasnya berbentuk seperti telur yang diatasnya diberi sebuah peluit, lubang dari peluit ini ditutup dengan sebuah sumbat dari paduan logam yang mudah lebur. Titik lebur dari campuran ini demikian rendahnya sehingga kalau bersinggungan saja dengan uap dari ketel sumbat ini akan melebur akibatnya uap akan melaluinya dan membunyikan peluit. Sedangkan bagian bawah dari tabung dihubungkan sebuah pipa dengan ruangan air ketel uap. Dan pada pipa tersebut diberi kunci (baut) atau sering disebut kura – kura yang berguna untuk membuka dan menutup saluran pipa.

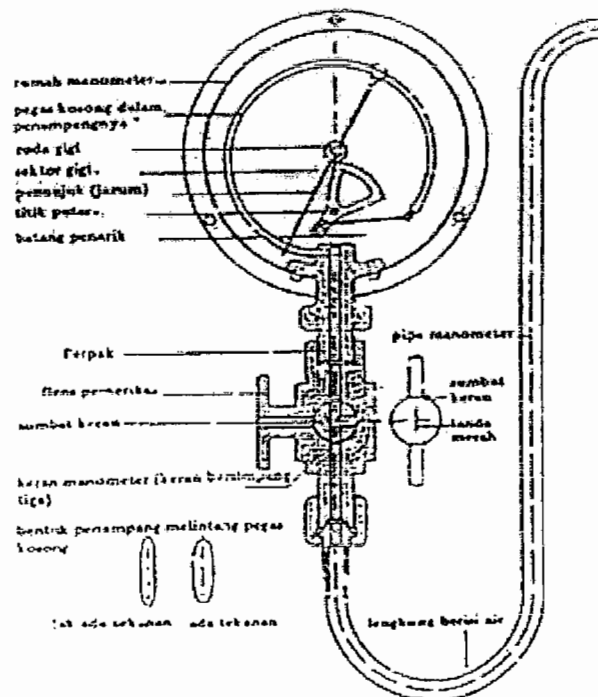


Gambar IX.3 Peluit Bahaya

(Sumber : Ir. Syamsir A. Muin, Pesawat – pesawat Konversi Energi, hal 358)

#### IX.4 Manometer (Pengukur Tekanan)

Manometer adalah alat penunjuk tekanan, dimana manometer disini untuk mengukur tekanan uap dalam ketel. Pemasangan manometer diletakkan pada daerah dimana uap tidak mengalir yaitu pada tangki sebelah atas. Manometer harus diletakkan ditempat dimana manometer harus mudah terbaca dan harus selalu kelihatan oleh operator. Manometer yang umum digunakan ialah manometer jenis bourdon yang terdiri dari pipa kecil yang berbentuk lingkaran dengan penampang bulat panjang yang pada satu ujungnya tertutup. Ujung yang terbuka dihubungkan dengan ruang uap ketel melalui saluran, oleh karena tekanan uap yang tinggi maka pipa yang berbentuk lingkaran akan berubah bentuk, perubahan bentuk ini akan memutar jarum manometer. Umumnya untuk satu ketel uap mempunyai minimum satu manometer.

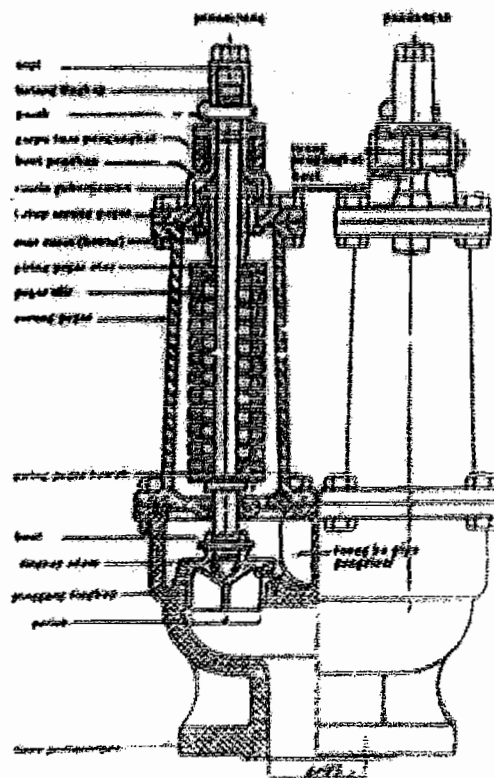


Gambar IX.4 Manometer Bourdon

(Sumber : Ir. Syamsir A. Muin, Pesawat – pesawat Konversi Energi, hal 362)

### IX.5 Katup Keamanan

Alat ini berfungsi untuk mengatur tekanan uap dari ketel supaya tetap stabil pada tekanan yang melebihi batas, jika ketel tidak mempunyai katup keamanan maka akan mengakibatkan timbulnya bahaya ledakan sedangkan jika memakai katup pengaman, bila terjadi tekanan melebihi batas maka otomatis katup akan membuka sehingga tekanan uapnya kembali ke tekanan semula dan katup pengaman akan tertutup kembali. Untuk ketel uap jenis lokomotif dipergunakan dua buah katup pengaman dengan beban pegas langsung, keuntungan dari sistem ini ialah momennya tetap pada setiap macam kedudukan alat keamanan yang ditimbulkan oleh tegangan pegas. Berikut adalah contoh dari konstruksi katup pengaman dengan beban pegas langsung.



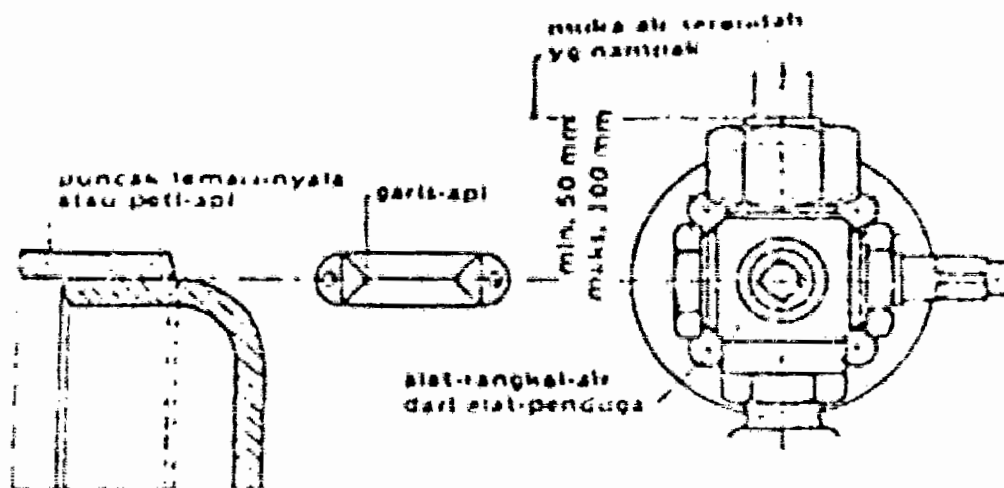
Gambar IX.5 Katup Keamanan Dengan Muatan Pegas Langsung

(Sumber : Ir. Syamsir A. Muin, Pesawat – pesawat Konversi Energi, hal 366)



### IX.6 Garis Api

Garis api untuk menunjukkan batas tertinggi aliran gas panas dalam ketel. Garis ini biasanya dibuat dari lempeng tembaga yang diberi garis yang diletakkan pada permukaan luar dinding ketel, sehingga garis dari lempeng tembaga tersebut tepat menunjukkan batas tertinggi dari aliran gas panas dari ketel. Garis api juga dipakai untuk mempertimbangkan tinggi permukaan air didalam ketel uap. Garis api berupa plat tembaga yang dipasang diluar ketel didekat gelas penduga. Batas terendah air didalam ketel  $\pm 50$  mm diatas garis api.

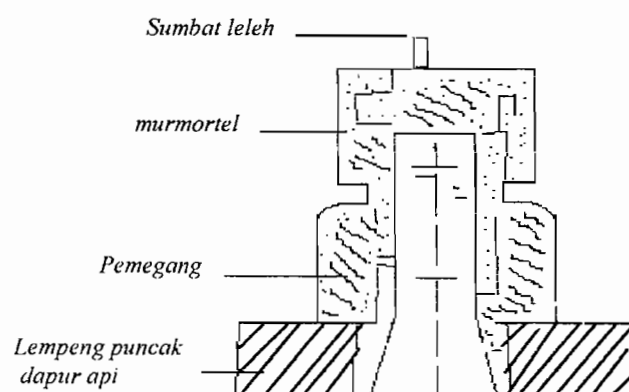


Gambar IX.6 Garis Api

(Sumber : Ir. Syamsir A. Muin, Pesawat – pesawat Konversi Energi, hal 360)

### IX.7 Sumbat Leleh (Prop Timah)

Sumbat ieleh biasanya dipasang pada ketel uap pipa api, hal ini untuk melindungi pemanasan yang berlebihan. Misal terjadi bila permukaan air sangat rendah. Sumbat ini biasanya terbuat dari bronze yang didalamnya (ditengahnya) berisi timah putih. Pemanasan sumbat leleh ini diletakkan pada batas minimum permukaan air didalam drum pada dinding ketel yang membatasi air dengan gas panas. Bila permukaan air turun melampaui batas minimum dalam waktu yang agak lama maka sumbat ini akan dipanasi hanya oleh gas panas yang tidak lagi didinginkan oleh air dalam ketel uap maka sumbat akan mencair dan akibatnya uap akan menyembur keluar kedaerah gas asap. Menyemburnya uap ini akan mengurangi suhu gas panas disamping itu akan menurunkan tekanan uap didalam ketel, sehingga kemungkinan meledaknya ketel berkurang atau dapat dihindari.



Gambar IX.7 Prop Timah

(Sumber : Ir. Syamsir A. Muin, Pesawat – pesawat Konversi Energi, hal 364)

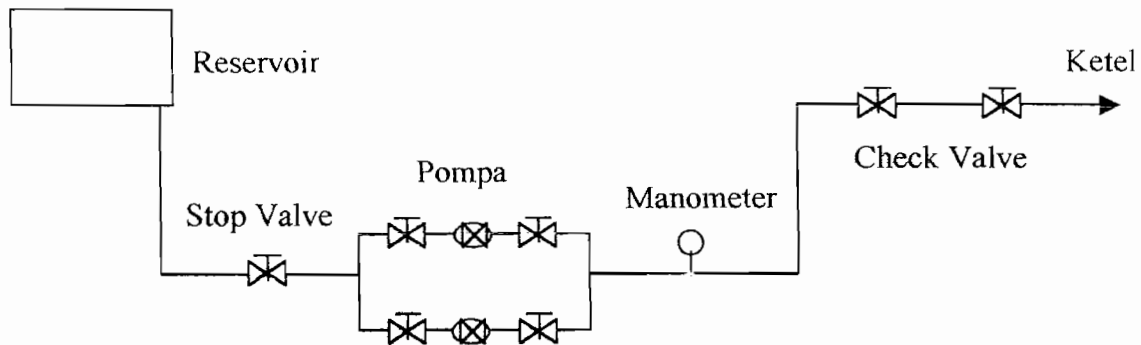
### **IX.8 Aparat Pengisi (Feed Connection)**

Aparat pengisi ketel ini terdiri dari kran penutup, katup anti balik, pipa – pipa yang diperlukan untuk mengalirkan air dan pompa pengisi ketel. Untuk pompa air pengisi ketel disyaratkan minimum dipasang dua buah yang diparalel bekerja bergantian. Kran pengisi ketel ini dipasang diantara pompa pengisi dan ketel dimana sebuah kran pengisi terdiri dari :

Kran penutup yang dipasang sedekat mungkin dengan dinding drum untuk menutup dan membuka sistem pengisi berfungsi untuk mengatur air masuk ketel. Ketel anti balik yang dapat menutup sendiri yang fungsinya untuk mencegah air jangan sampai mengalir balik pada waktu tekanan turun menjadi lebih rendah dari tekanan kerja ketel.

Hal ini dapat pula dilengkapi dengan kran otomatis (modulating valve). Bila air dalam drum naik lebih tinggi dari batas yang diizinkan maka akan menutup. Ia juga dapat mengatur sendiri terhadap perubahan beban sehingga kapasitas air isian serasi. Penutupan dari kran putar lebih baik tetapi pemutaran lebih cepat aus karena itu tipe kran tutup lebih banyak dipakai disebabkan proses membuka menutupnya kran lebih ringan dilakukan. Pada kran tipe kran tutup ini proses keausan lebih kecil dan perbaikannya lebih mudah dilakukan. Tetapi pada kran tutup penutupan lebih mudah terganggu bila ada sedikit kebocoran disekitar kran, sehingga penutupan kurang rapat. Oleh karena itu pada tipe kran tutup untuk kran pengisi air harus dilengkapi dengan kran coba. Untuk mengetahui apakah

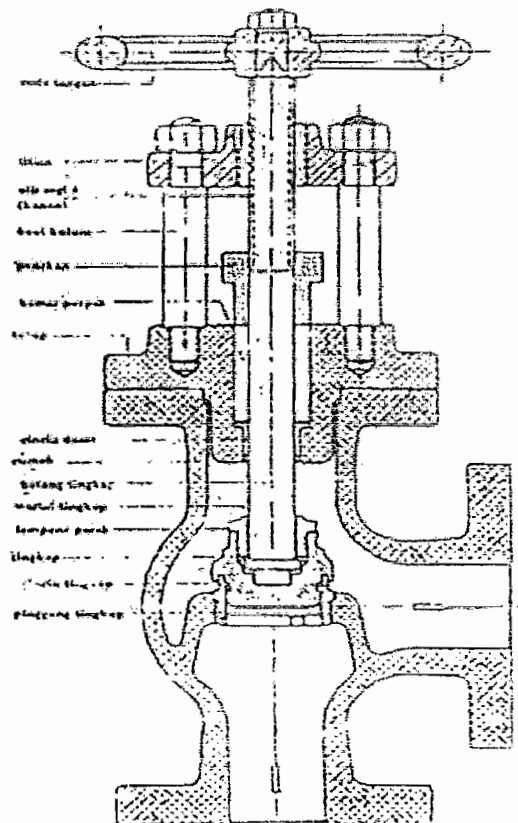
penutupan telah sempurna, bila kran coba dibuka air terus menerus keluar menunjukkan penutupan kurang rapat.



