

LOCOMOTIVE BOILER

TUGAS AKHIR

Nomor : 355 / FT. USD / TM / 2003

Untuk memenuhi sebagian persyaratan

Mencapai derajat Sarjana S – 1

Program Studi Teknik Mesin

Jurusan Teknik Mesin



Diajukan oleh :

Agustinus Haryanto

NIM : 995214016

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS SANATA DHARMA

YOGYAKARTA

2004



TUGAS AKHIR

“LOCOMOTIF BOILER”

Yang dipersiapkan dan disusun oleh :

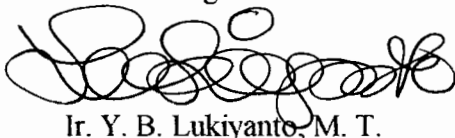
Nama : Agustinus Haryanto

NIM : 995214016

Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji,
pada tanggal 2 Oktober 2004

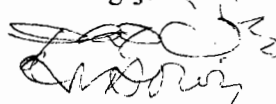
Susunan Dewan Penguji

Pembimbing Utama :



Ir. Y. B. Lukiyanto, M. T.

Dosen Penguji :



Ir. PK. Purwadi, M. T.

Pembimbing Kedua :



Budi Sugiharto, S. T., M. T.



Ir. FA. Rusdi Sambada, M. T.



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

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

Yogyakarta,.....Oktober 2004

FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SANATA DHARMA
YOGYAKARTA

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Sanata Dharma

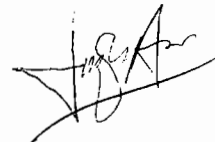


Greg. Heliarko, S.J., SS., B. ST., MA., M. SC.

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam tugas akhir tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi manapun. Dan sepengetahuan 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, 20 September 2004



Agustinus Haryanto

INTISARI

Ditemukannya uap sebagai sumber energi yang cukup efektif untuk menghasilkan tenaga, ternyata dapat mendorong adanya perkembangan dalam dunia industri. Sehingga dalam dunia industri mulai berkembang berbagai macam bentuk instalasi pembangkit tenaga uap yang sekarang lebih kita kenal dengan sebutan generator uap atau ketel uap. Generator uap dapat menghasilkan uap dengan cara memanaskan air isian dalam drum ketel pada tekanan tertentu. Uap yang dihasilkan dari berbagai proses dalam generator uap dapat dipergunakan sebagai pemanas dan penggerak mula.

Pada kesempatan ini, penulis akan merancang salah satu jenis generator uap pipa-pipa api yaitu generator uap Lokomotif. Perancangan ini, selain untuk menghasilkan ukuran dan bentuk dari bagian-bagian generator uap yang kuat dari segi keamanan, juga agar diperoleh nilai efisiensi yang tinggi. Efisiensi yang tinggi dapat diartikan bahwa panas yang dihasilkan pada proses pembakaran dapat dimanfaatkan secara maksimal sehingga panas yang dibuang dapat lebih rendah.

Generator uap yang akan dirancang yaitu generator uap lokomotif yang memiliki spesifikasi sebagai berikut :

- * Kapasitas = 25 ton / jam
- * Tekanan kerja = 16 Barg
- * Temperatur uap = uap jenuh
- * Bahan bakar = batubara

Dengan spesifikasi seperti diatas, generator uap lokomotif hasil perancangan diharapkan dapat menghasilkan tenaga yang cukup untuk menggerakkan piston sehingga kereta api dapat bergerak dan menjalankan fungsinya sebagai alat transportasi..

ABSTRACT

The invention of steam as an effective source of energy to produce power, plays a significant role in the development of industrial world nowadays. In industrial world, the experts were developing various steam power plant which is commonly known as steam generator or boiler. Steam generator produce steam from the boiling process at certain pressure. The steam which produced from various processes in steam generator can be used for various function such as heater and power plant.

In this opportunity, a kind of steam generator with the fire pipes, specifically the locomotive boiler is purposely designed. Hopefully, this design could produce a steam generator which has strong dimension and high efficiency. The high efficiency in this sense that this generator could make the heat energy which produced from combustion process useful. So, the heat energy which is exhausted, could be reduced.

The specifications of the designed locomotive boiler are described as follows :

- * Capacity : 25 ton per hour
- * Pressure : 16 Barg
- * Temperature : Superheated steam
- * Fuel : Coal

With the specification above, the steam generator hopefully could produce power to push piston, therefore the train can do the function as a means of transportation.

KATA PENGANTAR

Tiada kata lain yang diucapkan pada awal kata pengantar ini, selain ucapan puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa. Sebab dengan berkat dan anugerah-Nya, akhirnya Tugas Akhir ini dapat diselesaikan sesuai dengan harapan.

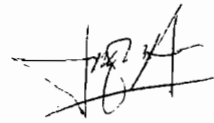
Tugas Akhir ini merupakan salah satu mata kuliah wajib yang harus diselesaikan oleh mahasiswa tingkat sarjana Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sanata Dharma untuk dapat menyelesaikan perkuliahan di Universitas Sanata Dharma. Dengan Tugas Akhir ini, mahasiswa diharapkan dapat menambah wawasan dan pola berpikir praktis terutama mengenai generator uap yaitu generator uap lokomotif. Sehingga apabila nantinya mahasiswa terjun ke dunia kerja, mahasiswa tidak merasa canggung karena telah terbiasa untuk berpikir praktis dalam mengatasi masalah yang dihadapi.

Cukup banyak kesulitan yang dijumpai penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Akan tetapi, berkat bantuan dari berbagai pihak terutama Bapak Ir. Y. B. Lukiyanto, M. T. dan Bapak Budi Sugiharto, S. T, M. T. yang dengan sabar memberikan bimbingan kepada penulis, akhirnya Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Dan untuk itu, pada kesempatan kali ini penulis juga mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing dan semua pihak yang telah memberikan bantuannya sehingga dapat memperlancar penyelesaian Tugas Akhir ini baik secara langsung maupun tidak langsung.

Akhirnya penulis mengharapkan agar laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang ingin mendalami apa itu generator uap

lokomotif. Penulis juga menyadari bahwa hasil dari perancangan generator uap lokomotif ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh sebab itu penulis dengan senang hati mengharapkan adanya masukan dan kritikan dari berbagai pihak yang dapat membangun sehingga tulisan ini dapat disempurnakan dan menjadi lebih baik.

Yogyakarta, ²².....Oktober 2004



Penyusun .

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

- Suatu keberhasilan membutuhkan usaha dan pengorbanan.
- Jangan lakukan sesuatu yang buruk bagi hidupmu, maka lakukanlah yang terbaik.
- Hiduplah disaat sekarang, belajarlal dari masa lalu dan rencanakanlah masa depanmu.
- Hari ini harus lebih baik daripada kemarin, besok harus lebih baik daripada hari ini.
- Berusahalah dan jangan pernah ada kata menyerah.
- Kemajuan diri diukur dari bagaimana kita menjawab tantangan yang ada.
- Tuhan selalu menyertai kita.....amin.

Tugas Akhir ini kupersembahkan buat :

- 1. Ayah dan Ibu yang tercinta**
- 2. Kakak dan Adikku tersayang**
- 3. Sahabat dan teman-temanku**
- 4. Diriku sendiri**
- 5. Dosen-dosen Teknik Mesin Sanata Dharma**
- 6. Semua Pihak yang membutuhkannya**

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN.....	iii
INTISARI.....	iv
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
MOTTO DAN PERSEMBAHAN.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR DAN TABEL.....	xiv
BAB I. PENDAHULUAN	
I.1. Tinjauan Umum	1
I.2. Pengertian Generator Uap.....	2
I.3. Klasifikasi Generator Uap.....	4
I.4. Bagian-bagian Generator Uap.....	18
BAB II. PERENCANAAN GENERATOR UAP	
II.1. Pemilihan Jenis Generator Uap.....	20
II.2. Dasar Perencanaan.....	20
II.3. Pembatasan Masalah.....	21
II.4. Proses Terbentuknya Uap.....	22
II.5. Sirkulasi Air Ketel.....	22
II.6. Kebutuhan Kalor Generator Uap Lokomotif.....	23



BAB III. PROSES PEMBAKARAN

III.1. Pengertian Pembakaran.....	25
III.2. Klasifikasi Bahan Bakar.....	26
III.3. Analisa Bahan Bakar.....	32
III.4. Nilai Pembakaran.....	33
III.5. Kebutuhan Bahan Bakar.....	34
III.6. Kebutuhan Udara Untuk Pembakaran.....	36
III.7. Perhitungan Temperatur Gas Asap Hasil Pembakaran...	38

BAB IV. PERPINDAHAN PANAS

IV.1. Proses Perpindahan Panas.....	42
IV.2. Perhitungan Perpindahan Panas Pada Ruang Bakar.....	43
IV.3. Perhitungan Temperatur Gas Asap Meninggalkan Ruang Bakar.....	46
IV.4. Perancangan Pipa Api.....	48
IV.5. Perhitungan Perpindahan Panas Pada Pipa Api.....	50
IV.6. Perencanaan Superheater.....	58
IV.7. Perpindahan Panas Pada Superheater.....	61

BAB.V. PERHITUNGAN KEKUATAN

V.1. Perhitungan Dinding Silinder Generator Uap.....	77
V.2. Pemeriksaan Tebal Dinding Silinder Generator.....	79
V.3. Perhitungan Kekuatan Pipa-pipa Api.....	80
V.4. Perhitungan Jarak Antar Pipa-pipa Api.....	81
V.5. Perhitungan Rangka Pendukung (Penahan / Stay).....	82

V.6. Perhitungan Sambungan Las.....	84
BAB.VI. DINDING DAN ISOLASI GENERATOR	
VI.1. Perancangan Dinding dan Isolasi Silinder Generator.....	89
VI.1.1. Perhitungan Kerugian Panas Dinding Silinder.....	91
VI.1.2. Perhitungan Temperatur Bagian Luar Plat Penutup Isolasi Silinder Generator.....	93
VI.2. Perancangan Isolasi Tutup Belakang Kotak Generator.....	94
VI.3. Perancangan Isolasi Dinding Kotak Api Generator.....	96
VI.4. Pemeriksaan Kerugian Panas Melalui Dinding dan Isolasi Generator.....	97
BAB VII. EFISIENSI GENERATOR	
VII.1. Pengertian Efisiensi Generator.....	99
VII.1. Efisiensi Dengan Cara Langsung.....	99
VII.2. Efisiensi Secara Tidak Langsung.....	100
BAB.VIII. CEROBONG ASAP	
VIII.1. Cerobong Asap.....	103
VIII.2. Perencanaan Cerobong.....	105
VIII.1. 1. Perhitungan Kerugian Aliran Gas Asap Dalam Cerobong Asap.....	108
VIII.1. 2. Perhitungan Hambatan Aliran Gas Asap Dalam Generator.....	109
VIII.3. Nozzle Penghembus.....	114
VII.4. Waktu Pengisian Air Isian.....	115