Gambar IX.8 : Kran penutup ini ada dua macam, kran putar dan kran tutup

### IX.9 Keran Uap Induk

Keran ini digunakan untuk membuka dan menutup saluran uap yang dihasilkan dalam silinder ketel yang akan menuju ke superheater.



Gambar IX.9. Keran Uap Induk

(Sumber : Ir. Syamsir A. Muin, Pesawat – pesawat Konversi Energi, hal 367)

## **BAB X**

### **OPERASI DAN PERAWATAN KETEL**

#### **X.1 Latar Belakang Operasi dan Perawatan**

Tujuan perawatan adalah untuk memaksimalkan produksi tenaga. ketersediaan setiap saat, keamanan dan kualitas namun dengan pertimbangan meminimumkan biaya dan pengaruhnya terhadap lingkungan. Sebelum terbentuk program perawatan yang handal, maka langkah – langkah komprehensif harus dilakukan. Unit Generator Uap terdiri dari berbagai komponen yang harus dapat bekerja sama, karena itu kerusakan salah satu komponen akan mengakibatkan masalah kecil atau besar terhadap komponen – komponen lain yang pada gilirannya akan mempengaruhi unit secara keseluruhan. Langkah pertama yang harus dilakukan adalah mengerti dan memahami potensi permasalahan dari komponen untuk membuat dan mengembangkan respon/tindakan yang semestinya:

#### **X.2 Cara Pengoperasian**

Ketel yang sedang beroperasi harus dapat dipantau tinggi airnya didalam ketel, sedangkan pengurangan air karena penguapan harus segera ditambah. Selain itu perlu pula selalu diketahui berapa tekanan uap didalam ketel dan harus mempunyai keyakinan bahwa tekanan uap tidak akan naik melebihi tekanan kerja, hingga ketel tetap aman.

Selanjutnya harus ada alat untuk mengeluarkan uap dari dalam ketel dan apabila ketel hendak dibersihkan, ketel harus dapat kosongkan. Untuk

keperluan tersebut dan lainnya, ketel perlu diberi keran dan sebagainya yang semuanya disebut alat pertolongan.

### **X.3 Alat Keamanan pengoperasian**

Produksi uap yang tidak merata akan berpengaruh secara langsung terhadap pemasukan bahan bakar, udara dan air isian ketel serta temperatur dan tekanan uap yang dihasilkan oleh ketel. Bila kebutuhan uap naik, maka produksi uap meningkat sehingga tinggi permukaan air didalam ketel dan tekanannya akan turun, sedangkan temperatur uap akan naik. Agar ketel beroperasi dengan aman dan tinggi permukaan air tidak terlalu rendah, maka perlu penambahan air isian ketel agar produksi uap tetap stabil baik tekanan maupun temperatur. Diperlukan juga penambahan panas yang berarti diperlukan penambahan bahan bakar dan udara pembakaran. Agar ketel beroperasi dengan aman dan sesuai dengan kebutuhan, maka setiap perubahan yang terjadi perlu dikontrol dan disesuaikan dengan kondisi baru yang diinginkan, oleh karena itu diperlukan sistem pengaturan dan keamanan otomatis yang sensitif dan peka terhadap perubahan yang terjadi.

Prinsip kerja pengaturan terhadap setiap perubahan yang terjadi dalam ketel akan diubah, dan diteruskan instrument menjadi sinyal kearah pengatur. Elemen alat pengaturan akan mengatur setiap perubahan yang terjadi serta mengirim sinyal pengaturan ke instrument operasi serta valve, damper dan lain – lain. Dengan sinyal yang dikirim berupa tekanan, temperatur ataupun dalam bentuk sinyal lain. Sistem keadaan otomatis akan

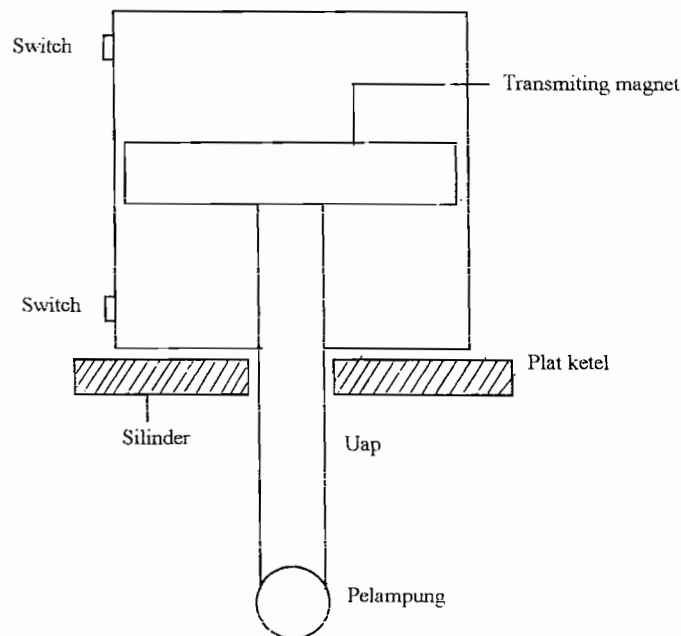
menyebabkan ketel berhenti beroperasi bila kondisi atau prosedur operasi ketel tidak memenuhi keamanan operasi.

Dalam perencanaan ketel uap ini digunakan 2 macam alat pengatur otomatis, yaitu :

- 1) Alat pengaturan otomatis berdasarkan level air.
- 2) Alat pengaturan otomatis berdasarkan perubahan tekanan.

### X.3.1 Alat pengaturan otomatis berdasarkan level air

Untuk menghidupkan dan mematikan pompa air, lampu tanda bahaya dan alarm secara otomatis berdasarkan tinggi rendahnya permukaan air didalam ketel digunakan sebuah “ *Contractor transmitting magnet* “.



Gambar X.1 Kontaktor Transmitting magnet

(Sumber : Pawito M Sontowiro, Pembangkit Uap, hal 84)

Gambar diatas memperlihatkan skema instalasi transmitting magnet. Alat ini terdiri magnet permanent yang dihubungkan dengan pelampung dan sebuah batang penghubung, sehingga dapat bergerak naik turun mengikuti perubahan permukaan air didalam ketel. Gerakan naik turunnya magnet akan menggerakkan kontak (switch) yang dipasang disekeliling transmitting tube dan dihubungkan ke pompa air isian, lampu – lampu tanda bahaya dan alarm.

Pada kondisi permukaan berada dalam batas normal, kedudukan transmitting magnet pada keadaan normal pula. Bila kondisi air turun diatas permukaan normal, maka magnet ikut bergerak turun dan menggerakkan saklar untuk menghidupkan pompa air isian, pompa air isian dipompa masuk kedalam ketel sehingga permukaan air didalam ketel juga kan terus naik. Naiknya permukaan air ini menyebabkan magnet ikut naik dan setelah permukaan air kembali pada batas normal, magnet akan menyentuh saklar untuk mematikan pompa, sehingga pompa berhenti.

Namun bila terjadi gangguan yang menyebabkan pompa tidak berhenti, sehingga air didalam ketel terus bertambah (permukaan air naik), maka magnet akan menghubungkan saklar lampu tanda bahaya dan membunyikan alarm, pada keadaan ini operator harus segera mematikan lampu secara manual.

Sebaliknya pada waktu permukaan air turun dibawah normal, yaitu pada saat magnet menyentuh saklar yang menghidupkan



pompa, tetapi karena adanya gangguan dan pompa tidak dapat hidup sehingga permukaan air terus turun, maka keadaan magnet akan menghubungkan saklar tanda bahaya dan membunyikan alarm sehingga pompa dapat langsung dimatikan secara manual oleh operator.

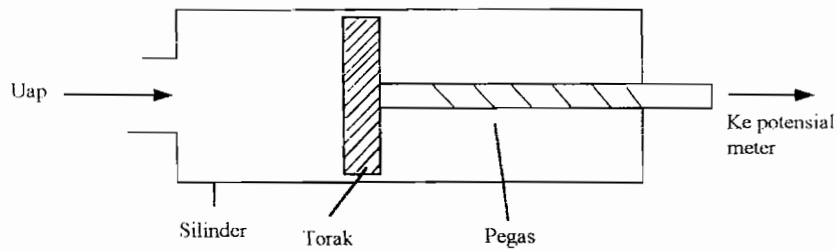
### **X.3.2 Alat pengaturan otomatis berdasarkan perubahan tekanan**

Pada pengaturan ini yang diatur adalah pembakaran yang dilakukan oleh burner, yaitu dengan mengatur jumlah penambahan batubara yang akan dibakar. Prinsip kerja alat pengaturan otomatis berdasarkan perubahan tekanan adalah sebagai berikut :

Apabila kondisi beban ketel naik, maka tekanan uap didalam ketel akan turun, sebaliknya bila beban ketel turun, maka tekanan ketel akan naik. Dari pengertian dasar ini, maka diatur agar jumlah bahan bakar yang dibakar dapat disesuaikan dengan kondisi ini. Untuk melakukan pengaturan ini digunakan silinder dan batang torak berpegas (Gambar X.2)

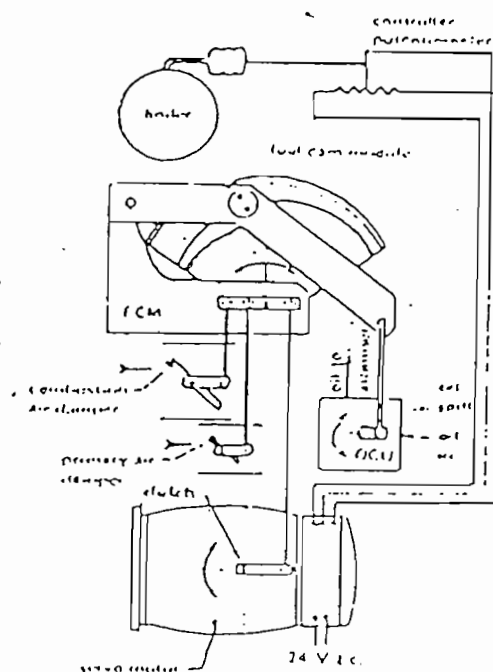
Bila tekanan didalam ketel naik, maka torak akan bergerak kekanan, sebaliknya bila tekanan didalam ketel turun, maka torak akan bergerak kekiri. Gerakan torak ini akan menyebabkan perubahan pada potensiometer dan selanjutnya akan mengatur putaran dari motor servo, kemudian oleh motor servo diteruskan lagi untuk mengatur pembukaan dumper udara (*air dumper*) dan mengatur penambahan bahan bakar batubara. (Gambar X.3) memperlihatkan diagram

perlengkapan dan cara kerja alat yang digunakan yaitu *modulating pressure control*.



Gambar X.2 Silinder torak berpegas

(Sumber : Pawito M Sontowiro, Pembangkit Uap, hal 80)



Gambar X.3 Modulating Pressure Control Device

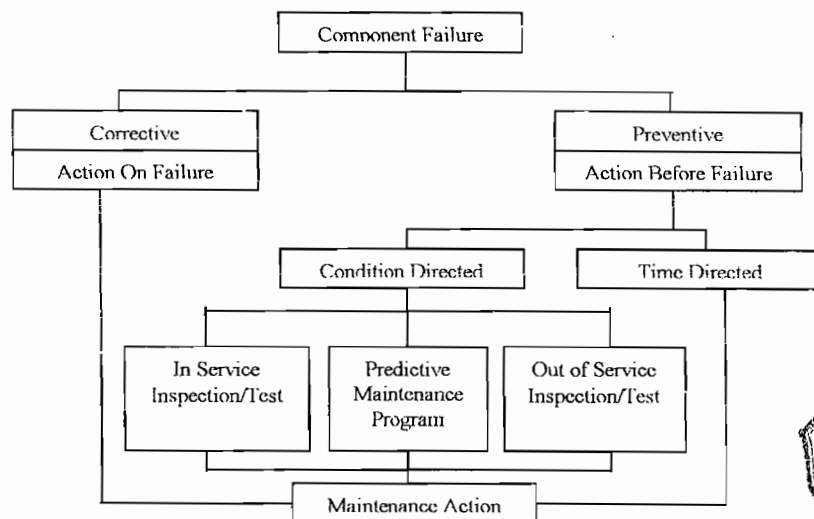
(Sumber : Pawito M Sontowiro, Pembangkit Uap, hal 82)

#### X.4 Program Operasi dan Perawatan

Secara sistematis ini dapat dilakukan dengan membuat *Failure Mode Evaluation Chart* (FMEC) yang berisi mode kerusakan atau degradasi untuk masing – masing komponen berdasar efeknya terhadap :

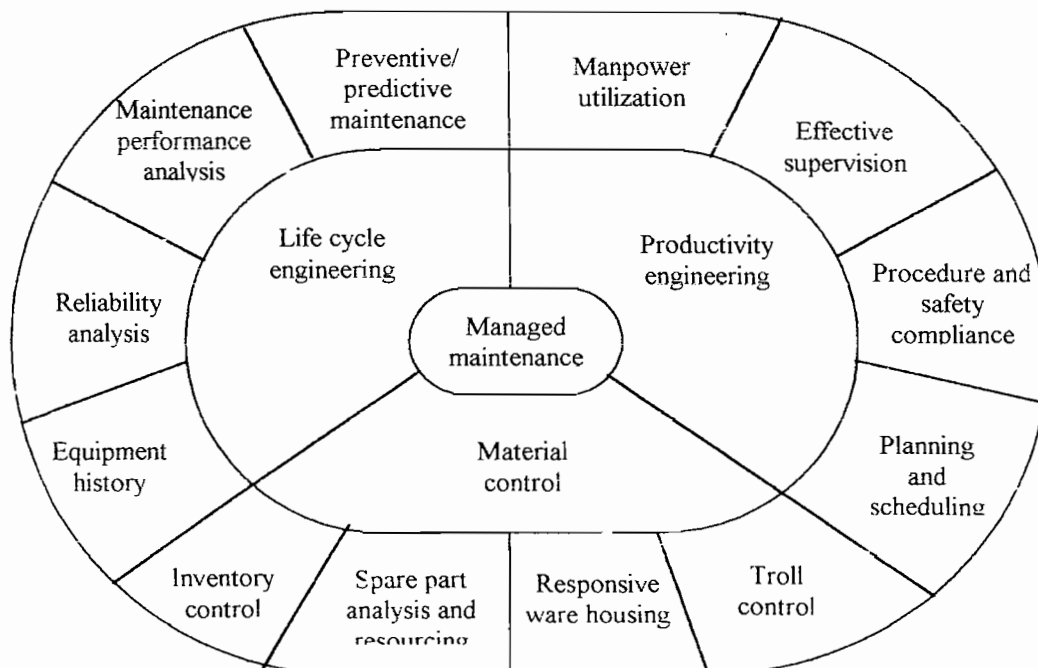
- Keamanan (*Safety*)
- Konsekuensi operasi (*Operational Consequence*)
- Tingkat penurunan produksi (*Degradation of Production*)
- Pengaruh lingkungan (*Impact on The Environment*)

Dari daftar yang telah terbentuk maka dapat disusun kegiatan – kegiatan apa yang dapat dilakukan untuk mengantisipasi maupun mengatasinya dan ini disebut table sistematis yaitu *Potential Maintenance Action Tables* (PMAT). Tindakan/kegiatan tersebut dapat bersifat *pro-active* dan dapat juga bersifat *reactive response* dan ini disebut *Component Failure Mode* (CFM).