BAB.IX. ALAT-ALAT PERTOLONGAN DAN PERLENGKAPAN

IX.1. Keran Pembuang Generator (<i>Blow Down</i>	117
IX.2. Gelas Penduga.....	118
IX.3. Manometer.....	119
IX.4. Peluit Bahaya.....	120
IX.5. Garis Api.....	121
IX.6. Keran Pengisi / Penutup Air Isian Generator.....	122
IX.7. Keran Uap Induk.....	122
IX.8. Pompa Air Isian.....	123
IX.9. Katup Keamanan.....	123
IX.10. Dom Uap.....	123

BAB X. AIR ISIAN GENERATOR

X.1. Pengantar.....	125
X.2. Pembentukan Kerak dan Lumpur.....	125
X.2. Pencegahan Terbentuknya Kerak dan Lumpur.....	126
X.4. Proses Korosi.....	130
X.5. Syarat-syarat Air Umpan	132
X.6. Syarat-syarat Air Isian.....	132
X.7. Proses-Proses Air Sebelum Masuk Generator.....	132

BAB XI. PENGOPERASIAN DAN PERAWATAN

XI. 1. Pengoperasian Generator.....	135
XI. 2. Perawatan Generator.....	137

BAB XII. KESIMPULAN DAN PENUTUP

XII.1. Kesimpulan.....	146
------------------------	-----

XII.2. Penutup.....	148
---------------------	-----

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Generator Uap Lancashire	8
Gambar 1.2. Generator Uap Schots.....	11
Gambar 1.3. Generator Uap Lokomotif	12
Gambar 1.4. Generator Uap Seksi	16
Gambar 1.5. Generator Uap Pancaran.....	18
Gambar 2.1. Diagram T – S	22
Gambar 4.1. Monogram Panas Jenis.....	47
Gambar 4.2. Diagram faktor bilangan Reynold untuk temperatur film gas pada berbagai diameter pipa.....	53
Gambar 4.3. Diagram konduktansi panas konveksi dasar aliran memanjang untuk laju aliran massa gas pada berbagai diameter pipa.....	54
Gambar 4.4. Diagram pengaruh temperatur gas film pada faktor sifat fisik untuk arah aliran gas memanjang	54
Gambar 4.5. Diagram faktor temperatur karena perubahan mass velocity dari keseluruhan lapisan film dasar untuk aliran memanjang dari udara, gas atau uap.....	55
Gambar 4.6. Konstruksi Pipa-pipa Superheater	60
Gambar 4.7. Harga pendekatan panas jenis rata-rata gas	65
Gambar 4.8. Tekanan Partial	65
Gambar 4.9. Panjang radiasi rata-rata	66

Gambar 4.10. Pengaruh bahan bakar dan panjang radiasi pada konduktansi panas radiasi	67
Gambar 4.11. Konduktansi panas konveksi dasar aliran silang	68
Gambar 4.12. Pengaruh film temperatur pada faktor sifat fisik untuk gas asap pada aliran silang.....	69
Gambar 4.13. Reynold Number	69
Gambar 4.14. Faktor susunan pipa.....	71
Gambar 4.15. Faktor perpindahan panas untuk jumlah deret pipa aliran menyilang	72
Gambar 4.16. Konduktansi panas konveksi dasar pada aliran memanjang.....	73
Gambar 4.17. Pengaruh film temperatur dan tekanan pada faktor-faktor fisik uap pada aliran memanjang	74
Gambar 4.18. Faktor temperatur karena perubahan mass velocity	74
Gambar 6.1. Gambar penampang dinding dan isolasi generator.....	90
Gambar 8.1. Diagram diameter cerobong berdasarkan jumlah gas asap yang mengalir	106
Gambar 8.2. Diagram hubungan antara temperatur gas asap keluar cerobong dengan dimensi cerobong.....	107
Gambar 8.3. Diagram hubungan antara tinggi cerobong untuk harga tarikan cerobong dan temperatur rata-rata gas dalam cerobong..	107
Gambar 8.4. Diagram hubungan faktor gesekan dengan diameter cerobong berdasarkan bilangan Reynold	109
Gambar 8.5. Kekerasan relatif dari berbagai permukaan.....	111

Gambar 8.6. Viskositas absolut untuk beberapa gas ideal pada tekanan atmosfer	111
Gambar 9.1. Keran pembuang.....	117
Gambar 9.2. Gambar gelas penduga.....	118
Gambar 9.3. Gambar manometer	119
Gambar 9.4. Gambar peluit bahaya	121
Gambar 9.5. Katup keamanan	123
Gambar 11.1. Failure Mode Evaluation Chart (FMEC).....	138
Gambar 11.2. Component Failure Mode (CFM)	139
Gambar 11.3. Managed Maintenance.....	140
Gambar 11.4. Aliran Proses Perawatan	140

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Persentase banyaknya kebutuhan udara berlebih untuk berbagai macam bahan bakar.....	28
Tabel 2. Persentase komposisi batubara Bukit Asam.....	32
Tabel 3. Sifat-sifat uap jenuh dan air jenuh berdasarkan temperatur.....	Lampiran
Tabel 4. Sifat-sifat uap jenuh dan air jenuh berdasarkan tekanan.....	Lampiran
Tabel 5. Entalpi Gas.....	Lampiran
Tabel 6. Emisivitas Bahan.....	Lampiran
Tabel 7. Dimensi pipa-pipa baja.....	Lampiran
Tabel 8. Harga Q / A	Lampiran
Tabel 9. Konduktivitas bahan.....	Lampiran
Tabel 10. Sifat-sifat fisik Uap air dan Gas.....	Lampiran
Tabel 11. Material Pipa.....	Lampiran
Tabel 12. Material Plat Silinder.....	Lampiran
Tabel 13. Koefisien friksi terhadap temperatur.....	Lampiran
Tabel 14. Nilai minimum yang diijinkan karena stabilitas dan pengerjaan pipa.....	Lampiran
Tabel 15. Konduktivitas panas logam dan paduan.....	Lampiran
Tabel 16. Konduktivitas panas bahan isolasi.....	Lampiran

BAB I

PENDAHULUAN

I. 1. Tinjauan Umum

“Dunia yang luas dengan permasalahannya yang kompleks “, mungkin gambaran inilah yang dapat menjelaskan mengapa perkembangan dunia industri selalu seiring dengan perkembangan teknologi yang begitu pesat. Karena permasalahan yang muncul semakin kompleks itulah, yang menyebabkan kebutuhan hidup manusia semakin kompleks dan bervariasi pula. Dan dalam upayanya memenuhi kebutuhan hidupnya, manusia sangat membutuhkan adanya alat bantu yang berupa mesin-mesin produksi yang dapat menghasilkan barang dengan jumlah yang relatif besar dalam waktu yang singkat. Dengan semakin bervariasi dan meningkatnya kebutuhan manusia itu ternyata menuntut diciptakan atau ditemukannya sebuah penemuan atau teknologi baru yang dapat meningkatkan efisiensi dan hasil secara maksimum dalam menghasilkan barang untuk memenuhi kebutuhan hidup manusia yang selalu berkembang seiring perkembangan zaman.

Dalam dunia industri sendiri, telah ditemukan uap sebagai suatu sumber energi yang cukup efektif untuk menghasilkan tenaga sebagai daya yang diperlukan oleh mesin-mesin industri. Dengan ditemukannya uap sebagai sumber energi, maka berkembanglah berbagai instalasi pembangkit uap yang sekarang kita kenal dengan sebutan generator uap atau ketel uap sebagai alat pembangkit tenaga yang terus berkembang hingga saat ini.

I. 2. Pengertian Generator Uap

Generator uap merupakan suatu alat pembangkit tenaga yang memanfaatkan tenaga uap dari air yang dididihkan dengan tekanan tertentu. Untuk mendidihkan air tersebut diperlukan sejumlah kalor atau energi panas yang dapat diperoleh dari gas hasil pembakaran. Dan pembakaran itu sendiri dapat terjadi dengan mencampurkan bahan bakar dengan udara pada temperatur di atas temperatur nyala.

Secara umum peralatan ketel uap atau generator uap terdiri dari bagian-bagian pokok seperti ruang bakar atau dapur sebagai tempat berlangsungnya proses pembakaran bahan bakar dan bejana yang menampung uap atau air panas yang terbentuk serta bidang-bidang pemanas yang dapat memindahkan kalor dari pembakaran bahan bakar ke zat alir yang digunakan. Dalam pelaksanaannya, bagian-bagian pokok ini dapat mempunyai bentuk konstruksi yang berbeda-beda sesuai dengan kebutuhannya.

Uap yang dihasilkan oleh generator uap dapat dipergunakan untuk berbagai keperluan antarlain sebagai penggerak mula maupun sebagai pemanas. Pada umumnya untuk generator uap yang dipergunakan sebagai penggerak mula, uap yang dihasilkan harus mempunyai tekanan tinggi dengan kondisi uap panas lanjut (*superheated steam*) yaitu uap jenuh (uap yang suhunya sama dengan titik didih airnya) dipanaslanjutkan sehingga suhunya lebih tinggi dari titik didih airnya. Sedang untuk keperluan pemanas, biasanya hanya mempergunakan uap jenuh.

Kemudian untuk perancangan sebuah generator perlu memperhatikan berbagai pertimbangan, yaitu :

1. Konstruksi sederhana sehingga pelayanan dan perawatannya dapat lebih mudah.
2. Kapasitas uap yang dihasilkan, air yang dimasukkan dan kapasitas bahan bakar harus seimbang agar permukaan air dan tekanan kerja tidak mengalami perubahan yang begitu besar sehingga sedapat mungkin tetap.
3. Uap harus mempunyai kesempatan untuk memisahkan diri dari air agar tidak ada kemungkinan ikutnya butir-butir air dalam uap.
4. Sirkulasi air harus sempurna sehingga suhu sama untuk seluruh generator.
5. Kemungkinan timbulnya tegangan akibat adanya pemuaian harus dihindarkan, karena itu sambungan paku keling di daerah pemanas harus dihindarkan.
6. Konstruksi dapur harus memungkinkan bahan bakar terbakar sempurna di dalam ruang bakar.
7. Bagian-bagian ketel harus diperhitungkan terhadap kemungkinan pembersihan dan perbaikan.
8. Perpindahan panas harus diperhitungkan seefektif mungkin.
9. Harus dilengkapi dengan alat ukur dan pengamanan yang baik.

Dan dalam pemakaian dan pemilihannya, generator yang digunakan dalam industri perlu diperhatikan berdasarkan faktor-faktor sebagai berikut :

1. Kapasitas ketel uap harus disesuaikan dengan pemakaian uap.
2. Tekanan dan temperatur uap disesuaikan.

3. Jenis bahan bakar.
4. Kualitas air ketel.
5. Biaya pembelian, operasi dan perawatannya.
6. Tipe atau konstruksi generator.

I. 3. Klasifikasi Generator Uap

Seiring dengan perkembangan teknologi dan meningkatnya kebutuhan dunia akan generator, para ilmuwan dan para ahli teknologi dituntut untuk dapat menciptakan penemuan-penemuan baru yang sesuai dengan kondisi dan kebutuhan suatu industri. Hal ini menyebabkan terciptanya berbagai macam generator yang mempunyai konstruksi, keunggulan dan fungsi masing-masing.

Dan karena kebutuhan dan kondisi industri yang berbeda-beda tersebut maka generator uap dirancang dengan spesifikasi yang berbeda-beda sesuai kebutuhan industri. Oleh karena cukup banyaknya generator yang telah berkembang, generator uap dapat diklasifikasikan berdasarkan tekanan kerjanya, kapasitasnya, konstruksinya, kedudukannya, tempat pemakaiannya dan faktor kegunaannya. Namun pada umumnya, pembagian generator uap hanya didasarkan pada bentuk konstruksinya. Sedangkan pembagian lainnya merupakan modifikasi dari pembagian atas dasar konstruksi tersebut.

Berdasarkan tekanan kerjanya, generator uap dapat dibedakan atas :

a. Generator uap tekanan kerja rendah

Generator uap tekanan kerja rendah adalah generator uap yang tekanan kerjanya dibawah atau kurang dari 20 atm.

b. Generator uap tekanan kerja sedang

Generator uap tekanan kerja sedang merupakan generator uap yang tekanan kerjanya 20 sampai 50 atm.

c. Generator uap tekanan kerja tinggi

Generator uap tekanan kerja tinggi adalah generator uap yang tekanan kerjanya berkisar 50 sampai 140 atm.

d. Generator uap tekanan kerja sangat tinggi

Generator uap tekanan kerja sangat tinggi memiliki tekanan kerja lebih dari 140 atm.

Dan berdasarkan kapasitasnya, generator uap dibedakan atas :

a. Generator uap kapasitas rendah

Generator uap kapasitas rendah adalah generator uap yang kapasitasnya kurang dari 10 ton / jam.

b. Generator uap kapasitas sedang

Generator uap kapasitas sedang adalah generator uap yang memiliki kapasitas 10 sampai dengan 100 ton / jam.

c. Generator uap kapasitas tinggi

Generator uap kapasitas tinggi adalah generator uap dengan kapasitas 100 sampai 500 ton / jam.

d. Generator uap kapasitas sangat tinggi

Generator uap kapasitas sangat tinggi merupakan generator uap yang berkapasitas lebih besar dari 500 ton / jam.

Sedangkan berdasarkan kedudukannya, generator uap dapat dibedakan atas :

a. Generator uap *horizontal* (datar)

Generator uap horizontal adalah generator uap yang kedudukannya sejajar dengan tanah (dasar).

b. Generator uap *vertical* (tegak)

Generator uap *vertical* merupakan generator uap yang kedudukannya tegak lurus dengan tanah (dasar).

c. Generator uap *inclined*

Generator uap ini adalah generator uap dengan kedudukan yang miring dari tanah (dasar), sehingga membutuhkan pondasi untuk menopang kedudukannya yang miring.

Berdasarkan tempat pemakaiannya, generator uap dapat dibedakan atas :

a. Generator uap darat

Generator uap darat adalah generator uap yang sangat umum dipakai di darat.

b. Generator uap laut

Generator uap laut adalah generator uap yang secara khusus dipersiapkan untuk sebuah industri yang berada di laut.

Kemudian berdasarkan faktor kegunaannya, generator uap dibedakan atas :

a. Generator uap *stasioner*

Generator uap *stasioner* merupakan generator uap yang bersifat tetap, tidak dapat dipindah. Generator uap *stasioner* biasanya digunakan untuk *power plant* pembangkit listrik tenaga uap di pabrik.

b. Generator uap *transfortable*

Generator uap *transfortable* dapat dipindah-pindah seperti pada lapangan minyak, penggergajian kayu, dan lain-lain.

c. Generator uap *moveable*

Generator uap *moveable* adalah generator uap yang dapat bekerja sambil bergerak / dipindahkan. Generator ini banyak dipakai pada alat transportasi yang bertenaga uap, seperti kereta api.

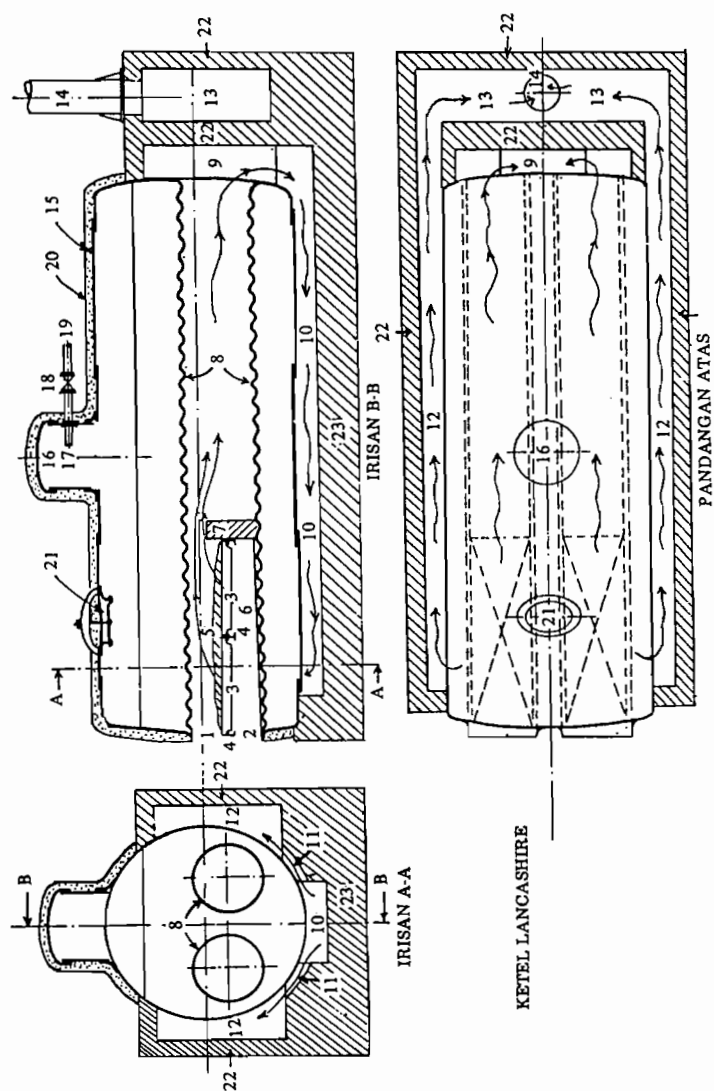
Dan yang terakhir adalah klasifikasi generator uap berdasarkan konstruksinya, yaitu :

a. Generator uap lorong api

Generator uap lorong api adalah generator uap yang konstruksinya terdiri dari satu atau lebih lorong api yang berbentuk silinder kecil, yang berfungsi sebagai ruang bakar dan sebagai saluran gas asap hasil reaksi pembakaran bahan bakar. Silinder kecil (lorong api) diletakkan di dalam tangki air. Penyerapan panas terjadi secara konduksi dan konveksi oleh air dalam tangki lewat dinding lorong api dan dinding dari tangki air yang dilewati gas asap hasil reaksi pembakaran bahan bakar.

Contoh generator uap lorong api, yaitu :

- Generator uap *Cornwall*
- Generator uap *Lancashire*



Gambar 1.1. Generator uap *Lancashire*

(Sumber : Ir. M. J. Djokosetyarjo, Ketel Uap, P. T. Pradnya Paramita, hal 199)

Keterangan gambar Generator uap *Lancashire* :

- 1 = Pintu bahan bakar
- 2 = Pintu angin bawah = pintu udara sekunder
- 3 = Batang-batang rangka bakar
- 4 = Penyangga batang-batang rangka bakar
- 5 = Lapisan bahan bakar padat
- 6 = Sumuran abu = *Ash pit*
- 7 = Jembatan api = *Fire bridge*
- 8 = Silinder api = *Fire cylinder*
- 9 = Kotak api = *Fire box*
- 10 = Kolong api
- 11 = Saluran atau selokan api
- 12 = Lorong api kiri / kanan
- 13 = Kotak asap = *Smoke box*
- 14 = Cerobong asap
- 15 = Drum ketel
- 16 = Dom uap
- 17 = Pipa pengambilan uap kenyang
- 18 = Keran uap
- 19 = Uap kenyang menuju ke pemakaian
- 20 = Isolasi panas
- 21 = Lubang orang = *Man hole*
- 22 = Tembokan ketel
- 23 = Pondasi ketel