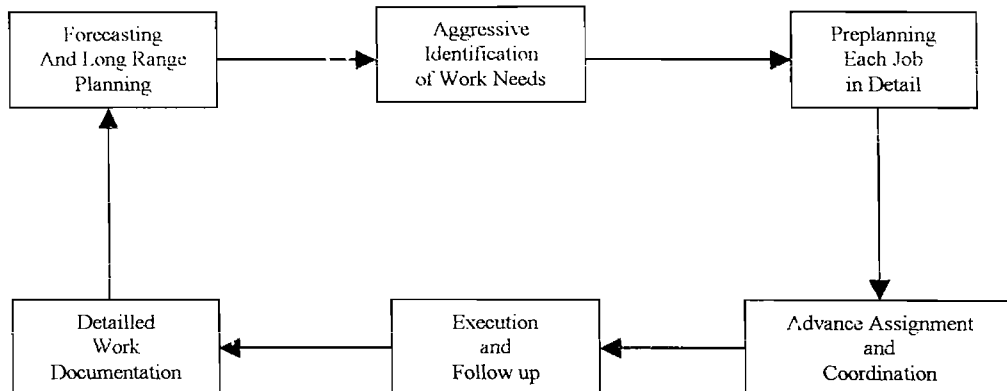
Gambar X.4. Component Failure Mode (CFE)

- **Corrective maintenance procedures** diambil untuk mengembalikan kondisi rusak (*failure*) suatu komponen atau sistem ke keadaan kerja. Untuk jalur ini keputusan yang ada biasanya melibatkan penggantian atau perbaikan (*repair*) komponen tersebut yaitu berupa *Maintenance Action*.
- **Preventive maintenance procedures** adalah kegiatan yang dilakukan untuk menghindari atau meminimumkan kemungkinan kerusakan (*failure*). *Preventive actions* dapat mengacu pada *Time – Directed* atau *Condition – Directed*. *Time – directed* adalah *maintenance action* yang dilakukan terhadap suatu komponen atau sistem dengan dasar karena dapat didefinisikan atau diketahui secara cukup baik umur penggunaannya (*life expectancy*) atau dapat juga dengan dasar karena terlalu mahal biayanya bila dilakukan analisis *life expectancy* – nya dibanding langsung dilakukan penggantian (*replacement*).



Gambar X.5. Managed Maintenance

Untuk setiap saat dapat mempertahankan segala sesuatu yang sudah lancar dan memperbaiki hal – hal yang sekiranya perlu diperbaiki/diperlancar maka kaidah proses *flow* dalam proses maintenance dapat digunakan sebagai berikut :



Gambar X.6. Aliran proses maintenance

Adapun *condition – directed activities* adalah tindakan sesuai keperluan yang dilakukan berdasarkan beberapa kondisi teramati ataupun terukur (analisis). Kondisi – kondisi ini dapat terdeteksi pada inspeksi atau testing saat *in – service* (*plant* atau generator uap saat beroperasi) atau juga saat *out – service* atau dapat juga kondisi tersebut diperoleh berdasarkan hasil suatu *predictive maintenance program*.

Sebagai contoh aktivitas *condition – directed* adalah penggantian *regenerative* ekonomiser yang didasari pengamatan pada keadaan pipa – pipa ekonomiser tersebut atau penggantian bantalan *fan* karena adanya vibrasi yang kentara dari analisa vibrasi. Jadi semua itu berdasar inspection. *Predictive maintenance program* dapat menduga berdasar analisis, kapan suatu komponen perlu tindakan *maintenance*. Bila semua CFM digabung

maka terbentuklah *Maintenance program* untuk seluruh fasilitas Generator Uap yang dimaksud.

Saat dilakukan *Maintenance Action*, maka management program terlibat pada pengontrolan dan pengukuran efektivitas, karena action tersebut melibatkan tiga elemen yaitu : *material, personnel maupun technology* yang juga melibatkan *cost* atau biaya. Suatu organisasi *maintenance* harus mampu untuk mengidentifikasi, merencanakan, mengorganisasikan, memilih serta mengontrol kombinasi yang tepat dari ketiga elemen tersebut. Dapat digambarkan disini suatu *maintenance* yang ter – manage (MMP = *Managed Maintenance Program*) dengan baik yang pada intinya berisi prosedur – prosedur yang terdefiniskan dengan baik yang mengarahkan proses maupun aliran *maintenance action* dan peralatan yang ditopang oleh sistem *database* yang terprogram komputer yang akan mendukung dan mengusahakan proses – proses operasi/action secara lancar.

Keberhasilan implementasi MMP tergantung pada tiga hal :

1. Kondisi awal dari suatu fasilitas (dalam hal ini generator uap).
2. Tujuan yang ditetapkan oleh *management*.
3. Motivasi dari personal yang terlibat.

Seberapa jauh keberhasilan peningkatan (*improvement*) yang diharapkan dengan implementasi MMP tersebut dapat diperkirakan berdasar *record* yang telah dilakukan oleh Babcock dan Wilcox yaitu :

Area of implementation	– <i>Worker Productivity</i>
– <i>Availability</i>	– <i>Overtime</i>

- <i>Cost of maintenance</i>	25 – 100 %
Range of improvement	<i>Reduced to &lt; 5 %</i>
0,5 – 5 %	<i>Reduced by 10 – 40 %</i>

Bila MMP ini dilaksanakan setiap saat, maka jadilah Routine Maintenance.

Secara garis besar, *routine maintenance* untuk suatu generator uap dapat dilakukan pada keadaan beroperasi (*in – service routine maintenance*) dan pada keadaan tidak beroperasi (*Outage routine maintenance*). Kegiatan – kegiatan apa yang dilakukan pada kedua keadaan tersebut dapat dilihat dibawah ini :

#### **X.4.1 Perawatan pada saat ketel beroperasi**

Bidang keamanan (*safety*)

- Furnace and setting untuk mencegah *explosion furnace*.
  - a. *Up – to – date operating procedure* dan *operation training*.
  - b. Pengecekan secara rutin *combustion monitoring equipment* oleh personel operasi atau operator.
  - c. Deteksi bahan bakar tak terbakar dalam gas panas.
  - d. Mengusahakan dan memonitor perbandingan kadar bahan bakar dan udara pembakar yang tepat.
- *Pressure part* untuk melindungi dari *thermal stress* yang berlebih (*overheating*).
  - a. Pengecekan relief *pressure valve*.
  - b. Pengecekan *water level instrument*.
  - c. Monitoring dan maintaining *feed water*.

- *Monitoring temperature* untuk mengecek *proper maintain*.
  - a. *Metal temperature instrument*.
  - b. *Gas temperature instrument*.
  - c. *Steam and water temperature instrument*.
- *Monitoring pressure* untuk *periodic maintenance and operational check*.
  - a. *Water and steam pressure*.
  - b. *Differential pressure furnace*.
- *Maintaining for efficiency* dengan memperhatikan *losses* yang terjadi.
  - a. Observasi *dry gas losses* dengan dua parameter temperatur dan berat gas keluar dari cerobong.

#### **X.4.2 Perawatan pada saat ketel tidak beroperasi**

- Pembersihan dan inspeksi internal untuk unit tekanan rendah.
  - a. Inspeksi kebocoran drum.
  - b. Inspeksi *chack*.
- Untuk unit tekanan tinggi.
  - a. Inpeksi dan pembersihan *deposit*.
  - b. *Crack* dan kebocoran.
- Pembersihan luar dapat dilakukan dengan :
  - a. Pembersihan akumulasi *ash*.
  - b. *Scale* pada bagian luar pipa.
- Inspeksi luar dilakukan terutama pada :



- a. *Tube* terhadap *overheating*.
- b. *Tube* terhadap erosi dan korosi.
- c. *Tube* terhadap *misalignment*
- d. *Tube* terhadap *slagging* atau *pouling* deposit.
- e. Preparasi bahan bakar dan peralatan pembakaran.
- f. *Refractory*.
- g. *Flues, ducts, dampers* serta *wind boxes*.
- h. *Isolasi* dan *casing*.
- i. *Instrument* dan kontrol.
- *Repair* (perbaikan) untuk *pressure part*.
  - a. *Repair by welding*.
  - b. Penggantian bagian dan *tube*.
  - c. *Seal welding*.
- *Repair* (perbaikan) untuk *non pressure part*.
  - a. *Pulverizer maintenance*.
  - b. *Air reater maintenance*.
  - c. *Soot plowers*.
  - d. *Rotating machinery*.

Semua harus dilakukan dengan *prosedur safety* dan mengutamakan *safety* (keamanan).

## **BAB XI**

### **KESIMPULAN**

Berdasarkan uraian diatas serta data – data yang diambil dalam perancangan ketel uap ini maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

Spesifikasi ketel :

- Daya generator uap : 60 kW
- Kapasitas ketel : 133,128 kg/jam
- Tekanan kerja : 14 kg/cm<sup>2</sup>
- Bahan bakar : Batubara
- Temperatur air isian : 27 °C
- Temperatur uap hasil : 220 °C
- Bahan plat silinder ketel : Baja karbon (SA 515 65)
- Diameter luar silinder : 30,254 in = 771 mm
- Diameter dalam silinder : 29,527 in = 750 mm
- Tebal total plat silinder : 1,663 in = 42,25 mm
- Panjang total ketel : 121,732 in = 3092 mm
- Effisiensi ketel : 80 %
- Bahan isolasi ketel : Glasswool
- Pengerjaan : Pengelasan dan keling

## Bagian – bagian utama ketel uap lokomotif

## 1. Ruang bakar

- Bahan plat : Baja karbon (SA 515 65)
- Lebar : 19,685 in = 500 mm
- Panjang : 19,685 in = 500 mm
- Tinggi : 19,685 in = 500 mm
- Tebal plat : 0,668 in = 16,975 mm

## 2. Pipa – pipa api

- Bahan pipa : Baja karbon (SA 106 C)
- Diameter luar : 1,315 in = 33,4 mm
- Diameter dalam : 1,049 in = 26,64 mm
- Tebal pipa : 0,133 in = 3,38 mm
- Panjang pipa : 78,74 in = 2000 mm
- Jumlah pipa : 28 buah

## 3. Pipa superheater

- Bahan pipa : Baja karbon (SA 106 C)
- Diameter luar : 1,050 in = 26,67 mm
- Diameter dalam : 0,824 in = 20,93 mm
- Tebal pipa : 0,113 in = 2,87 mm
- Panjang pipa : 60 in = 1524 mm
- Jumlah pipa : 5 buah

#### 4. Cerobong

- Bahan : Baja karbon (SA 515 65)
- Tinggi : 29,52 in = 749,817 mm
- Diameter : 11,4 in = 289,56 mm

## DAFTAR PUSTAKA

- Ashton M., *Boiler Efficiency and Safety*, The Mac Millan Press LTD London and Basing Stoke, 1961
- Babcock and Willcox., *Steam Generator and Use*, Babcock and Willcox Company, New York, 1972
- Carl D. Shield., *Boiler Type Characteristic and Function*, Mc Grawhill Book Company, New York, 1972
- Charles T. Littleton., *Industrial Piping*, Mc Grawhill Book Company, New York, 1961
- Djokosetyardjo M.J., *Ketel Uap*, PT. Pradnya Paramita, Jakarta, 1987
- Donald R. Pitts., *Teori dan Soal Perpindahan Kalor*, Alih Bahasa E. Jasfi, Erlangga, Jakarta, 1987
- Evert B. Woodruff and Herbert B. Lammers., *Steam Plant Operation*, Mc Grawwhill Book Company, New York, 1977.
- Holman J.P., *Perpindahan Panas*, Alih Bahasa E. Jasfi, Erlangga, Jakarta, 1984.
- Nainggolan W.S., *Teori dan Soal Penyelesaian Termodinamika*, Amriko, Bandung, 1987
- Otto de Lorenzi M.E., *Combustion Engineering*, Combustion Engineering Superheater Inc, New York, 1949
- Pawito M. Sontowiro., *Pembangkit Uap*, Institut Teknologi Bandung
- Surbakti B.M., *Ketel Uap "Pesawat Tenaga Uap I"*, PT. Mutiara Solo, Surakarta, 1985
- Stolk kros., *Elemen Mesin Konstruksi Bangunan Mesin*
- Syamsir a Muin., *Pesawat – Pesawat Konversi Energi I*, Rajawali, Jakarta, 1988
- Tambunan S.M., *Ketel Uap*, PT. Karya Agung, Jakarta

# LAMPIRAN

**Tabel 1. Thermodynamic of Saturated Water and Steam – Pressure table**

Saturated water–Pressure table

Press. MPa $P$	Sat. temp. °C $T_{sat}$	Specific volume m <sup>3</sup> /kg		Internal energy kJ/kg			Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/(kg·K)		
		Sat. liquid $v_f$	Sat. vapor $v_g$	Sat. liquid $u_f$	Evap. $u_{fg}$	Sat. vapor $u_g$	Sat. liquid $h_f$	Evap. $h_{fg}$	Sat. vapor $h_g$	Sat. liquid $s_f$	Evap. $s_{fg}$	Sat. vapor $s_g$
0.100	99.63	0.001 043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2256.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001 046	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001 053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001 057	1.0036	486.30	2038.1	2524.9	486.98	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001 061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001 064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001 067	0.7167	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001 070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6406	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001 073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001 076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001 079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001 081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001 084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001 088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001 093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001 097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	655.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001 101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001 104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.28	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001 108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001 112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001 115	0.2404	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6626
0.85	172.96	0.001 118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001 121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.63	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001 124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001 127	0.1944	761.68	1822.0	2583.6	762.81	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001 133	0.17753	780.09	1806.3	2586.4	781.34	2003.4	2781.7	2.1793	4.3714	6.5536
1.20	187.99	0.001 139	0.16333	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1988.2	2784.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001 144	0.15125	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1977.7	2787.6	2.2516	4.2438	6.4953
1.40	195.07	0.001 149	0.14084	828.70	1764.1	2592.8	830.30	1959.7	2790.0	2.2842	4.1850	6.4693
1.50	198.32	0.001 154	0.13177	843.16	1751.3	2594.5	844.89	1947.3	2792.2	2.3150	4.1298	6.4448
1.75	205.76	0.001 166	0.11349	876.46	1721.4	2597.8	878.50	1917.9	2796.4	2.3851	4.0044	6.3896
2.00	212.42	0.001 177	0.09963	906.44	1693.8	2600.3	908.79	1890.7	2799.5	2.4474	3.8935	6.3409
2.25	218.45	0.001 187	0.08875	933.83	1668.2	2602.0	936.49	1865.2	2801.7	2.5035	3.7937	6.2972
2.5	223.99	0.001 197	0.07998	959.11	1644.0	2603.1	962.11	1841.0	2803.1	2.5547	3.7028	6.2575
3.0	233.90	0.001 217	0.06668	1004.78	1599.3	2604.1	1008.42	1795.7	2804.2	2.6457	3.5412	6.1869
3.5	242.60	0.001 235	0.05707	1045.43	1558.3	2603.7	1049.75	1753.7	2803.4	2.7253	3.4000	6.1253
4	250.40	0.001 252	0.04978	1082.31	1520.0	2602.3	1087.31	1714.1	2801.4	2.7964	3.2737	6.0701
5	263.99	0.001 286	0.03944	1147.81	1449.3	2597.1	1154.23	1640.1	2794.3	2.9202	3.0532	5.9734
6	275.54	0.001 319	0.03244	1205.44	1384.3	2589.7	1213.35	1571.0	2784.3	3.0267	2.8625	5.8892
7	285.88	0.001 351	0.02737	1257.55	1323.0	2580.5	1267.00	1505.1	2772.1	3.1211	2.6922	5.8133
8	295.06	0.001 384	0.02352	1305.57	1264.2	2569.8	1316.64	1441.3	2758.0	3.2068	2.5364	5.7432
9	303.40	0.001 418	0.02048	1350.51	1207.3	2557.8	1363.26	1378.9	2742.1	3.2858	2.3915	5.6722
10	311.06	0.001 452	0.018026	1393.04	1151.4	2544.4	1407.56	1317.1	2724.7	3.3596	2.2544	5.6141
11	318.15	0.001 489	0.015987	1433.7	1096.0	2529.8	1450.1	1255.5	2705.6	3.4295	2.1233	5.5527
12	324.75	0.001 527	0.014263	1473.0	1040.7	2513.7	1491.3	1193.6	2684.9	3.4962	1.9952	5.4924
13	330.93	0.001 567	0.012780	1511.1	985.0	2496.1	1531.5	1130.7	2662.2	3.5606	1.8718	5.4323
14	336.75	0.001 611	0.011485	1548.6	928.2	2476.8	1571.1	1066.5	2637.6	3.6232	1.7485	5.3717
15	342.24	0.001 658	0.010337	1585.6	869.8	2455.5	1610.5	1000.0	2610.5	3.6846	1.6249	5.3098
16	347.44	0.001 711	0.009306	1622.7	809.0	2431.7	1650.1	930.6	2580.6	3.7461	1.4994	5.2455
17	352.37	0.001 770	0.008364	1660.2	744.8	2405.0	1690.3	856.9	2547.2	3.8079	1.3698	5.1777
18	357.06	0.001 840	0.007489	1698.9	675.4	2374.3	1732.0	777.1	2509.1	3.8715	1.2329	5.1044
19	361.54	0.001 924	0.006657	1739.9	598.1	2338.1	1776.5	688.0	2464.5	3.9388	1.0839	5.0228
20	365.81	0.002 036	0.005834	1785.6	507.5	2293.0	1826.3	583.4	2409.7	4.0139	0.9130	4.9265
21	369.89	0.002 207	0.004952	1842.1	388.5	2230.6	1885.4	446.2	2334.6	4.1075	0.6938	4.8013
22	373.80	0.002 742	0.003566	1961.9	125.2	2087.1	2022.2	143.4	2165.6	4.3110	0.2216	4.5327
22.09	374.14	0.003 155	0.003155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

Sumber : Thermodynamic Properties of Saturated Water and Steam., hal. 873

**Tabel 2. Thermodynamic of Superheated Water Steam**

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/(kg·K)	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/(kg·K)	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/(kg·K)
$P = 1.00 \text{ MPa (179.91°C)}$					$P = 1.20 \text{ MPa (187.99°C)}$				$P = 1.40 \text{ MPa (195.07°C)}$			
Sat.	0.194 44	2583.6	2778.1	6.5865	0.163 33	2586.8	2784.8	6.5233	0.140 84	2592.2	2790.0	6.4693
200	0.2060	2621.9	2827.9	6.6940	0.169 30	2612.8	2815.9	6.5898	0.143 02	2603.1	2803.3	6.4975
250	0.2327	2709.9	2942.6	6.9247	0.192 34	2704.2	2935.0	6.8294	0.163 50	2698.3	2927.2	6.7457
300	0.2579	2793.2	3051.2	7.1229	0.2138	2789.2	3045.8	7.0317	0.182 28	2785.2	3040.4	6.9534
350	0.2825	2875.2	3157.7	7.3011	0.2345	2872.2	3153.6	7.2121	0.2003	2869.2	3149.5	7.1360
400	0.3066	2957.3	3263.9	7.4651	0.2548	2954.9	3260.7	7.3774	0.2178	2952.5	3257.5	7.3026
500	0.3541	3124.4	3478.5	7.7622	0.2946	3122.8	3476.3	7.6759	0.2521	3121.1	3474.1	7.6027
600	0.4011	3296.8	3697.9	8.0290	0.3339	3295.6	3696.3	7.9435	0.2860	3294.4	3694.8	7.8710
700	0.4478	3475.3	3923.1	8.2731	0.3729	3474.4	3922.0	8.1881	0.3195	3473.6	3920.8	8.1160
800	0.4943	3660.4	4154.7	8.4996	0.4118	3659.7	4153.8	8.4148	0.3528	3659.0	4153.0	8.3431
900	0.5407	3852.2	4392.9	8.7118	0.4505	3851.6	4392.2	8.6272	0.3861	3851.1	4391.5	8.5556
1000	0.5871	4050.5	4637.6	8.9119	0.4892	4050.0	4637.0	8.8274	0.4192	4049.5	4636.4	8.7559
1100	0.6335	4255.1	4888.6	9.1017	0.5278	4254.6	4888.0	9.0172	0.4524	4254.1	4887.5	8.9457
1200	0.6798	4465.6	5145.4	9.2822	0.5665	4465.1	5144.9	9.1977	0.4855	4464.7	5144.4	9.1262
1300	0.7261	4681.3	5407.4	9.4543	0.6051	4680.9	5407.0	9.3698	0.5186	4680.4	5406.5	9.2984
$P = 1.60 \text{ MPa (201.41°C)}$					$P = 1.80 \text{ MPa (207.15°C)}$				$P = 2.00 \text{ MPa (212.42°C)}$			
Sat.	0.123 80	2596.0	2794.0	6.4218	0.110 42	2598.4	2797.1	6.3794	0.099 63	2600.3	2799.5	6.3409
225	0.132 87	2644.7	2857.3	6.5518	0.116 73	2636.6	2846.7	6.4808	0.103 77	2628.3	2835.8	6.4147
250	0.141 84	2692.3	2919.2	6.6732	0.124 97	2686.0	2911.0	6.6066	0.111 44	2679.6	2902.5	6.5453
300	0.158 62	2781.1	3034.6	6.8844	0.140 21	2776.9	3029.2	6.8226	0.125 47	2772.6	3023.5	6.7664
350	0.174 56	2866.1	3145.4	7.0694	0.154 57	2863.0	3141.2	7.0100	0.138 57	2859.8	3137.0	6.9563
400	0.190 05	2950.1	3254.2	7.2374	0.168 47	2947.7	3250.9	7.1794	0.151 20	2945.2	3247.6	7.1271
500	0.2203	3119.5	3472.0	7.5390	0.195 50	3117.9	3469.8	7.4825	0.175 68	3116.2	3467.6	7.4317
600	0.2500	3293.3	3693.2	7.8080	0.2220	3292.1	3691.7	7.7523	0.199 60	3290.9	3690.1	7.7024
700	0.2794	3472.7	3919.7	8.0535	0.2482	3471.8	3918.5	7.9983	0.2232	3470.9	3917.4	7.9487
800	0.3086	3658.3	4152.1	8.2808	0.2742	3657.6	4151.2	8.2258	0.2467	3657.0	4150.3	8.1765
900	0.3377	3850.5	4390.8	8.4935	0.3001	3849.9	4390.1	8.4386	0.2700	3849.3	4389.4	8.3855
1000	0.3668	4049.0	4635.8	8.6938	0.3260	4048.5	4635.2	8.6391	0.2933	4048.0	4634.6	8.5901
1100	0.3958	4253.7	4887.0	8.8837	0.3518	4253.2	4886.4	8.8290	0.3166	4252.7	4885.9	8.7800
1200	0.4248	4464.2	5143.9	9.0643	0.3776	4463.7	5143.4	9.0096	0.3396	4463.3	5142.9	8.9607
1300	0.4538	4679.9	5406.0	9.2364	0.4034	4679.5	5405.6	9.1818	0.3631	4679.0	5405.1	9.1329
$P = 2.50 \text{ MPa (223.99°C)}$					$P = 3.00 \text{ MPa (233.90°C)}$				$P = 3.50 \text{ MPa (242.60°C)}$			
Sat.	0.079 98	2603.1	2803.1	6.2575	0.066 68	2604.1	2804.2	6.1869	0.057 07	2603.7	2803.4	6.1253
225	0.080 27	2605.6	2806.3	6.2639								
250	0.087 00	2662.6	2880.1	6.4085	0.070 58	2644.0	2855.8	6.2872	0.058 72	2623.7	2829.2	6.1749
300	0.098 90	2761.6	3008.8	6.6438	0.081 14	2750.1	2993.5	6.5390	0.068 42	2738.0	2977.5	6.4461
350	0.109 76	2851.9	3126.3	6.8403	0.090 53	2843.7	3115.3	6.7426	0.076 78	2835.3	3104.0	6.6579
400	0.120 10	2939.1	3239.3	7.0148	0.099 36	2932.8	3230.9	6.9212	0.084 53	2926.4	3222.3	6.8405
450	0.130 14	3025.5	3350.8	7.1746	0.107 87	3020.4	3344.0	7.0534	0.091 96	3015.3	3337.2	7.0052
500	0.139 93	3112.1	3462.1	7.3234	0.116 19	3108.0	3456.5	7.2338	0.099 18	3103.0	3450.9	7.1572
600	0.159 30	3288.0	3686.3	7.5960	0.132 43	3285.0	3682.3	7.5085	0.113 24	3282.1	3678.4	7.4339
700	0.178 32	3468.7	3914.5	7.8435	0.148 38	3466.5	3911.7	7.7571	0.125 99	3464.3	3908.8	7.6837
800	0.197 16	3655.3	4148.2	8.0720	0.164 14	3653.5	4145.9	7.9862	0.140 56	3651.8	4143.7	7.9134
900	0.215 90	3847.9	4387.6	8.2853	0.179 80	3846.5	4385.9	8.1999	0.154 02	3845.0	4384.1	8.1276
1000	0.2346	4048.7	4633.1	8.4861	0.195 41	4045.4	4631.6	8.4009	0.167 43	4044.1	4630.1	8.3288
1100	0.2532	4251.5	4884.6	8.6762	0.210 98	4250.3	4883.3	8.5912	0.180 83	4249.2	4881.9	8.5192
1200	0.2718	4462.1	5141.7	8.8569	0.226 52	4460.9	5140.5	8.7720	0.194 15	4459.8	5139.3	8.7000
1300	0.2905	4677.8	5404.0	9.0291	0.242 06	4676.6	5402.8	8.9442	0.207 49	4675.5	5401.7	8.8723