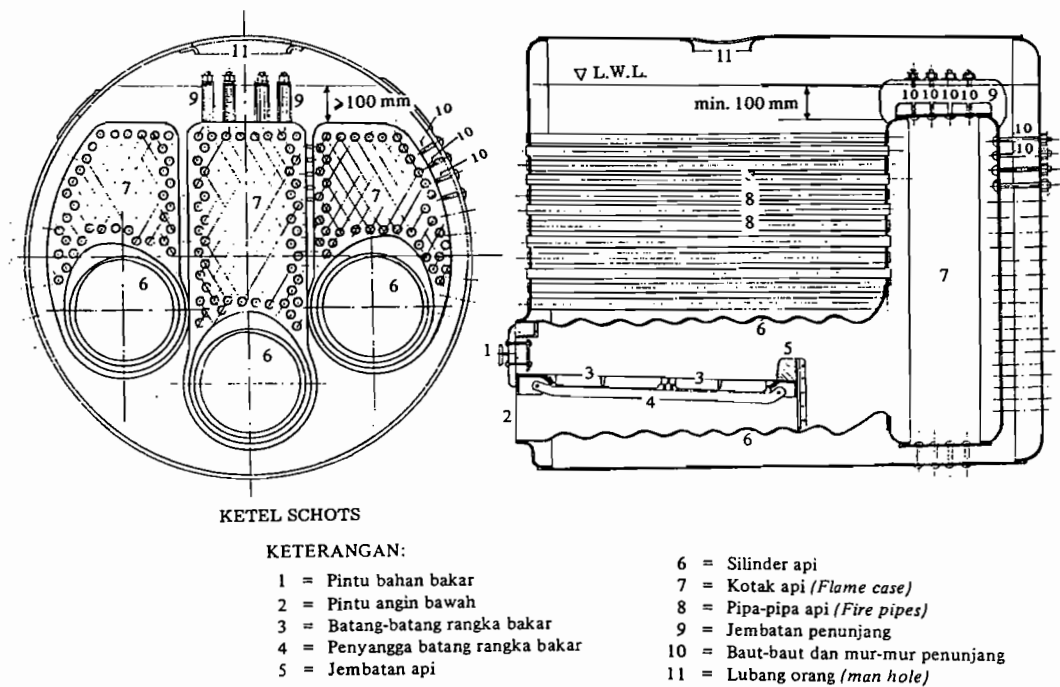
b. Generator uap pipa-pipa api

Generator uap pipa-pipa api memiliki konstruksi yang terdiri dari sebuah tangki ketel yang berbentuk silinder dan diisi air, dan didalamnya terdapat susunan pipa-pipa kecil yang dialiri gas asap yang bersuhu tinggi. Pipa-pipa ini terendam air, sehingga kalor dari gas asap yang mengalir di dalam pipa-pipa itu dapat diserap oleh air yang berada di sekitar pipa-pipa api. Pada umumnya, generator uap pipa-pipa api mempunyai satu atau lebih lorong api yang berfungsi sebagai ruang bakar. Generator uap pipa-pipa api ini merupakan pengembangan dari generator uap lorong api dengan cara memperbesar bidang pemanasnya.

Yang termasuk ke dalam golongan generator uap pipa-pipa api , antara lain :

1. Generator uap *Schots*

Generator uap jenis ini dirancang sedemikian rupa agar api atau gas asap selalu bersinggungan dengan dinding-dinding yang bersentuhan dengan air atau uap. Generator uap *Schots* memiliki dua atau tiga buah silinder api, namun silinder-silinder api tersebut bermuara pada kotak api (*flame case*). Kotak api tersebut seluruhnya terendam di dalam air yang ada di dalam drum generator uap. Api dan gas asap mengalir dari rangka bakar yang terdapat di dalam silinder api melalui silinder-silinder api sampai ke kotak api, dan dari kotak api melalui pipa-pipa api dan akhirnya mencapai cerobong asap dan keluar ke lingkungan.

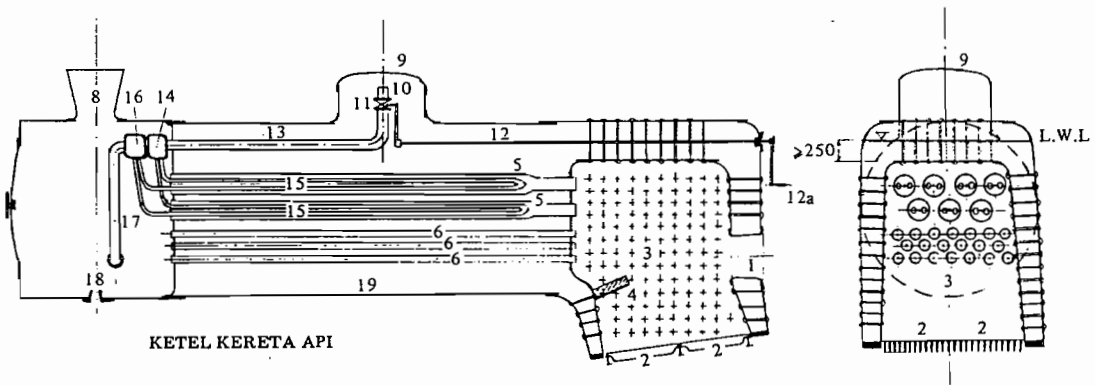
Gambar 1.2. Generator uap *Schots*

(Sumber : Ir. M. J. Djokosetyarjo, Ketel Uap, P. T. Pradnya Paramita, hal 203)

2. Generator uap Lokomotif

Generator uap pipa-pipa api jenis ini merupakan penyesuaian dan modifikasi dari generator uap yang digunakan dalam lokomotif kereta api. Generator uap lokomotif sering digunakan di ladang-ladang minyak ataupun tempat penggergajian. Generator uap lokomotif merupakan generator uap pipa-pipa api yang “*portable*”, karena dapat dipindah-pindahkan dari satu lokasi ke lokasi lain. Pada bagian belakang generator uap ini terdapat sebuah tungku yang merupakan kotak api. Dan pada bagian bawah tungku terdapat rangka bakar yang

digunakan untuk membakar bahan bakar padat berupa ; kayu, batubara atau bahan bakar padat yang lain. Jika menggunakan bahan bakar minyak, dipasang alat penyemprot bahan bakar atau *burner*. Uap yang dipanaskan lanjut yang dihasilkan generator uap lokomotif akan melakukan ekspansi di dalam mesin torak atau turbin uap yang selanjutnya akan menggerakkan roda-roda lokomotif.



KETERANGAN:

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

Gambar 1.3. Generator uap lokomotif

(Sumber : Ir. M. J. Djokosetyarjo, Ketel Uap, P. T. Pradnya Paramita, hal 210)

3. Generator uap *Cochran*

Generator uap *Cochran* dipakai untuk jumlah produksi uap yang relatif kecil sekitar 0,2 sampai 1,0 ton / jam. Penggunaan generator uap ini biasanya untuk melayani mesin-mesin pengangkat atau mesin-mesin pemancang tiang pancang karena dapat dipindah-pindahkan. Efisiensi generator ini rendah tetapi harganya pun murah. Tekanan kerja yang dapat dihasilkan generator uap *Cochran* tidak lebih dari 8 kg / cm^2 .

c. Generator uap pipa-pipa air

Generator uap pipa-pipa air terdiri dari susunan pipa-pipa yang didalamnya dialiri air yang harus dididihkan. Dalam generator ini, pipa-pipa air dapat dibagi menjadi dua kelompok, yaitu:

Kelompok I : Kelompok pipa-pipa air yang tidak dipanasi, atau kalau mendapatkan pemanasan adalah dari gas asap yang suhunya lebih rendah.

Kelompok II : Kelompok pipa-pipa air yang mendapat pemanasan dari gas asap yang bersuhu tinggi.

Gas asap hasil pembakaran yang dipakai sebagai pemanasnya mengalir di luar pipa-pipa itu. Generator uap pipa-pipa air mempunyai sebuah tangki air yang berfungsi sebagai tempat pemisah antara uap dan air. Berdasarkan sirkulasi air di dalam generator uap pipa-pipa air, generator pipa-pipa air dapat dibedakan atas :

1. Generator uap pipa-pipa air sirkulasi alam (*Natural circulation water tubes boiler*)

Proses sirkulasi air yang terjadi di dalam generator uap pipa-pipa air, terjadi dikarenakan perbedaan berat jenis air yang dipanasi dengan air yang tidak dipanasi.

2. Generator uap pipa-pipa air sirkulasi paksa (*Forced circulation water tubes boiler*)

Generator uap pipa-pipa air sirkulasi paksa adalah generator uap yang bertekanan tinggi karena perbedaan berat jenis air dan uap tidak begitu besar dan tidak mampu lagi menimbulkan sirkulasi di dalam generator uap. Oleh karena itulah maka sirkulasi air yang terjadi di dalam generator uap ini dilakukan dengan bantuan pompa.

Pada generator uap ini, sirkulasi air tidak tergantung pada pemanasan sehingga tangki air dan uap dapat selalu ditempatkan pada bagian atas konstruksi generator uap. Susunan pipa-pipa yang digunakan sebagai pemanas dapat menggunakan pipa-pipa berdiameter yang lebih kecil dan juga laju pembakaran dapat tinggi tanpa bahaya *overheating*. Kapasitas air yang dipompakan mengalir di dalam pipa-pipa didih sama besar dengan kapasitas uap hasil, sehingga air yang mengalir di dalam pipa-pipa didih seluruhnya berubah menjadi uap. Generator uap ini tidak memerlukan tangki yang berfungsi untuk memisahkan uap dan air, karena saat keluar dari pipa-pipa didih air telah berubah menjadi uap seluruhnya.

Berikut ini adalah beberapa contoh generator uap yang tergolong ke dalam generator uap pipa-pipa air :

1. Generator uap seksi (*Section Boiler*)

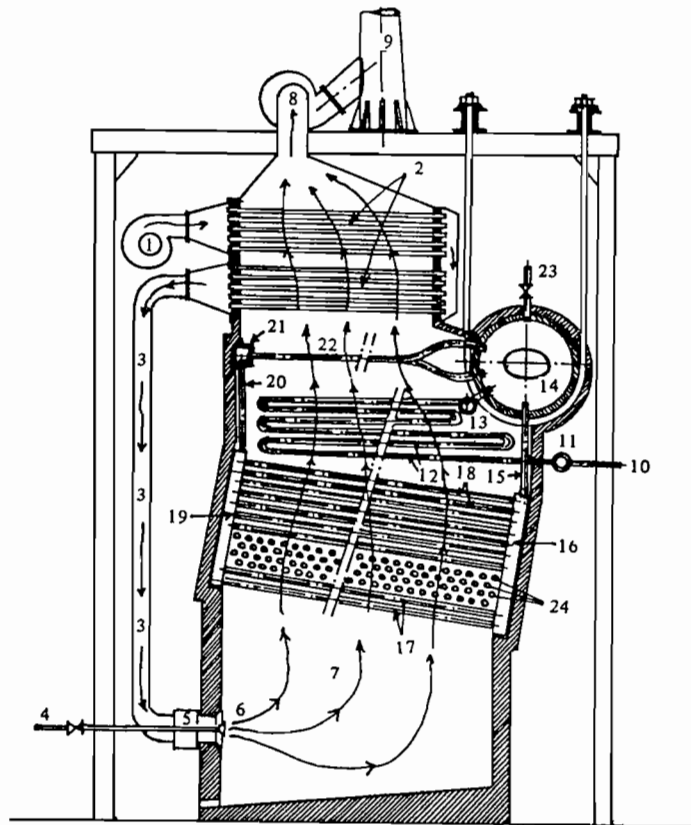
Pada generator uap seksi terdapat sebuah drum ketel yang berdiameter sekitar 120-160 cm. Dari dasar drum ketel ini terdapat pipa-pipa turun (*down comer's pipes*) yang berdiameter sekitar 10 cm. Pipa-pipa turun tersebut berakhir di bawah pada kotak-kotak seksi (*water section boxes*), yaitu berupa kotak air yang dibuat berkelok-kelok, yang pada setiap lekukan tersebut terdapat pipa-pipa penguap air atau *evaporator's pipes*, yang berdiameter 6 sampai 8 cm.

Pipa-pipa penguap tersebut ditempatkan di daerah pancaran api ataupun di daerah aliran gas asap atau daerah konveksi. Api atau gas asap mengalir di antara pipa-pipa dan menyerahkan panasnya.

Satu seksi ketel yang merupakan satu set seksi terdiri dari :

- sebuah pipa air turun (*down comer's pipes*)
- sepasang kotak seksi air dan kotak seksi uap
- sejumlah pipa-pipa penguap air (*evaporator's pipes*)
- sebuah pipa uap naik (*steam-uap riser pipe*)

Dengan demikian satu set seksi tersebut merupakan sebuah ketel mini yang masing-masing terpisah antara yang satu dengan yang lain sehingga ketel tersebut dinamakan ketel seksi.



Gambar 1.4. Generator uap seksi

(Sumber : Ir. M. J. Djokosetyarjo, Ketel Uap, P. T. Pradnya Paramita, hal 217)

2. Generator uap *Yarrow*

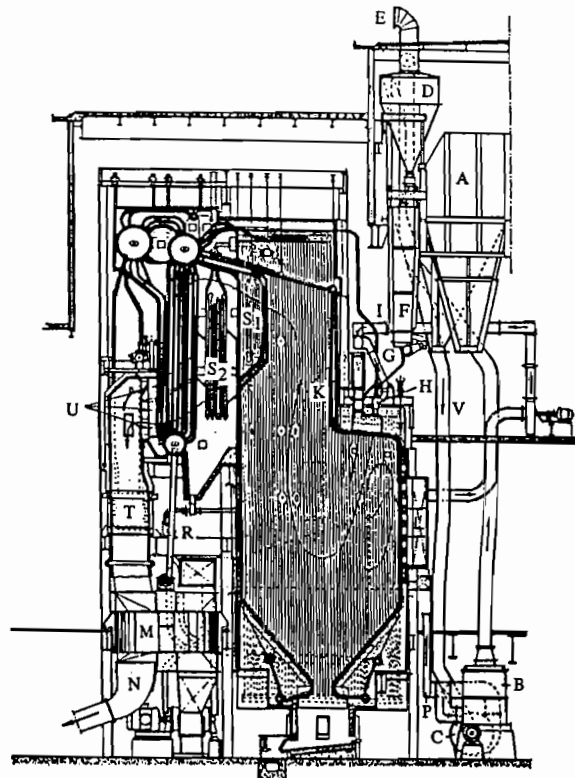
Generator uap *Yarrow* banyak digunakan di kapal-kapal laut, namun ada juga yang dipasang di darat sebagai ketel pembangkit uap untuk pembangkit tenaga listrik.

Tekanan kerja generator uap *Yarrow* tidak melebihi 80 kgf / cm^2 dan kapasitasnya antara 30 sampai 80 ton / jam. Pada generator uap *Yarrow* terdapat sebuah drum utama ketel yang dipasang di atas. Dari

drum sebelah atas ini, dihubungkan oleh pipa-pipa penguap dengan dua buah drum bawah, dengan sudut kemiringan pipa-pipa penguap air lebih dari 20° .

3. Generator uap Pancaran

Pada generator uap pancaran, pipa-pipa penguap ketel seluruhnya menerima panas secara pancaran (radiasi) dari api di dalam tungku sehingga pipa-pipa penguap generator uap pancaran merupakan dinding tungku keseluruhan. Dengan demikian dinding tungku di sebelah dalam dilapisi oleh pipa-pipa penguap yang berdiri vertikal. Adapun jarak antara pipa-pipa penguap tersebut dari besarnya fraksi pendinginan yang disesuaikan dengan bahan bakar yang digunakan di dalam tungku. Generator uap pancaran dimaksudkan untuk mengusahakan agar panas yang terbentuk di dalam tungku sebanyak-banyaknya diserap di daerah pancaran.



Ketel Pancaran Dengan Bahan Bakar Serbuk Batu Bara

A = Bunker batu bara pasir.	M = Pemanas udara LJUNGSTROM.
B = Penggiling batu bara.	N = Gas asap menuju ke Fan Tarik.
C = Fan untuk B.	O = Fan Tekan (Forced Draught Fan).
D = Siklon (Cyclone).	P = Fan untuk pendinginan udara primeir
E = Hubungan dengan udara luar.	R = Fan untuk pengembalian bahan bakar yang tak terbakar.
F = Bunker antara.	S ₁ dan S ₂ = Superheater.
G = Pengumpan (Feeder).	U = Klep pengaturan suhu uap.
H = Pembakar (Burner).	V = Saluran dari D ke C.
I = Fan udara primeir.	
K = Udara sekunder pada burner.	
L = Udara tersier dari M.	

Gambar 1.5. Generator uap pancaran

(Sumber : Ir. M. J. Djokosetyarjo, Ketel Uap, P. T. Pradnya Paramita, hal 244)

I. 4. Bagian-Bagian Dari Generator Uap

Secara umum bagian-bagian dari generator uap adalah sebagai berikut :

1. Alat bakar atau *burner*

Alat ini berfungsi untuk mencampur bahan bakar dengan udara pada proses pembakaran

2. Ruang bakar atau *furnace*

Ruang bakar berfungsi sebagai tempat berlangsungnya proses pembakaran.

3. Bagian pendidihan / penguapan (*evaporator*)

Bagian pendidihan ini berfungsi sebagai tempat pendidihan air hingga terbentuk uap jenuh.

4. *Superheater*

Superheater adalah alat yang berfungsi untuk menjadikan uap panas jenuh menjadi uap panas lanjut.

5. *Ekonomiser*

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

6. Pemanas udara (*air heater*)

Alat ini untuk memanasi udara yang diperlukan pada proses pembakaran.

7. Drum uap (*steam drum*)

Drum uap berfungsi untuk mengumpulkan uap, pemisah uap serta pemasukan uap.

BAB II

PERENCANAAN GENERATOR UAP

II. 1. Pemilihan Jenis Generator Uap

Pada perencanaan generator uap kali ini, akan direncanakan generator uap yang mempunyai tekanan kerja sedang dengan konstruksi yang sederhana, kualitas air isian yang rendah serta perawatan yang relatif murah. Jenis generator uap yang tepat untuk spesifikasi di atas adalah generator uap pipa-pipa api karena konstruksinya yang tidak terlalu rumit serta tidak memerlukan air isian dengan kualitas yang baik. Selain itu juga karena luas bidang penghantar panasnya ke air cukup besar untuk menghasilkan tekanan kerja sedang.

Kemudian dari segi efisiensi, efisiensi generator uap pipa-pipa api cukup tinggi karena hampir seluruh bagian yang dialiri asap bersuhu tinggi dialiri dengan air, dengan demikian kalor yang terbuang keluar sangat kecil sekali. Dan juga dari pemanasan awalnya yang lebih cepat dari generator uap lorong api karena volume air isian generator uap pipa-pipa api lebih kecil jika dibandingkan dengan luas bidang pemanasnya.

Dari pertimbangan-pertimbangan di atas itulah, maka pada perencanaan kali ini akan direncanakan generator uap pipa-pipa api yaitu generator uap lokomotif.

II. 2. Dasar Perencanaan

Pada perencanaan generator uap kali ini akan direncanakan generator uap lokomotif dengan data-data sebagai berikut :

$$\begin{aligned} * \text{ Kapasitas} &= 25 \text{ ton / jam} \\ &20 \end{aligned}$$

- * Temperatur uap = uap panas lanjut
- * Tekanan kerja = 16 Barg
- * Bahan bakar = batubara

II. 3. Pembatasan Masalah

Bentuk dan jenis generator uap bermacam-macam tergantung jenis, uap yang dihasilkan dan konstruksinya. Dan dalam sebuah perencanaan generator uap diperlukan rancangan yang ekonomis, sederhana dan aman dalam pemakaiannya.

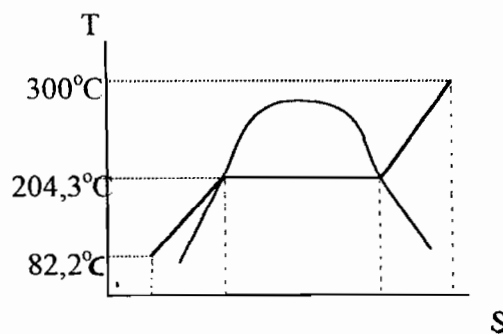
Untuk memperjelas dan menghindari meluasnya masalah yang akan dibahas, maka dalam sebuah perancangan sangat diperlukan adanya batasan masalah. Batasan masalah tersebut juga dapat menghindari terjadinya kesalahpahaman dalam perencanaan. Berikut ini adalah batasan-batasan dalam perencanaan generator uap lokomotif yang telah direncanakan sebelumnya :

1. Perencanaan ini menitikberatkan pada masalah perancangan generator uap pipa-pipa api jenis lokomotif saja dan tidak mencakup untuk generator uap jenis lain.
2. Uap yang dihasilkan berbentuk uap panas lanjut dengan suhu rendah sehingga hanya memerlukan superheater yang sederhana.
3. Generator uap ini menggunakan *ekonomiser* karena pemanasan awal pada generator uap lokomotif ini cukup lama. Namun pada perancangan kali ini tidak dibahas tentang *ekonomiser* sebab air isian yang masuk dalam generator uap lokomotif ini dianggap telah dipanasi sehingga sudah bersuhu 180 °F.

II. 4. Proses Terbentuknya Uap

Pada generator uap lokomotif, pembentukan uap yang terjadi dalam beberapa proses yang cukup panjang. Pertama, tangki diisi dengan air pada temperatur tertentu, kemudian tangki dipanasi sehingga temperatur dalam tangki akan naik mencapai titik didih air sehingga akan terbentuk uap. Uap yang terbentuk pada temperatur didih ini disebut uap jenuh atau uap kenyang (*saturated steam*). Selama tekanan air dan tekanan tangki tetap maka setiap pemberian panas yang terjadi hanya akan berakibat menguapnya air tanpa menaikkan temperatur didihnya. Bila tekanan air dan tekanan dalam tangki dinaikkan atau diturunkan maka temperatur didih air dan temperatur uap akan naik atau turun juga.