Tabel 3. Nilai Enthalpy Gas

Enthalpy (kJ) Values for Perfect Gases, \* Btu/Mole or Indicated Quantity

Temp. °F	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Ar	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub>	O	N	C	C <sub>2</sub>	NO	OH
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	1.377	1.367	1.367	2.568	1.586	1.421	1.766	0.592	1.004	0.92	0.270	0.407	0.407	0.407	0.407	0.407
200	2.073	2.052	2.052	4.046	2.695	2.174	2.771	1.216	1.687	1.087	0.418	0.615	0.615	0.615	0.615	0.615
300	2.700	2.678	2.678	5.515	3.744	3.001	3.801	1.810	2.301	1.501	0.629	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826
400	3.268	3.235	3.235	6.984	4.793	3.950	4.546	2.333	2.830	2.030	0.840	1.037	1.037	1.037	1.037	1.037
500	3.788	3.744	3.744	8.453	5.842	4.100	5.095	2.865	3.365	2.565	1.050	1.247	1.247	1.247	1.247	1.247
600	4.258	4.204	4.204	9.922	6.891	4.249	5.644	3.400	3.900	3.100	1.260	1.457	1.457	1.457	1.457	1.457
700	4.681	4.617	4.617	11.391	7.940	4.398	6.193	3.935	4.435	3.635	1.470	1.667	1.667	1.667	1.667	1.667
800	5.056	5.002	5.002	12.860	8.989	4.547	6.742	4.470	4.980	4.180	1.680	1.877	1.877	1.877	1.877	1.877
900	5.381	5.327	5.327	14.329	10.038	4.696	7.291	5.005	5.529	4.710	1.890	2.087	2.087	2.087	2.087	2.087
1000	5.656	5.602	5.602	15.798	11.087	4.845	7.840	5.540	6.078	5.250	2.100	2.297	2.297	2.297	2.297	2.297
1100	5.881	5.827	5.827	17.267	12.136	4.994	8.389	6.075	6.627	5.790	2.310	2.507	2.507	2.507	2.507	2.507
1200	6.056	6.002	6.002	18.736	13.185	5.143	8.938	6.610	7.176	6.330	2.520	2.717	2.717	2.717	2.717	2.717
1300	6.181	6.127	6.127	20.205	14.234	5.292	9.487	7.145	7.725	6.870	2.730	2.927	2.927	2.927	2.927	2.927
1400	6.256	6.202	6.202	21.674	15.283	5.441	10.036	7.680	8.274	7.410	2.940	3.137	3.137	3.137	3.137	3.137
1500	6.281	6.227	6.227	23.143	16.332	5.590	10.585	8.165	8.823	7.950	3.150	3.347	3.347	3.347	3.347	3.347
1600	6.256	6.202	6.202	24.612	17.381	5.739	11.134	8.610	9.372	8.490	3.360	3.557	3.557	3.557	3.557	3.557
1700	6.181	6.127	6.127	26.081	18.430	5.888	11.683	9.105	9.921	9.030	3.570	3.767	3.767	3.767	3.767	3.767
1800	6.056	6.002	6.002	27.550	19.479	6.037	12.232	9.590	10.470	9.570	3.780	3.977	3.977	3.977	3.977	3.977
1900	5.881	5.827	5.827	29.019	20.528	6.186	12.781	10.080	11.019	10.110	3.990	4.187	4.187	4.187	4.187	4.187
2000	5.656	5.602	5.602	30.488	21.577	6.335	13.330	10.590	11.568	10.650	4.200	4.397	4.397	4.397	4.397	4.397
2100	5.381	5.327	5.327	31.957	22.626	6.484	13.879	11.100	12.117	11.190	4.410	4.607	4.607	4.607	4.607	4.607
2200	5.056	5.002	5.002	33.426	23.675	6.633	14.428	11.610	12.666	11.730	4.620	4.817	4.817	4.817	4.817	4.817
2300	4.681	4.627	4.627	34.895	24.724	6.782	14.977	12.120	13.215	12.270	4.830	5.027	5.027	5.027	5.027	5.027
2400	4.258	4.204	4.204	36.364	25.773	6.931	15.526	12.630	13.764	12.810	5.040	5.237	5.237	5.237	5.237	5.237
2500	3.788	3.744	3.744	37.833	26.822	7.080	16.075	13.140	14.313	13.350	5.250	5.447	5.447	5.447	5.447	5.447
2600	3.268	3.235	3.235	39.302	27.871	7.229	16.624	13.650	14.862	13.890	5.460	5.657	5.657	5.657	5.657	5.657
2700	2.700	2.678	2.678	40.771	28.920	7.378	17.173	14.160	15.411	14.430	5.670	5.867	5.867	5.867	5.867	5.867
2800	2.073	2.052	2.052	42.240	29.969	7.527	17.722	14.670	15.960	14.970	5.880	6.077	6.077	6.077	6.077	6.077
2900	1.377	1.367	1.367	43.709	30.968	7.676	18.271	15.180	16.509	15.510	6.090	6.287	6.287	6.287	6.287	6.287
3000	0.681	0.671	0.671	45.178	31.967	7.825	18.820	15.690	17.058	16.050	6.300	6.497	6.497	6.497	6.497	6.497
3100	0	0	0	46.647	32.966	7.974	19.369	16.200	17.607	16.590	6.510	6.707	6.707	6.707	6.707	6.707
3200	0	0	0	48.116	33.965	8.123	19.918	16.710	18.156	17.130	6.720	6.917	6.917	6.917	6.917	6.917
3300	0	0	0	49.585	34.964	8.272	20.467	17.260	18.705	17.670	6.930	7.127	7.127	7.127	7.127	7.127
3400	0	0	0	51.054	35.963	8.421	21.016	17.770	19.254	18.210	7.140	7.337	7.337	7.337	7.337	7.337
3500	0	0	0	52.523	36.962	8.570	21.565	18.280	19.803	18.750	7.350	7.547	7.547	7.547	7.547	7.547
3600	0	0	0	53.992	37.961	8.719	22.114	18.830	20.352	19.290	7.560	7.757	7.757	7.757	7.757	7.757
3700	0	0	0	55.461	38.960	8.868	22.663	19.380	20.901	19.830	7.770	7.967	7.967	7.967	7.967	7.967
3800	0	0	0	56.930	39.959	9.017	23.212	19.930	21.450	20.370	7.980	8.177	8.177	8.177	8.177	8.177
3900	0	0	0	58.399	40.958	9.166	23.761	20.480	22.000	20.910	8.190	8.387	8.387	8.387	8.387	8.387
4000	0	0	0	59.868	41.957	9.315	24.310	21.030	22.550	21.450	8.400	8.597	8.597	8.597	8.597	8.597
4100	0	0	0	61.337	42.956	9.464	24.859	21.580	23.100	21.990	8.610	8.807	8.807	8.807	8.807	8.807
4200	0	0	0	62.806	43.955	9.613	25.408	22.130	23.650	22.530	8.820	9.017	9.017	9.017	9.017	9.017
4300	0	0	0	64.275	44.954	9.762	25.957	22.680	24.200	23.070	9.030	9.227	9.227	9.227	9.227	9.227
4400	0	0	0	65.744	45.953	9.911	26.506	23.230	24.750	23.610	9.240	9.437	9.437	9.437	9.437	9.437
4500	0	0	0	67.213	46.952	10.060	27.055	23.780	25.300	24.150	9.450	9.647	9.647	9.647	9.647	9.647
4600	0	0	0	68.682	47.951	10.209	27.604	24.330	25.850	24.690	9.660	9.857	9.857	9.857	9.857	9.857
4700	0	0	0	70.151	48.950	10.358	28.153	24.880	26.400	25.230	9.870	10.067	10.067	10.067	10.067	10.067
4800	0	0	0	71.620	49.949	10.507	28.702	25.430	26.950	25.770	10.080	10.277	10.277	10.277	10.277	10.277
4900	0	0	0	73.089	50.948	10.656	29.251	25.980	27.500	26.310	10.290	10.487	10.487	10.487	10.487	10.487
5000	0	0	0	74.558	51.947	10.805	29.800	26.530	28.050	26.850	10.500	10.697	10.697	10.697	10.697	10.697
5100	0	0	0	76.027	52.946	10.954	30.349	27.080	28.600	27.390	10.710	10.907	10.907	10.907	10.907	10.907
5200	0	0	0	77.496	53.945	11.103	30.898	27.630	29.150	27.930	10.920	11.117	11.117	11.117	11.117	11.117
5300	0	0	0	78.965	54.944	11.252	31.447	28.180	29.700	28.470	11.130	11.327	11.327	11.327	11.327	11.327
5400	0	0	0	80.434	55.943	11.401	31.996	28.730	30.250	29.010	11.340	11.537	11.537	11.537	11.537	11.537
5500	0	0	0	81.903	56.942	11.550	32.545	29.280	30.800	29.550	11.550	11.747	11.747	11.747	11.747	11.747
5600	0	0	0	83.372	57.941	11.699	33.094	29.830	31.350	30.090	11.760	11.957	11.957	11.957	11.957	11.957
5700	0	0	0	84.841	58.940	11.848	33.643	30.380	31.900	30.630	11.970	12.167	12.167	12.167	12.167	12.167
5800	0	0	0	86.310	59.939	11.997	34.192	30.930	32.450	31.170	12.180	12.377	12.377	12.377	12.377	12.377
5900	0	0	0	87.779	60.938	12.146	34.741	31.480	33.000	31.710	12.390	12.587	12.587	12.587	12.587	12.587
6000	0	0	0	89.248	61.937	12.295	35.290	32.030	33.550	32.250	12.600	12.797	12.797	12.797	12.797	12.797
6100	0	0	0	90.717	62.936	12.444	35.839	32.580	34.100	32.790	12.810	13.007	13.007	13.007	13.007	13.007
6200	0	0	0	92.186	63.935	12.593	36.388	33.130	34.650	33.330	13.020	13.217	13.217	13.217	13.217	13.217
6300	0	0	0	93.655	64.934	12.742	36.937	33.680	35.200	33.870	13.230	13.427	13.427	13.427	13.427	13.427
6400	0	0	0	95.124	65.933	12.891	37.486	34.230	35.750	34.410	13.440	13.637	13.637	13.637	13.637	13.637
6500	0	0	0	96.593	66.932	13.040	38.035	34.780	36.300	34.950	13.650	13.847	13.847	13.847	13.847	13.847
6600	0	0	0	98.062	67.931	13.189	38.584	35.330	36.850	35.490	13.860	14.057	14.057	14.057	14.057	14.057
6700	0	0	0	99.531	68.930	13.338	39.133	35.880	37.400	36.030	14.070	14.267	14.267	14.267	14.267	14.267
6800	0	0	0	100.000	69.929	13.487	39.682	36.430	37.950	36.570	14.280	14.477	14.477	14.477	14.477	14.477
6900	0	0	0	101.469	70.928	13.636	40.231	36.980	38.500	37.110	14.490	14.687	14.687			

**Tabel 4. Dimensi Pipa – pipa Baja**

<i>Ukuran Nominal pipa in</i>	<i>Diameter luar in</i>	<i>Skedul no.</i>	<i>Tebal dinding in</i>	<i>Diameter dalam in</i>	<i>Luas penam- pang logam in<sup>2</sup></i>	<i>Luas penam- pang dalam ft<sup>2</sup></i>
$\frac{1}{8}$	0.405	40	0.068	0.269	0.072	0.00040
		80	0.095	0.215	0.093	0.00025
$\frac{1}{4}$	0.540	40	0.088	0.364	0.125	0.00072
		80	0.119	0.302	0.157	0.00050
$\frac{3}{8}$	0.675	40	0.091	0.493	0.167	0.00133
		80	0.126	0.423	0.217	0.00098
$\frac{1}{2}$	0.840	40	0.109	0.622	0.250	0.00211
		80	0.147	0.546	0.320	0.00163
$\frac{3}{4}$	1.050	40	0.113	0.824	0.333	0.00371
		80	0.154	0.742	0.433	0.00300
1	1.315	40	0.133	1.049	0.494	0.00600
		80	0.179	0.957	0.639	0.00499
1½	1.900	40	0.145	1.610	0.799	0.01414
		80	0.200	1.500	1.068	0.01225
		160	0.281	1.338	1.429	0.00976
2	2.375	40	0.154	2.067	1.075	0.02330
		80	0.218	1.939	1.477	0.02050
3	3.500	40	0.216	3.068	2.228	0.05130
		80	0.300	2.900	3.016	0.04587
4	4.500	40	0.237	4.026	3.173	0.08840
		80	0.337	3.826	4.407	0.7986
5	5.563	40	0.258	5.047	4.304	0.1390
		80	0.375	4.813	6.112	0.1263
		120	0.500	4.563	7.953	0.1136
		160	0.625	4.313	9.696	0.1015
6	6.625	40	0.280	6.065	5.584	0.2006
		80	0.432	5.761	8.405	0.1810
10	10.75	40	0.365	10.020	11.90	0.5475
		80	0.500	9.750	16.10	0.5185

**Sumber :** J.P. Holman., Perpindahan Kalor, Erlangga, hal. 596

**Tabel 5. Harga  $\frac{Q}{A}$**

Configuration	$h_a$ . Btu/hr-ft <sup>2</sup> -°F	$q/A$ . Btu/hr-ft <sup>2</sup>
Horizontal surface (in wide vessel)	$h_a = 151 (\Delta T)^{1/3}$	$q/A < 5000$
	$h_a = 0,168 (\Delta T)^3$	$5000 < q/A < 75000$
Vertical surface (in wide vessel)	$h_a = 87 (\Delta T)^{1/3}$	$q/A < 1000$
	$h_a = 0,24 (\Delta T)^3$	$1000 < q/A < 20000$
Vertical tube (interior)	$h_a = 189 (\Delta T)^{1/3}$	$q/A < 5000$
	$h_a = 0,21 (\Delta T)^3$	$5000 < q/A < 75000$

**Sumber :** Donald R.P., Leighton E.S., “*Heat Transfer*”, hal. 220

**Tabel 6. Konduktifitas Panas Bahan Logam dan Paduan**

Thermal conductivity, k, of selected materials (Btu/sq ft, hr, F/in. thickness)	
Material	k *
Silver	2880
Copper	2640
Carbon steel	350
Alloy steel, 18% Cr-S% Ni	108
First-quality firebrick	4,5
Insulating firebrick	0,8
85% Magnesia block	0,5

\* Approximate value at room temperature.

**Sumber :** Ir. Syamsir A. Muin., Pesawat – pesawat Konversi Energi., hal. 160

**Tabel 7. Sifat Fisis Gas Propertis**

Carbon dioxide				Water vapor			
temp	C <sub>p</sub>	μ	k	temp	C <sub>p</sub>	μ	k
200	.2162	.0438	.0125	200	.4532	.0315	.0134
400	.2369	.0544	.0177	400	.4663	.0411	.0197
600	.2543	.0645	.0227	600	.4812	.0506	.0261
800	.2668	.0749	.0274	800	.4975	.0597	.0326
1000	.2807	.0829	.0319	1000	.5147	.0687	.0393
1200	.2903	.0913	.0360	1200	.5325	.0773	.0462
1400	.2980	.0991	.0400	1400	.5506	.0858	.0532
1600	.3041	.1064	.0435	1600	.5684	.0939	.0604
1800	.3090	.1130	.0468	1800	.5857	.1019	.0678
2000	.3129	.1191	.0500	2000	.6019	.1095	.0753

Nitrogen				Oxygen			
temp	C <sub>p</sub>	μ	k	temp	C <sub>p</sub>	μ	k
200	.2495	.0518	.0189	200	.2250	.0604	.0186
400	.2530	.0605	.0212	400	.2332	.0716	.0229
600	.2574	.0694	.0249	600	.2404	.0823	.0272
800	.2624	.0776	.0279	800	.2468	.0924	.0313
1000	.2678	.0854	.0309	1000	.2523	.1021	.0352
1200	.2734	.0927	.0339	1200	.2570	.1111	.0389
1400	.2791	.0996	.0369	1400	.2611	.1197	.0425
1600	.2846	.1061	.0399	1600	.2647	.1278	.0460
1800	.2897	.1122	.0429	1800	.2678	.1353	.0492
2000	.2942	.1176	.0459	2000	.2705	.1423	.0523

Air (dry)				Flue gas (% vol CO <sub>2</sub> = 12, H <sub>2</sub> O = 12, N <sub>2</sub> = 70, O <sub>2</sub> = 6)			
temp	C <sub>p</sub>	μ	k	temp	C <sub>p</sub>	μ	k
200	.2439	.0537	.0188	200	.2570	.0492	.0174
400	.2485	.0632	.0221	400	.2647	.0587	.0211
800	.2587	.0809	.0287	800	.2800	.0763	.0286
1200	.2696	.0968	.0350	1200	.2947	.0922	.0358
1600	.2800	.1109	.0412	1600	.3080	.1063	.0429
2000	.2887	.1232	.0473	2000	.3190	.1188	.0499

**Tabel 8. Grimson's Value of B and N**

$S_r/d$	1.25		1.5		2		3	
$S_L/d$	B	N	B	N	B	N	B	N
Staggered								
1.25	0.518	0.556	0.505	0.554	0.519	0.556	0.522	0.562
1.50	0.451	0.568	0.460	0.562	0.452	0.568	0.488	0.568
2.0	0.404	0.572	0.416	0.568	0.482	0.556	0.449	0.570
3.0	0.310	0.592	0.356	0.580	0.44	0.562	0.421	0.574
In-line								
1.25	0.348	0.592	0.275	0.508	0.100	0.704	0.0633	0.752
1.50	0.367	0.586	0.290	0.520	0.101	0.702	0.0678	0.744
2.0	0.418	0.570	0.299	0.602	0.229	0.632	0.198	0.646
3.0	0.290	0.601	0.357	0.584	0.374	0.581	0.286	0.608

**Sumber :** Carl D Shield, Boiler Type Characteristic Function, hal. 347

**Tabel 9. Harga Tegangan Tarik Maksimum Silinder Api**

Tube materials—maximum allowable stress values for ferrous materials, pounds per square inch (Values are per code case 1508-1 for ASME Section 1, Power Boilers)																				
Spec Number	Grade	Nominal Composition	Spec Min Tensile	Notes	For metal temperatures, F, not exceeding															
					20 to 100	300	400	20 to 400	500	600	650	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
Seamless carbon steel																				
SA-192	---	---	(47,000)	(1)(6)	---	---	---	11,750	11,750	11,750	11,750	11,500	9,000	5,000	1,500	---	---	---	---	
SA-210	A-1	---	60,000	(1)	---	---	---	15,000	15,000	15,000	15,000	14,350	10,800	5,000	1,500	---	---	---	---	
SA-210	C	---	70,000	---	17,500	17,500	17,500	---	17,500	17,500	17,500	16,600	12,000	5,000	1,500	---	---	---	---	
Seamless alloy steel																				
SA-209	T1a	C-½ Mo	60,000	(2)	---	---	---	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	14,900	13,700	4,800	---	---	---	---	
SA-213	T5	5 Cr-½ Mo	60,000	---	---	---	---	15,000	14,500	14,000	13,700	13,400	12,800	10,350	5,600	3,050	1,300	---	---	
SA-213	T9	9 Cr-1 Mo	60,000	---	---	---	---	15,000	14,500	14,000	13,700	13,400	12,800	12,000	8,500	3,300	1,500	---	---	
SA-213	T11	1¼ Cr-½ Mo	60,000	---	---	---	---	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	13,100	6,550	3,000	1,200	---	---	
SA-213	T3b	2 Cr-½ Mo	60,000	---	---	---	---	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	14,700	12,500	6,200	2,750	1,200	---	---	
SA-213	T22	2¼ Cr-1 Mo	60,000	---	---	---	---	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	13,100	7,800	4,200	2,000	---	---	
SA-213	TP304H	18Cr-8Ni	75,000	(4)	18,750	16,600	16,150	---	15,900	15,900	15,900	15,900	15,150	14,650	13,750	9,750	6,050	3,700	2,300	1,400
SA-213	TP304H	18Cr-8Ni	75,000	---	18,750	14,050	12,950	---	12,150	11,400	11,250	11,050	10,550	10,150	9,750	8,850	6,050	3,700	2,300	1,400
SA-213	TP321H	18Cr-10Ni-Ti	75,000	(4)	18,750	17,300	17,100	---	17,100	16,350	16,050	15,800	15,450	15,250	14,000	9,050	5,350	3,150	1,850	1,100
SA-213	TP321H	18Cr-10Ni-Ti	75,000	---	18,750	14,150	12,900	---	12,000	11,350	11,150	10,950	10,750	10,600	10,450	8,800	5,350	3,150	1,850	1,100
Seamless low-alloy steel																				
SA-213	T2	½ Cr-½ Mo	60,000	---	15,000	15,000	15,000	---	15,000	15,000	15,000	15,000	14,400	12,500	6,250	---	---	---	---	
Electric-resistance-welded carbon steel																				
SA-178	A	---	(47,000)	(1)(3)(5)(6)	---	---	---	11,750	11,750	11,750	11,750	11,500	7,650	4,250	1,300	---	---	---	---	
SA-178	C	---	60,000	(1)(3)(5)	---	---	---	15,000	15,000	15,000	15,000	14,350	9,200	4,250	1,300	---	---	---	---	

**Sumber :** Babcock and Wilcox, Steam/Its Generation and Use, hal 29 – 12

**Tabel 10. Harga Tegangan Tarik Maksimum Pipa Api**

Pipe materials—maximum allowable stress values for ferrous materials, pounds per square inch (Values are per code case 1508-1 for ASME Section 1, Power Boilers)																									
Spec Number	Grade	Nominal Composition	Spec Min Tensile	Notes	20 to 100	300	400	20 to 400	500	For metal temperatures, F, not exceeding											1100	1200	1300	1400	1500
					600	650	700	800	900	1000															
Seamless carbon steel																									
SA-106	B		60,000	(1)				15,000	15,000	15,000	15,000	14,350	10,800	5,000	1,500										
SA-106	C		70,000					17,500	17,500	17,500	17,500	16,600	12,000												
Seamless alloy steel																									
SA-335	P2	½ Cr-½ Mo	55,000					13,750	13,750	13,750	13,750	13,750	13,450	12,500	6,250										
SA-335	P5	5 Cr-½ Mo	60,000					15,000	14,500	14,000	13,700	13,400	12,800	10,350	5,600	3,050	1,300								
SA-335	P11	1¼ Cr-½ Mo	60,000					15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	13,100	6,550	3,300	1,200								
SA-335	P12	1 Cr-½ Mo	60,000					15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	14,750	13,100	6,550	2,800	1,000								
SA-335	P9	9 Cr-1 Mo	60,000					15,000	14,500	14,000	13,700	13,400	12,800	12,000	8,500	3,300	1,500								
SA-335	P22	2¼ Cr-1 Mo	60,000					15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	13,100	7,800	4,200	2,000								
SA-376	TP304H	18Cr-8Ni	75,000	(2)	13,750	16,600	16,150		15,900	15,900	15,900	15,900	15,150	14,650	13,750	9,750	6,050	3,700	2,300	1,400					
SA-376	TP304H	18Cr-8Ni	75,000		18,750	14,050	12,950		12,150	11,400	11,250	11,050	10,550	10,150	9,750	8,850	6,050	3,700	2,300	1,400					
SA-376	TP316H	16Cr-12Ni-2Mo	75,000	(2)	18,750	18,350	18,050		17,950	17,000	16,650	16,300	15,850	15,550	15,300	12,400	7,400	4,100	2,250	1,250					
SA-376	TP316H	16Cr-12Ni-2Mo	75,000		18,750	14,600	13,350		12,450	11,800	11,550	11,300	11,000	10,800	10,600	10,300	7,400	4,100	2,250	1,250					
Forged and bored austenitic steel																									
SA-430	FP304H	18Cr-8Ni	70,000	(2)	17,500	15,500	15,050		14,800	14,800	14,800	14,800	14,600	14,150	13,350	9,750	6,050	3,700	2,300	1,400					
SA-430	FP304H	13Cr-8Ni	70,000		17,500	14,050	12,950		12,150	11,400	11,250	11,050	10,550	10,150	9,750	8,850	6,050	3,700	2,300	1,400					
SA-430	FP316H	16Cr-12Ni-2Mo	70,000	(2)	17,500	17,100	16,800		16,800	16,800	16,650	16,300	15,850	15,550	14,950	12,400	7,400	4,100	2,250	1,250					
SA-430	FP316H	16Cr-12Ni-2Mo	70,000		17,500	14,600	13,350		12,450	11,800	11,550	11,300	11,000	10,800	10,600	10,300	7,400	4,100	2,250	1,250					
Carbon steel forgings																									
SA-266	II		70,000	(1)				17,500	17,500	17,500	17,500	16,600	12,000	5,000	1,500										

Sumber : Babcock and Wilcox, Steam/Its Generation and Use, hal 29 – 14



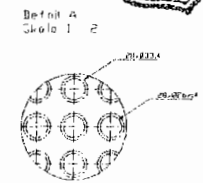
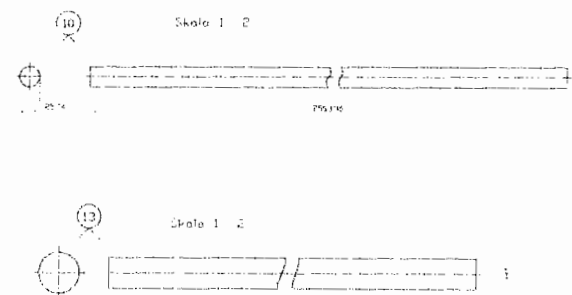
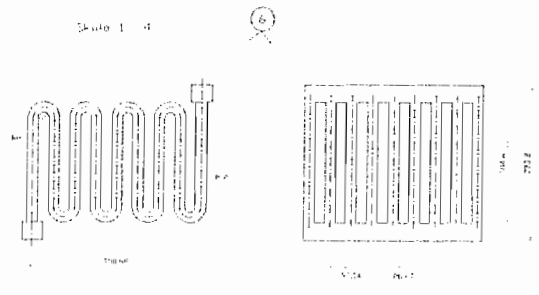
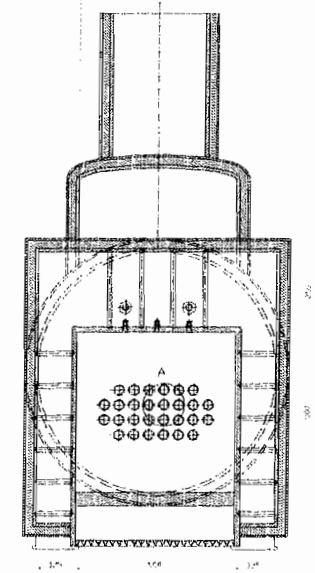
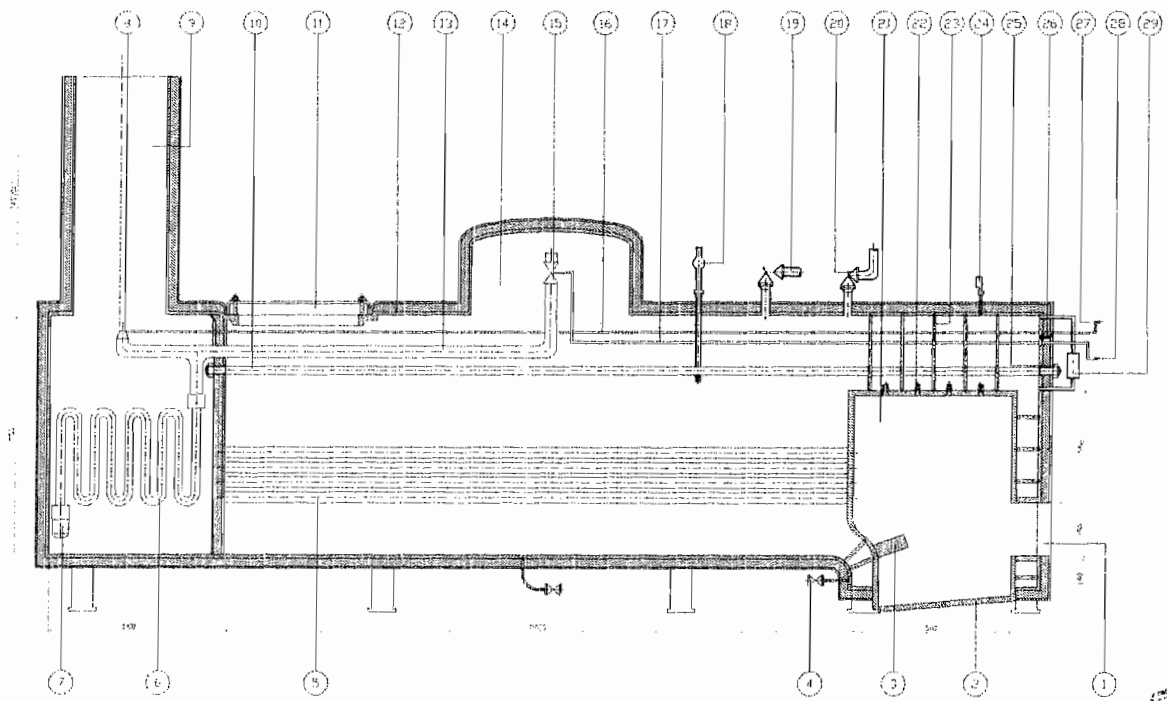
**Tabel 11. Harga Tegangan Tarik Maksimum Plat Baja**