Dan bila uap jenuh pada temperatur didih dialirkan pada sebuah pipa atau alat dimana akan terjadi pemanasan lanjut, sehingga uap jenuh tersebut dipanaskan lebih lanjut sampai temperatur mencapai temperatur tertentu, maka uap tersebut dinamakan uap panas lanjut (*superheated steam*).



Gambar 2.1. Diagram T - S

II. 5. Sirkulasi Air Ketel

Pada generator uap lokomotif, sirkulasi air yang terjadi karena adanya perbedaan berat jenis air yang disebabkan karena perbedaan suhu akibat proses pembakaran. Air yang bersuhu tinggi terjadi pada air yang paling dekat dengan keliling permukaan lorong api dan pipa-pipa api, dan air tersebut bergerak ke atas menuju permukaan air di dalam silinder generator tersebut, sedangkan air yang lebih berat massa jenisnya bergerak turun ke dua bagian samping dekat permukaan dalam silinder ketel tersebut.

Dari penjelasan di atas dapat disimpulkan bahwa air yang bersuhu tinggi memiliki berat jenis yang lebih kecil dibandingkan dengan air yang bersuhu rendah. Proses sirkulasi ini akan berlangsung terus selama pemanasan terus berlangsung.

II. 6. Kebutuhan Kalor Generator Uap Lokomotif

Kalor yang dibutuhkan dari proses pembakaran adalah untuk mengubah air yang masuk ke dalam generator yang akan dipanaskan sampai mendidih dan yang sebagian menjadi uap panas lanjut, maka dalam generator uap lokomotif ini dibutuhkan kalor sebesar :¹⁾

$$Q = m_a (h_u - h_a) \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

Dengan : Q = kalor yang dibutuhkan tiap jam (Btu / jam)

$$\begin{aligned} h_u &= \text{entalpi uap panas lanjut pada tekanan 246,59 psia (Btu / lb)} \\ &= 1303,72 \text{ Btu / lb (interpolasi tabel 3)} \end{aligned}$$

¹⁾ Ir. M. J. Djokosetyarjo, Ketel Uap, P. T. Pradnya Paramita, hal 30

h_a = entalpi air masuk ketel pada temperatur 180°F (Btu / lb)

$$= 148,00 \text{ Btu / lb (tabel 4)}$$

m_a = keluaran uap tiap jam (lb / jam)

$$= 25 \text{ ton / jam}$$

$$= 25000 \text{ kg / jam}$$

$$= 55125 \text{ lb / jam}$$

maka :

$$Q = 55125 (1303,72 - 148,00)$$

$$= 63709065 \text{ Btu / jam}$$

$$= 67203655,06 \text{ kJ / jam}$$

BAB III

PROSES PEMBAKARAN

III. 1. Pengertian Pembakaran

Dalam ilmu kimia, yang dimaksud dengan pembakaran adalah oksidasi yang berlangsung pada temperatur tertentu, dengan kecepatan reaksi yang tinggi dan menghasilkan panas. Dan dalam generator uap, proses pembakaran tidak dapat dihindarkan karena proses ini adalah inti atau dasar dari seluruh proses yang terjadi dalam sistem kerja generator uap. Tanpa proses pembakaran maka proses yang lain tidak dapat berlangsung.

Pembakaran dapat diartikan sebagai suatu reaksi kimia yang terjadi antara bahan bakar dengan udara yang menghasilkan panas / kalor dan berlangsung di dalam ruang bakar. Panas yang dihasilkan dalam proses pembakaran dipergunakan untuk mengubah air menjadi uap yang bertekanan. Panas yang dihasilkan pada proses pembakaran diperoleh dari reaksi yang terjadi antara unsur-unsur penyusun bahan bakar dan oksigen dari udara yang berlangsung secara isothermal.

Berbeda dengan mesin tenaga yang lain seperti mesin diesel dan mesin turbin, generator uap dapat menggunakan bahan bakar dengan kualitas rendah dan dapat juga dengan kualitas tinggi.



III. 2. Klasifikasi Bahan Bakar

Oleh karena generator uap dapat menggunakan bahan bakar dari kelas rendah sampai kelas tinggi, maka pada bab ini akan dibahas macam-macam bahan bakar yang sudah lazim digunakan dalam generator uap. Bahan bakar yang digunakan di dalam generator uap pada umumnya dapat diklasifikasikan sebagai berikut :²⁾

1. Bahan bakar padat, yaitu bahan bakar yang berasal dari zat-zat organik.

Bahan bakar padat pada umumnya mengandung unsur-unsur C, H, O₂, N, S, abu, dan air yang kesemuanya terikat dalam satu unsur senyawa kimia.

Contoh bahan bakar padat, yaitu : batubara, kayu, ampas tebu, arang kayu dan lain-lain.

2. Bahan bakar cair adalah bahan bakar yang berasal dari minyak bumi.

Minyak bumi berasal dari dalam tanah dengan jalan memompakannya ke atas untuk diolah menjadi berbagai macam minyak bakar.

3. Bahan bakar gas, yaitu bahan bakar yang berasal dari dalam tanah dimana terkandung minyak bumi. Bahan bakar gas sering disebut dengan gas alam yang timbul pada saat proses pembentukan minyak bumi gas udara (CH₄) atau metan.

Contoh : Metana (CH₄), Gas Alam Cair (LNG)

Dalam pemilihan bahan bakar untuk generator uap, ada beberapa persyaratan umum yang harus dipenuhi, antara lain :

²⁾ Ir. Syamsir A. Muin, Pesawat-pesawat Konversi Energi I, Rajawali, Jakarta, hal 153

1. Nilai pembakaran harus tinggi, yaitu banyaknya kalor yang didapat dari pembakaran senyawa setiap kilogram bahan bakar.
2. Persentase dari bahan bakar yang tidak terbakar harus sekecil mungkin.
3. Murah dan mudah didapat serta dapat mencukupi kebutuhan untuk jangka waktu yang direncanakan.
4. Praktis dan efisien, dalam arti tidak banyak memakan tempat.

Selain menghasilkan kalor, pada proses pembakaran juga menghasilkan gas asap yang bersuhu tinggi. Gas asap ini membawa sebagian kalor yang tidak dipancarkan oleh nyala api ke dinding kotak api. Gas asap bersuhu tinggi dialirkan keluar dapur dan dilewatkan melalui bagian-bagian generator uap, baik melalui pancaran (radiasi) maupun aliran (konveksi). Proses inilah yang menjelaskan bahwa gas asap yang bersuhu tinggi yang dihasilkan pada proses pembakaran berfungsi sebagai pemanas.

Proses pembakaran yang terjadi sebaiknya adalah proses pembakaran yang sempurna, karena dengan proses pembakaran yang sempurna akan dihasilkan kalor / panas yang maksimum. Sedangkan pembakaran yang tidak sempurna sebaiknya dihindari dalam operasi generator uap, karena akan meninggalkan kotoran pada komponen-komponen dalam generator uap. Kemudian ke dalam ruang bakar dialirkan udara yang melebihi ketentuan teoritis, agar kontak yang terjadi antara bahan bakar dengan udara menjadi lebih besar. Kelebihan udara dari kebutuhan teoritis disebut juga dengan “ *Excess air* “. Besarnya *excess air* dalam proses pembakaran tergantung dari jenis bahan bakar yang digunakan.

Dan berikut ini adalah persentase banyaknya kebutuhan udara berlebih untuk berbagai macam bahan bakar :

Tabel 1. Persentase Udara Berlebih Untuk Berbagai Macam Bahan Bakar

• Bahan bakar padat : 1. Batubara 2. Cokas 3. Kayu 4. Ampas tebu	10 – 40 % udara berlebih 20 – 40 % udara berlebih 25 – 50 % udara berlebih 25 – 45 % udara berlebih
• Bahan bakar cair - Minyak	8 – 15 % udara berlebih
• Bahan bakar gas 1. Gas alam 2. <i>Refrinary gas</i> 3. <i>Furnace gas</i>	5 – 10 % udara berlebih 8 – 15 % udara berlebih 15 – 25 % udara berlebih

(Sumber : Ir. M. J. Djokosetyarjo, Ketel Uap, P. T. Pradnya Paramita, hal 39)

Pada perancangan generator uap lokomotif ini, bahan bakar yang digunakan adalah bahan bakar padat alami yaitu batubara. Adapun sifat-sifat dari bahan bakar padat berupa batubara adalah sebagai berikut ;

1) Kandungan zat-zat yang mudah menguap atau *volatile metre*

Kandungan zat yang mudah menguap adalah persentase berat dari zat yang mudah menguap bila dilakukan penguapan (*destilasi*) kering terhadap bahan bakar tersebut tanpa ada hubungan udara pada temperatur 950°C ,

dikurangi dengan persentase berat uap air yang menguap. Sedangkan sisanya akan berupa kokas bahan bakar yang dapat terbakar.

2) Temperatur penyalan atau *ignition temperature*

Adalah temperatur pada saat bahan bakar padat atau cair akan terbakar, setelah menguapnya zat-zat penguapnya. Pada umumnya, temperatur penyalan makin tinggi bila susunan bahan bakar makin sederhana.

3) Temperatur pencetus atau *flashing temperature*

Menyatakan temperatur pada saat panas reaksi yang dihasilkan sama dengan jumlah panas yang dibuang.

4) Kecepatan Pembakaran

Kecepatan pembakaran tergantung dari besar-kecilnya butiran-butiran bahan bakar dan kadar kandungan zat-zat penguap dalam batubara tersebut. Batubara kurus terbakar lebih perlahan namun temperatur penyalannya lebih tinggi dibandingkan dengan batubara gemuk.

5) Kecenderungan untuk menggumpal

Yang dimaksud dengan kecenderungan untuk menggumpal dari sesuatu macam batubara, adalah sifat untuk melunak dan saling menggumpal antara butiran-butiran kokas yang tertinggal setelah berlangsungnya proses penguapan. Batubara yang mempunyai kecenderungan yang besar untuk menggumpal akan menyebabkan arus udara pembakar dari bawah melalui celah-celah rangka bakar menjadi tersumbat sehingga api mudah padam. Untuk menghindari kesulitan tersebut, maka sering dilakukan pencampuran batubara yang kecenderungan menggumpalnya sangat besar (biasanya

disebut batubara gemuk) dengan batubara yang sangat kecil kemampuan menggumpalnya atau yang pecah-pecah pada waktu terbakar (yang biasa disebut batubara kurus).

6) Kadar Abu

Untuk memperkecil kadar abu dalam bahan bakar batubara dapat dilakukan dengan menemukan bongkahan-bongkahan batubara dan mencucinya. Kadar abu yang tinggi dalam batubara akan mempengaruhi proses pembakaran batubara itu dan dapat memperbesar kerugian yang disebabkan terdapatnya sejumlah bahan bakar yang terbang bersama abu, serta setelah pembakaran berlangsung akan menimbulkan kerak-kerak abu.