Plate steels—maximum allowable stress values for ferrous materials, pounds per square inch												
Spec Number	Grade	Nominal Composition	Spec Min Tensile	Notes	For metal temperatures, F, not exceeding							
					650	700	750	800	850	900	950	1000
Carbon steel												
SA-285 A	—	—	45,000	(1)	11,250	10,900	9,700	8,300	6,600	5,000	—	—
SA-285 B	—	—	50,000	(1)	12,500	12,100	11,000	9,400	7,300	5,000	—	—
SA-285 C	—	—	55,000	(1)	13,750	13,250	12,050	10,200	7,800	5,000	—	—
SA-515 55	C-Si	—	55,000	(1)	13,750	13,250	12,050	10,200	7,800	5,000	3,000	1,500
SA-515 60	C-Si	—	60,000	(1)	15,000	14,350	12,950	10,800	7,800	5,000	3,000	1,500
SA-515 65	C-Si	—	65,000	(1)	16,250	15,500	13,850	11,400	7,800	5,000	3,000	1,500
SA-515 70	C-Si	—	70,000	(1)	17,500	16,600	14,750	12,000	7,800	5,000	3,000	1,500
Low-alloy steel												
SA-302 A	Mn-½ Mo	—	75,000	(2)	18,750	18,750	18,300	17,700	16,800	13,700	8,200	4,800
SA-302 B	Mn-½ Mo	—	80,000	(2)	20,000	20,000	19,600	18,800	17,900	13,700	8,200	4,800
Notes: (1) Upon prolonged exposure to temperatures above about 800 F, the carbide phase of carbon steel may be converted to graphite. (2) Upon prolonged exposure to temperatures above about 875 F, the carbide phase of carbon-molybdenum steel may be converted to graphite. (3) Stress values shown in italics are permissible but use of these materials at these temperatures is not current practice under, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section I.												
Chemical Requirements												
SA-285			SA-515			SA-302						
Element		Grade B %	Element		Grade 55 %	Grade 70 %	Element		Grade B %			
Carbon, max.....		0.22	Carbon, max:				Carbon, max:					
Manganese, max.....		0.90	1 in. and under..		0.20	0.31	For plates 1 in. and under					
Phosphorus, max.....		0.035	Over 1 to 2 in.,				in thickness.....		0.20			
Sulfur, max.....		0.045	incl.....		0.22	0.33	For plates over 1 to 2 in.,					
Copper,* when copper steel			Over 2 to 4 in.,				incl, in thickness.....		0.23			
is specified:			incl.....		0.24	0.35	For plates over 2 in.					
Ladle analysis.....		0.20-0.35	Over 4 to 8 in.,				in thickness.....		0.25			
Check analysis.....		0.18-0.37	incl.....		0.26	0.35	Manganese:					
			Over 8 to 12 in.,				Ladle analysis.....		1.15 to 1.50			
			incl.....		0.28	0.35	Check analysis.....		1.10 to 1.55			
			Manganese, max...		0.90	0.90	Phosphorus, max.....		0.035			
			Phosphorus, max..		0.035	0.035	Sulfur, max.....		0.040			
			Sulfur, max.....		0.04	0.04	Silicon:					
			Silicon:				Ladle analysis.....		0.15 to 0.30			
			Ladle analysis....		0.15 to	0.15 to	Check analysis.....		0.13 to 0.32			
			Check analysis...		0.30	0.30	Molybdenum:					
					0.13 to	0.13 to	Ladle analysis.....		0.45 to 0.60			
					0.33	0.33	Check analysis.....		0.41 to 0.64			
							Nickel:					
							Ladle analysis.....		—			
							Check analysis.....		—			
*When specified, the maximum incidental copper content shall be 0.25%.												
Tensile Requirements												
SA-285			SA-515			SA-302						
		Grade B			Grade 55	Grade 70			Grade B			
Tensile strength,† psi.....		50,000 to 60,000	Tensile strength, psi.....		55,000 to 65,000	70,000 to 85,000	Tensile strength, psi.....		80,000 to 100,000			
Yield point, min, psi.....		27,000	Yield point, min, psi.....		20,000	38,000	Yield point, min, psi.....		50,000			
Elongation in 8 in. (203 mm), min, %.....		25	Elongation in 8 in., min, %.....		23	17	Elongation in 8 in., min, %..		15†			
Elongation in 2 in. (50.8 mm), min, %.....		28	Elongation in 2 in., min, %.....		27	21	Elongation in 2 in., min, %..		18†			
†See ASME code for additional limitations.												

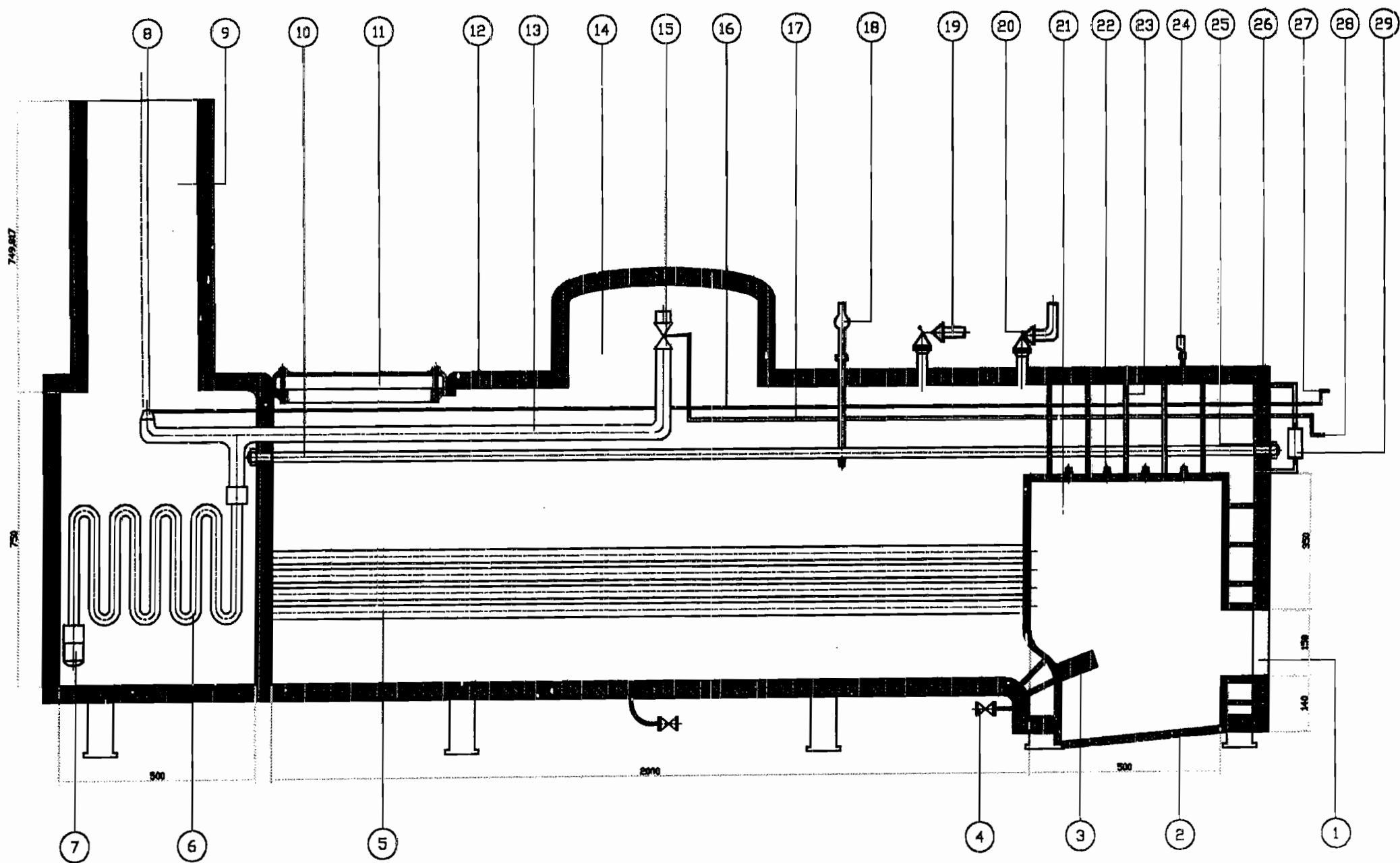
**Sumber :** Babcock and Wilcox, Steam/Its Generation and Use, hal 29 – 9

**Tabel 12 Konversi Satuan**

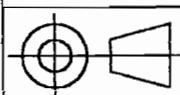
DIMENSION	SI	SI/ENGLISH
Acceleration	$1 \text{ m/s}^2 = 100 \text{ cm/s}^2$	$1 \text{ m/s}^2 = 3.2808 \text{ ft/s}^2$
Area	$1 \text{ m}^2 = 10^4 \text{ cm}^2 = 10^6 \text{ mm}^2$ $= 10^{-6} \text{ km}^2$	$1 \text{ m}^2 = 1550 \text{ in}^2 = 10.764 \text{ ft}^2$ $1 \text{ ft}^2 = 144 \text{ in}^2 = 0.092903 \text{ m}^2$
Density	$1 \text{ g/cm}^3 = 1 \text{ kg/L} = 1000 \text{ kg/m}^3$	$1 \text{ g/cm}^3 = 62.428 \text{ lbm/ft}^3 = 0.036127 \text{ lbm/in}^3$ $1 \text{ lbm/in}^3 = 1728 \text{ lbm/ft}^3$
Energy, heat, work	$1 \text{ kJ} = 1000 \text{ J} = 1000 \text{ Nm} = 1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3$ $1 \text{ kJ/kg} = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ $1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ}$	$1 \text{ kJ} = 0.94783 \text{ Btu}$ $1 \text{ Btu} = 1.05504 \text{ kJ}$ $= 5.4039 \text{ psia} \cdot \text{ft}^3$ $= 778.16 \text{ lbf} \cdot \text{ft}$ $1 \text{ Btu/lbf} = 25.037 \text{ ft}^2/\text{s}^2 = 2.326 \text{ kJ/kg}$ $1 \text{ kJ/kg} = 0.430 \text{ Btu/lbm}$ $1 \text{ kWh} = 3412.2 \text{ Btu}$
Force	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$	$1 \text{ lbf} = 32.174 \text{ lbm} \cdot \text{ft/s}^2$ $1 \text{ N} = 0.22481 \text{ lbf}$
Length	$1 \text{ m} = 100 \text{ cm} = 1000 \text{ mm}$ $1 \text{ km} = 1000 \text{ m}$	$1 \text{ m} = 39.370 \text{ in} = 3.2808 \text{ ft} = 1.0936 \text{ yd}$ $1 \text{ ft} = 12 \text{ in} = 0.304800 \text{ m}$ $1 \text{ mile} = 5280 \text{ ft} = 1.6093 \text{ km}$
Mass	$1 \text{ kg} = 1000 \text{ g}$ $1 \text{ metric ton} = 1000 \text{ kg}$	$1 \text{ kg} = 2.2046226 \text{ lbm}$ $1 \text{ lbm} = 0.45359237$ $1 \text{ slug} = 32.174 \text{ lbm} = 14.5939 \text{ kg}$ $1 \text{ short ton} = 2000 \text{ lbm}$
Power	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ $1 \text{ kW} = 1000 \text{ W} = 1341 \text{ hp}$	$1 \text{ kW} = 3412.2 \text{ Btu/h}$ $= 0.73756 \text{ lbf} \cdot \text{ft/s}$ $1 \text{ hp} = 550 \text{ lbf} \cdot \text{ft/s} = 0.7068 \text{ Btu/s}$ $= 42.41 \text{ Btu/min} = 2544.5 \text{ Btu/h}$ $= 0.74570 \text{ kW}$
Pressure	$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ $1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa} = 10^{-3} \text{ Mpa}$ $1 \text{ atm} = 101.325 \text{ kPa}$ $= 1.01325 \text{ bars}$ $= 760 \text{ mmHg at } 0^\circ\text{C}$	$1 \text{ Pa} = 1.4504 \times 10^{-4} \text{ psia}$ $= 0.020886 \text{ lbf/ft}^2$ $1 \text{ psia} = 144 \text{ lbf/ft}^2$ $1 \text{ atm} = 14.696 \text{ psia}$ $= 29.92 \text{ inHg at } 32^\circ\text{F}$
Specific Heat	$1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) = 1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ $= 1 \text{ J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$	$1 \text{ Btu}/(\text{lbm} \cdot ^\circ\text{F}) = 4.1868 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ $1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) = 0.23885 \text{ Btu}/(\text{lbm} \cdot ^\circ\text{F})$ $= 0.23885 \text{ Btu}/(\text{lbm} \cdot \text{R})$
Specific Volume	$1 \text{ m}^3/\text{kg} = 1000 \text{ L/kg}$ $= 1000 \text{ cm}^3/\text{g}$	$1 \text{ m}^3/\text{kg} = 16.02 \text{ ft}^3/\text{lbm}$
Temperature	$T (\text{K}) = T (^\circ\text{C}) + 273.15$ $\Delta T (\text{K}) = \Delta T (^\circ\text{C})$	$T (\text{R}) = T (^\circ\text{F}) + 459.67$ $T (^\circ\text{F}) = 1.8 T (^\circ\text{C}) + 32$ $\Delta T (^\circ\text{F}) = \Delta T (\text{R})$ $= 1.8 \Delta T (\text{K})$
Velocity	$1 \text{ m/s} = 3.60 \text{ km/h}$	$1 \text{ m/s} = 3.2808 \text{ ft/s}$ $= 2.237 \text{ mi/h}$ $1 \text{ mi/h} = 1.609 \text{ km/h}$
Volume	$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L} = 10^6 \text{ cm}^3 (\text{cc})$	$1 \text{ m}^3 = 6.1022 \times 10^4 \text{ in}^3 = 35.313 \text{ ft}^3$ $= 264.17 \text{ gal (U.S.)}$ $1 \text{ U.S. gallon} = 231 \text{ in}^3 = 3.7853 \text{ L}$



No	Uraian	Spesifikasi	Material	Volume	Unit
1	Boiler	1000 kg	Steel	1000	kg
2	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
3	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
4	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
5	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
6	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
7	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
8	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
9	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
10	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
11	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
12	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
13	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
14	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
15	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
16	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
17	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
18	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
19	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
20	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
21	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
22	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
23	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
24	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
25	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
26	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
27	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
28	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg
29	Flue Pipe	1000 kg	Steel	1000	kg



29	1	Gelas Penduga			Dibeli
28	1	Tuas Pngatur Uap	Besi Cor		Dibeli
27	1	Tuas Pngtr Nozel	Besi Cor		Dibeli
26	1	Garis Api			Dibeli
25	2	Baut M52	SCr 5		Dibuat
24	1	Manometer			Dibeli
23	104	Keling Penguat	SCr5		Dibuat
22	12	Prop Timah			Dibuat
21	1	Kotak api	SA 515 65		Dibuat
20	1	Katup Keamanan			Dibeli
19	1	Keran Pengisi	SA 106 C		Dibeli
18	1	Peluit Bahaya			Dibeli
17	1	Btg Pengatur Uap	S 30 C		Dibuat
16	1	Btg Pengtr Nozel	S 30 C		Dibuat
15	1	Kran Uap Utama	SA 106 C		Dibeli
14	1	Dom Uap	SA 515 65		Dibuat
13	1	Pipa Uap Jenuh	SA 106 C		Dibeli
12	1	Silinder Generator	SA 515 65		Dibeli
11	1	Man Hole	SA 106 C		Dibuat
10	2	Batang Penahan	SA 106 C		Dibuat
9	1	Cerobong Asap	SA 515 65		Dibuat
8	1	Pipa penarik Nozel	SA 210 C		Dibeli
7	1	Kotak Sprheater	SA 515 65		Dibuat
6	5	Pipa Superheater	SA 106 C		Dibeli
5	28	Pipa Api	SA 106 C		Dibeli
4	2	Kran Pembuang	SA 106 C		Dibeli
3	1	Jembatan Api			Dibuat
2	1	Btg Rangka Bakar	SA 515 65		Dibuat
1	1	Pintu bahan bakar			Dibuat
No	JML	NAMA	BAHAN	NORMALISASI	KETERANGAN



Skala : 1 : 5

Satuan: mm

Tanggal: 19.02.05

Digambar : Wahyudi

NIM : 995214020

Diperiksa : Ir.YB.Lukiyanto.M.T

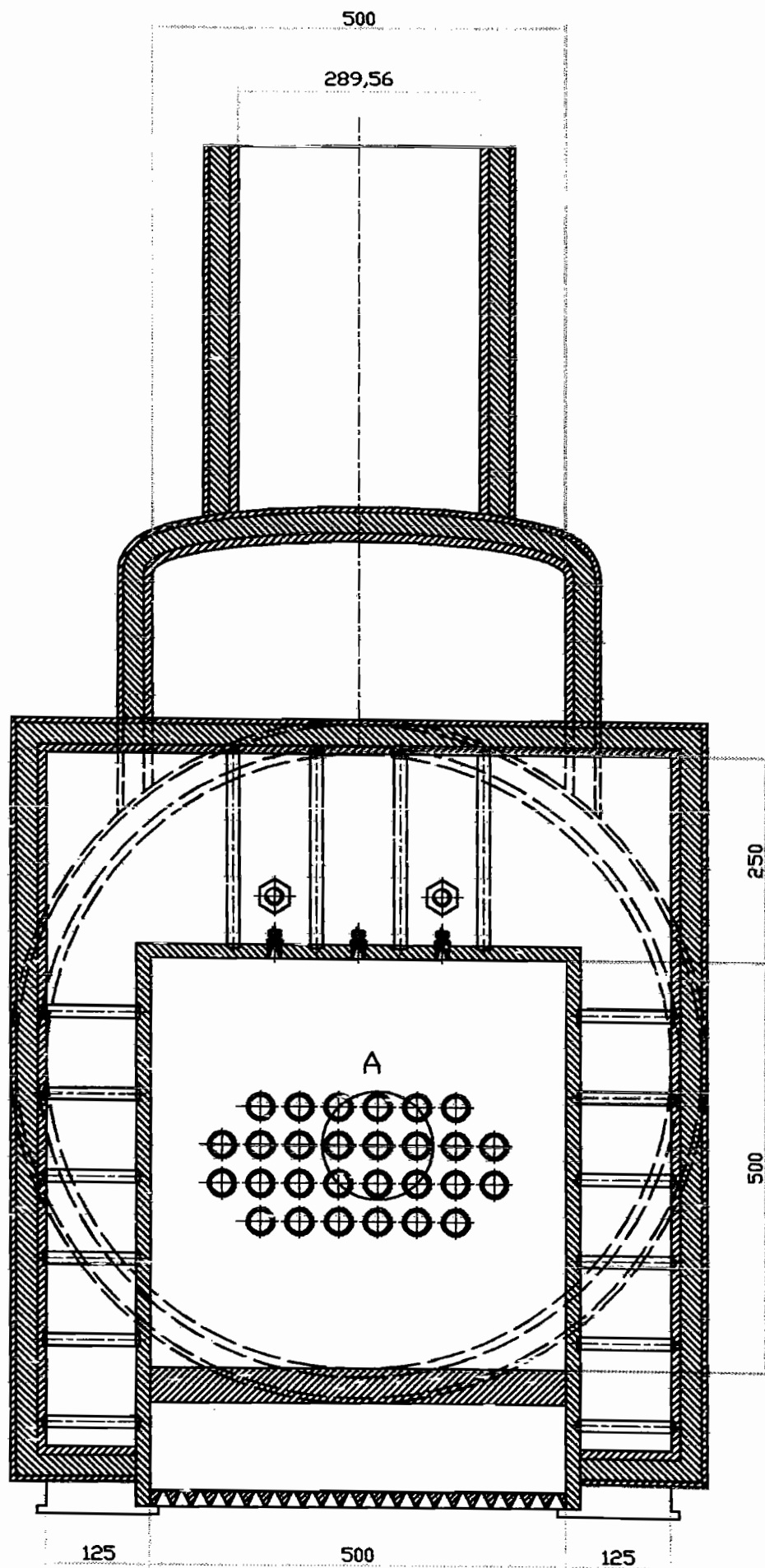
Keterangan

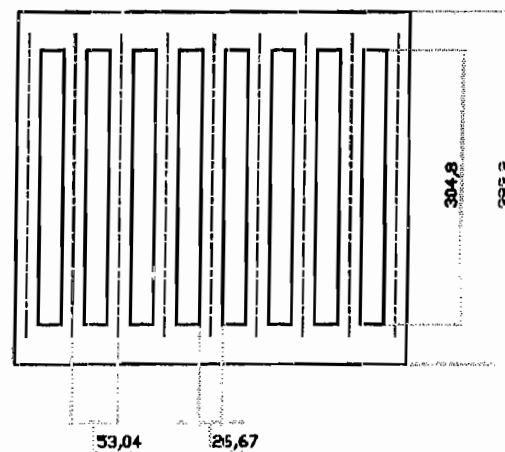
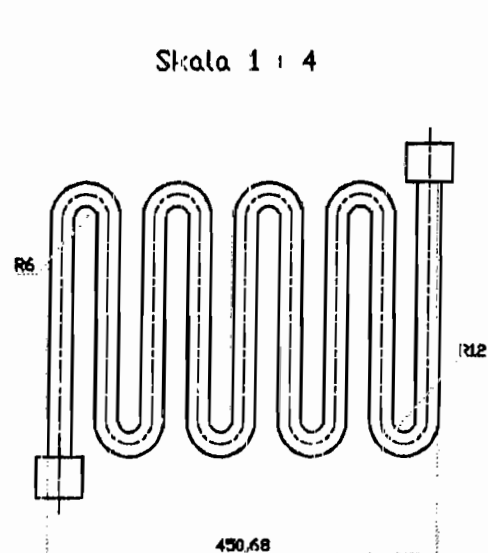
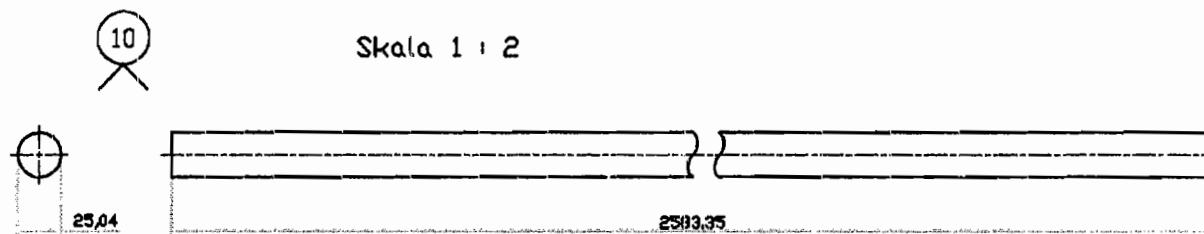
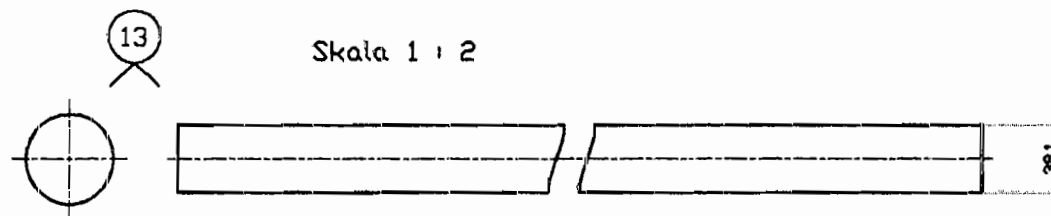
TEKNIK MESIN  
FT-USD

GENERATOR UAP LOKOMOTIF

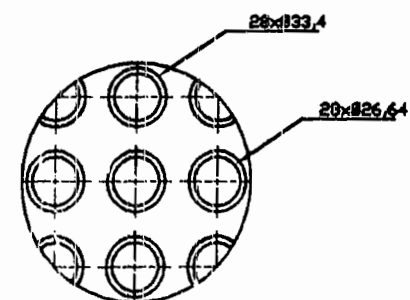
1

A0





Detail A  
Skala 1 : 2





**JURUSAN TEKNIK MESIN**  
**FAKULTAS TEKNIK - UNIVERSITAS SANATA DHARMA**

Kampus III, Paingan Maguwoharjo, Sleman – Yogyakarta  
Telp. (0274) 883037, 886530; Fax. (0274) 886529; Email: [teknik@usd.ac.id](mailto:teknik@usd.ac.id)

**TUGAS AKHIR / SKripsi PROGRAM S-1**  
**JURUSAN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK**  
**UNIVERSITAS SANATA DHARMA YOGYAKARTA**

No. 386 / F.T. / UNP / TM / Februari 2004

NAMA : Wahyudi  
NIM : 995214020  
NIRM : 990051123109120020  
Program Studi : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik, Univ. Sanata Dharma Yogyakarta  
Judul TGA : *Boiler*  
Rancanglah " Lokomotive ~~Boiler~~ " untuk kereta penarik biri.  
Tekanan kerja 14 Kg. Cm<sup>2</sup>. Bahan bakar : Batu Bara. Daya yang  
dihasilkan 60 KW. Perancangan disertai gambar lengkap.

Tanggal dimulai : 16 Februari 2004

Pembimbing I : Ir. YB. Lukiyanto, M.T.

Pembimbing II : Ir. FX. Agus Unggul Santoso

No	Tgl	Uraian	Keterangan
1	18/9 04	revisi perhitungan kebutuhan boiler	lanjutan
2	16/10 04	Perhitungan Temp. Pembakaran	
3	11/12 04	revisi perbandingan panas	
4	8/1 - 05	perhitungan silinder ketel dan cerobong	
5	19/2 05	Revisi Gambar	
6			
7			
8			
9			
10			

Tanda Tangan  
*Andi*  
*Andi*  
*Andi*  
*Andi*  
*Andi*





# JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS SANATA DHARMA

Kampus III, Paingan Maguwoharjo, Sleman - Yogyakarta

Telp. (0274) 883037, 883968, 886530; Fax. (0274) 886529; Email : [teknik@staff.usd.ac.id](mailto:teknik@staff.usd.ac.id)

## UJIAN PENDADARAN TUGAS AKHIR / SKRIPSI

TANGGAL : 19 Maret 2005

NAMA Mhs. : W A H Y U D I

NIM : 995214020

JUDUL :  
*Lokomotive Boiler for Lori Puller Train*

Pembimbing Utama : Ir. YB. Lukiyanto, M.T.

Pembimbing Kedua :

## USULAN REVISI DARI DOSEN PENGUJI

1. 1 lembar untuk mahasiswa
2. 1 lembar untuk dosen pembimbing

- 1. Penomoran tabel.
- 2. Rihad di naskah / semua naskah.
- 3. Intisari diulak
- 4. Abstrak tdk usah saja
- 5. Ilal persembahan ditiadakan