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

7) Kadar Air

Kadar air di dalam batubara bertambah saat proses pencucian batubara setelah penambangannya. Bertambahnya kadar air di dalam batubara dapat disebabkan karena penimbunan batubara di udara terbuka atau bila butiran-butiran batubara yang semakin halus. Jumlah kadar air dan abu di dalam batubara akan menurunkan nilai pembakaran (*heating value*) dari batubara.

8) Proses membawa sendiri dan merusak sendiri

Proses merusak dengan sendirinya, berlangsung karena batubara ditumpuk secara terbuka di udara bebas dalam waktu yang cukup lama. Hal ini terjadi

karena kandungan zat arang atau karbon (C) dan hidrogen (H) menyusut, sedangkan zat asamnya bertambah yang disebabkan proses oksidasi yang berlangsung secara perlahan-lahan antara udara bebas disekitarnya dengan tumpukan batubara. Dengan demikian nilai pembakaran (*heating value*) batubara menjadi menurun dan pengaruhnya cukup besar terhadap kemampuan menggumpal dari batubara.

Proses dimulai dengan absorpsi oksigen dari udara bebas oleh batubara yang akan terjadi pada permukaan batubara. Karena temperatur yang cukup tinggi, semakin lama oksigen akan terikat secara kimiawi pada batubara. Proses ini akan menghasilkan panas sehingga apabila proses ini berlangsung terus maka akan menyebabkan panas meningkat dan terjadi proses lebih lanjut yaitu proses membara dengan sendirinya. Kecenderungan untuk merusak dengan sendirinya ataupun terbakar dengan sendirinya akan menurun apabila derajat pengarangan (*charring degree*) dari batubara makin tinggi.

Dan untuk menghindari terjadinya proses merusak dengan sendirinya, maka timbunan batubara diusahakan agar tidak mendapatkan pengaruh panas dari luar. Yaitu diusahakan agar tidak bersinggungan dengan pipa-pipa yang panas sekalipun pipa-pipa tersebut telah dilapisi dengan isolasi, bahkan sinar matahari langsung ataupun karena pantulan suatu bidang juga harus dihindari.

III. 3. Analisa Bahan Bakar

Untuk menentukan banyaknya energi yang diperlukan untuk mengubah air menjadi uap di dalam generator uap, maka harus diketahui terlebih dahulu komposisi bahan bakar yang digunakan. Adapun komposisi bahan bakar batubara yang digunakan untuk generator uap lokomotif yang telah direncanakan, yaitu :

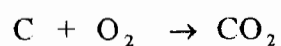
Tabel 2. Persentase komposisi batubara Bukit Asam (% by weight)

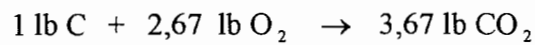
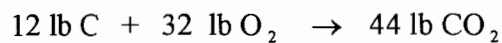
Nama	Rumus	Persentase
Karbon	C	63,5
Hidrogen	H ₂	5,8
Oksigen	O ₂	15,2
Nitrogen	N ₂	1,
Belerang	S	0,5
Abu	Ash	5,0
Air	H ₂ O	9,0

(Sumber : Ir. M. J. Djokosetyarjo, Ketel Uap, P. T. Pradnya Paramita, hal 42)

Proses pembakaran adalah suatu reaksi kimia antara bahan bakar dengan oksigen yang diperoleh dari udara bebas dan menghasilkan unsur atau senyawa baru. Reaksi-reaksi yang terjadi dalam proses pembakaran unsur bahan bakar yaitu proses pembakaran sempurna tiap 1 lb oksigen yang dibutuhkan untuk pembakaran C dan H dalam tiap 1 lb bahan bakar :

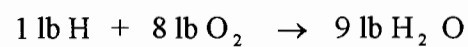
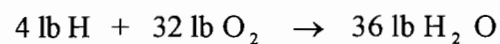
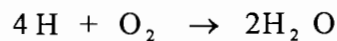
- Karbon (C) terbakar sempurna menjadi CO₂ menurut persamaan :





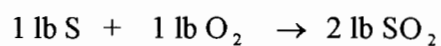
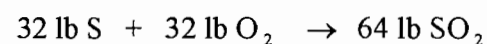
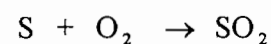
Jadi setiap pembakaran 1 lb karbon dibutuhkan oksigen sebesar 2,67 lb.

- Hidrogen (H) terbakar sempurna menjadi H_2O menurut persamaan :



Jadi setiap pembakaran 1 lb hidrogen dibutuhkan oksigen sebesar 8 lb.

- Belerang (S) terbakar sempurna menjadi SO_2 menurut persamaan :



Jadi setiap pembakaran 1 lb belerang dibutuhkan oksigen sebesar 1 lb.

III. 4. Nilai Pembakaran

Yang dimaksud dengan nilai pembakaran bahan bakar adalah jumlah kalor yang dilepas atau dibebaskan dengan cara pembakaran persatuan volume (Btu / ft^3) bahan bakar, karena bahan bakar mengandung H_2O . Oleh karena H_2O yang terkandung dalam bahan bakar ini dapat berupa air atau uap air, maka nilai pembakaran dapat dibedakan :

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

yaitu nilai pembakaran yang terdapat dalam bahan bakar 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 nilai pembakaran yang dimiliki bahan bakar 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 panas tersebut diperlukan untuk mempertahankan H_2O dalam bentuk uap.

Akan tetapi dalam teknik generator uap, yang tidak diinginkan adalah keadaan H_2O mengembun menjadi cair sehingga dapat bereaksi dengan belerang (S) menjadi H_2SO_2 yang dapat mengikis besi atau baja.

Harga HHV dan LHV untuk bahan bakar batubara dengan memperhatikan komposisi kimia, dapat dihitung dengan persamaan : ³⁾

$$HHV = 33915 C + 144033 \left[H - \frac{O_2}{8} \right] + 10468 \times S \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

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

$$= 27205,652 \text{ kJ / Kg}$$

$$= 11709,095 \text{ Btu / lb bahan bakar}$$

$$LHV = 33915 C + 121423 \left[H - \frac{O_2}{8} \right] + 10468 \times S - 2512 \left[H_2O + \frac{O_2}{8} \right] \quad \dots\dots(3.2)$$

³⁾ Ir. Syamsir A. Muin, Pesawat-pesawat Konversi Energi I, Rajawali, Jakarta, hal 223

$$\begin{aligned}
&= 33915 \times 0,635 + 121423 \left[0,058 - \frac{0,152}{8} \right] + 10468 \times 0,05 - 2512 \\
&\quad \left[0,09 + \frac{0,152}{8} \right] \\
&= 26521,114 \text{ kJ / Kg} \\
&= 11414,4753 \text{ Btu / lb bahan bakar}
\end{aligned}$$

III. 4. Kebutuhan Bahan Bakar

Kebutuhan bahan bakar dapat diperhitungkan berdasarkan jumlah kalor yang dipergunakan dengan nilai pembakaran bawah (LHV), yaitu sebagai berikut :⁴⁾

$$M_b = \frac{M_u (h_u - h_a)}{\eta(LHV)} \dots\dots\dots(3.3)$$

Dengan : M_b = kebutuhan bahan bakar tiap jam (lb / jam)

M = jumlah uap yang dihasilkan tiap jam (lb / jam)

= 25 ton / jm = 55125 lb / jam

h_u = entalpi uap hasil pada tekanan 246,59 psia (Btu / lb)

= 1303,72 Btu / lb (dengan interpolasi dari tabel 3)

h_a = entalpi air masuk ketel pada temperatur 180° F (Btu / lb)

= 148,00 Btu / lb (tabel 4)

LHV = Nilai pembakara bawah

⁴⁾ Ibid, hal 223

$$= 11414,4753 \text{ Btu / lb bahan bakar}$$

η = efisiensi generator uap

$$= 80 \% (\text{Carl D. Shield, Boiler Type Characteristic Function})$$

$$\text{Maka : } M_b = \frac{55125(1303,72 - 148,00)}{0,80(11414,4753)}$$

$$= 6356,449 \text{ lb / jam}$$

$$= 2885,828 \text{ kg / jam}$$

III. 5. Kebutuhan Udara Untuk Pembakaran

Untuk membakar bahan bakar di dalam dapur generator 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 dari unsur-unsur kimia seperti karbon (C), zat air (H), zat pembakar (O), belerang (S), air dan abu. Sedangkan zat yang akan terbakar dan membutuhkan oksigen dari udara adalah C, H, dan S. Dan udara yang diambil pada dasarnya tersusun dari dua unsur utama yaitu nitrogen (N), oksigen (O). Dalam persentase volume, udara tersusun dari 21 % O_2 dan 79 % N_2 . Sedangkan dalam persentase beratnya, udara tersusun dari 23,15 % O_2 dan 76,85 % N_2 .

Sehingga secara umum, kebutuhan oksigen secara teoritis untuk pembakaran dapat dihitung dengan menggunakan rumus :⁵⁾

$$W_{O_2, th} = 2,67 C + 7,94 H_2 + 0,998 S \quad \dots\dots\dots(3.4)$$

⁵⁾ Ir. M. J. Djokosetyarjo, Ketel Uap, P. T. Pradnya Paramita, hal 72

Dimana C, H₂, dan O₂ adalah fraksi berat dari karbon, hidrogen, sulfur dan yang terkandung oleh bahan bakar, dengan menggunakan harga komposisi bahan bakar dapat dihitung :

$$\begin{aligned} W_{O_2 th} &= 2,67 \times 0,635 + 7,94 \times 0,058 + 0,998 \times 0,005 \\ &= 2,16096 \text{ lb / lb bahan bakar} \end{aligned}$$

Di dalam udara terdapat oksigen sebesar 23,15 % sehingga kebutuhan udara teoritis untuk pembakaran setiap 1 lb bahan bakar adalah :⁶⁾

$$\begin{aligned} M_{ut} &= \frac{W_{O_2 th}}{23,15\%} \quad \dots\dots\dots(3.5) \\ &= \frac{2,16096 \text{ lb udara / lb bahan bakar}}{0,2315} \\ &= 9,3346 \text{ lb udara / lb bahan bakar} \end{aligned}$$

Untuk menjamin pembakaran bahan bakar dengan sempurna maka perlu digunakan udara tambahan sebesar 40 % (dari tabel *excess air*), jadi kebutuhan udara untuk pembakaran adalah :⁷⁾

$$M_u = M_{ut} \times m \quad \dots\dots\dots(3.6)$$

Dengan : M_u = kebutuhan udara untuk pembakaran (lb udara / lb bahan bakar)

$$= 9,3346 \text{ lb udara / lb bahan bakar}$$

m = koefisien kebutuhan udara

$$= 100 \% + 40 \% = 1,4$$

⁶⁾ Ibid, hal 73

⁷⁾ Ibid, hal 74

Sehingga :

$$\begin{aligned} M_u &= 9,3346 \text{ lb udara / lb bahan bakar} \times 1,4 \\ &= 13,06844 \text{ lb udara / lb bahan bakar} \end{aligned}$$

Dengan demikian kebutuhan udara untuk pembakaran bahan bakar yang digunakan (W_u) adalah :⁸⁾

$$\begin{aligned} W_u &= M_b \times M_u && \dots\dots\dots(3.7) \\ &= 6356,449 \times 13,06844 \\ &= 83068,872 \text{ lb / jam} \\ &= 37713,2678 \text{ kg / jam} \end{aligned}$$

III. 6. Perhitungan Temperatur Gas Asap Hasil 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 menggunakan persamaan sebagai berikut :⁹⁾

$$CO_2 = 3,67 C = 3,67 \times 0,635 = 2,3305 \text{ lb / lb bahan bakar}$$

$$H_2O = 8,94 H + H_2O = 8,94 \times 0,058 + 0,09 = 0,6085 \text{ lb / lb bahan bakar}$$

$$SO_2 = 2 S = 2 \times 0,005 = 0,01 \text{ lb / lb bahan bakar}$$

$$\begin{aligned} N_2 &= 8,86 C + 26,41 \left(H - \frac{O_2}{8} \right) + 3,2 S + N_2 \\ &= 8,86 \times 0,635 + 26,41 \left(0,058 - \frac{0,152}{8} \right) + 3,2 \times 0,005 + 0,1 \\ &= 9,5741 \text{ lb / lb bahan bakar} \end{aligned}$$

⁸⁾ Ibid, hal 75

⁹⁾ Babcock and Wilcox, Steam Its Generation and Use, hal 6

$$O_2 = 0,15 \times \text{kebutuhan udara teoritis}$$

$$= 0,15 \times 9,3346 = 1,4002 \text{ lb / lb bahan bakar}$$

$$\text{Abu} = 0,05 \text{ lb / lb bahan bakar}$$

Maka jumlah keseluruhannya (M_g) adalah 13,9733 lb / lb bahan bakar

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

$$CO_2 = \frac{2,3305 \text{ lb / lb bahan bakar}}{44} = 0,05297 \text{ lb mol / lb bahan bakar}$$

$$H_2O = \frac{0,6085 \text{ lb / lb bahan bakar}}{18} = 0,03381 \text{ lb mol / lb bahan bakar}$$

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

$$N_2 = \frac{9,3346 \text{ lb / lb bahan bakar}}{28} = 0,33338 \text{ lb mol / lb bahan bakar}$$

$$O_2 = \frac{1,4002 \text{ lb / lb bahan bakar}}{32} = 0,04376 \text{ lb mol / lb bahan bakar}$$

Maka jumlah keseluruhan komposisi bahan bakar adalah 0,46407 lb mol / lb bahan bakar.

Sehingga untuk pemakaian bahan bakar sebesar (M_b) = 6356,448 lb / jam akan dihasilkan gas sebesar :¹⁰⁾

$$W_g = M_b \times M_g \quad \dots\dots\dots(3.8)$$

$$= 6356,449 \times 13,9733 = 88820,569 \text{ lb / jam}$$

¹⁰⁾ Ir. M. J. Djokosetyarjo, Ketel Uap, P. T. Pradnya Paramita, hal 75

Pembakaran berlangsung dengan tekanan konstan, sehingga panas yang timbul dapat dihitung dengan mengalikan volume gas asap dengan harga entalpi dengan unsur-unsurnya dengan menggunakan rumus :¹¹⁾

$$H_{ic} = \text{lb mol CO}_2 \times H(\text{CO}_2) + \text{lb mol H}_2\text{O} \times H(\text{H}_2\text{O}) + \text{lb mol N}_2 \times H(\text{N}_2) + \text{lb mol O}_2 \times H(\text{O}_2) \quad \dots\dots\dots(3.9)$$

Direncanakan temperatur pembakaran bahan bakar $H_{ic} = 540 \text{ R}$ yaitu dengan asumsi keadaan ruang bakar berada pada temperatur 27°C atau $80,6^\circ \text{F}$ dengan menggunakan persamaan di atas dan dengan menggunakan tabel entalpi untuk gas (tabel 5) :

$$\begin{aligned} H_{ic} &= 0,05296 \text{ lb mol / lb bahan bakar} \times 4055,96 \text{ Btu / lb mol} + 0,03380 \text{ lb mol / lb bahan bakar} \times 4284,79 \text{ Btu / lb mol} + 0,33338 \text{ lb mol / lb bahan bakar} \times 3750,57 \text{ Btu / lb mol} + 0,04376 \text{ lb mol / lb bahan bakar} \times 3756,44 \text{ Btu / lb mol} \\ &= 1774,459 \text{ Btu / lb bahan bakar} \\ &= 4122,890 \text{ kJ / kg bahan bakar} \end{aligned}$$

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

$$H_{ic} - H_{is} = \text{LHV} \text{ atau } H_{ic} - H_{is} = 11414,4753 \text{ Btu / lb}$$

Dicoba dahulu dengan temperatur pembakaran bahan bakar (T_c) = 3600 R :

$$H_{ic} = \text{CO}_2 = 0,05297 \text{ lb mol / lb BB} \times 43341 \text{ Btu / lb mol} = 2295,7728 \text{ Btu / lb BB}$$

^{2 11)} M. M. EL. Wakil, Instalasi Pembangkit Daya I, Jakarta, 1992, hal 119

$$H_2O = 0,03381 \text{ lb mol/lb BBx } 35552,3 \text{ Btu/lb mol} = 1202,0233 \text{ Btu/lb BB}$$

$$N_2 = 0,33338 \text{ lb mol/lb BBx } 27862,6 \text{ Btu/lb mol} = 9288,8336 \text{ Btu/lb BB}$$

$$O_2 = 0,04376 \text{ lb mol/lb BBx } 29173,5 \text{ Btu/lb mol} = 1276,6324 \text{ Btu/lb BB}$$

Sehingga jumlah entalpi gas asap keseluruhan = 14063,2621 Btu/lb BB

$$H_{3600} - H_{540} = 12288,8031 \text{ Btu/lb BB lebih besar dari LHV, maka :}$$

Dicoba lagi dengan temperatur pembakaran bahan bakar (T_c) = 2800 R :

$$H_{ic} = CO_2 = 0,05297 \text{ lb mol/lb BBx } 31955,9 \text{ Btu/lb mol} = 1692,7040 \text{ Btu/lb BB}$$

$$H_2O = 0,03381 \text{ lb mol/lb BBx } 26093 \text{ Btu/lb mol} = 882,2043 \text{ Btu/lb BB}$$

$$N_2 = 0,33338 \text{ lb mol/lb BBx } 21073,9 \text{ Btu/lb mol} = 7025,6168 \text{ Btu/lb BB}$$

$$O_2 = 0,04376 \text{ lb mol/lb BBx } 22060,2 \text{ Btu/lb mol} = 965,3544 \text{ Btu/lb BB}$$

Sehingga jumlah entalpi gas asap keseluruhan = 10565,8795 Btu/lb BB

$$H_{2800} - H_{540} = 8791,4205 \text{ Btu/lb BB lebih kecil dari LHV, maka :}$$

Dengan cara interpolasi dapat dihitung :

$$\begin{aligned} T_c &= 2800 \text{ R} + \frac{3600 \text{ R} - 2800 \text{ R}}{14063,2621 - 10565,8795} \times [\text{LHV} - 10565,8795 \text{ Btu / lb BB}] \\ &= 2994,1099 \text{ R} \\ &= 2534,4399^\circ \text{ F} \\ &= 1390,2444^\circ \text{ C} \end{aligned}$$

BAB IV

PERPINDAHAN PANAS

IV.1. Proses Perpindahan Panas

Secara umum, peralatan generator uap adalah aplikasi dari ilmu termodinamika dan perpindahan kalor. Zat alir mempunyai fase yang berhubungan dengan wujudnya yaitu padat, cair dan gas. Secara termodinamika perubahan wujud tersebut dapat terjadi bila dimasukkan energi (berupa panas) pada zat alir tersebut. Perpindahan panas adalah proses perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan suhu di antara benda atau material hingga mencapai kesetimbangan. Dan pada generator uap, proses perubahan wujud tersebut hanya berlangsung dari zat cair ke uap atau gas saja.

Panas yang dihasilkan karena pembakaran bahan bakar dan udara yang berupa gas asap dan api akan dipindahkan kepada air, uap ataupun udara melalui bidang-bidang yang dipanaskan. Air yang ditekan secara tetap dalam suatu bejana yang mendapatkan pemanasan akan mengalami perubahan wujud secara bertahap. Dari bejana yang seluruhnya cairan kemudian akan mengalami pendidihan dimana gelembung uap akan terbentuk, sehingga dalam bejana tersebut terdapat campuran antara air dan uap sampai akhirnya cairan dalam bejana tersebut akan berubah wujud menjadi cair semua.

Dan dalam ilmu perpindahan kalor, proses perpindahan panas dapat berlangsung dengan tiga cara, yaitu :

A. Perpindahan panas secara radiasi

Perpindahan panas secara radiasi adalah perpindahan panas antara suatu benda ke benda lain dengan melalui gelombang-gelombang elektromagnetik dan tidak tergantung pada ada atau tidaknya media di antara benda yang menerima pancaran tersebut. Dan dalam generator uap ini perpindahan panas secara radiasi adalah perpindahan panas yang terjadi dari proses pembakaran bahan bakar ke dinding ruang bakar.

B. Perpindahan panas secara konduksi

Adalah perpindahan panas yang terjadi pada medium yang berhenti (*stationer*), baik padat maupun cair. Perpindahan panas secara konduksi dapat dibayangkan pada perpindahan panas yang terjadi dari dinding dalam pipa ke permukaan luar pipa.

C. Perpindahan panas secara konveksi

Perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi antara suatu permukaan dengan fluida yang bergerak. Perpindahan panas konveksi yang terjadi dalam generator uap lokomotif ini adalah perpindahan panas yang terjadi dari gas asap yang bergerak ke permukaan pipa.

IV.2. Perhitungan Perpindahan Panas Pada Bagian Ruang Bakar

Proses pembakaran bahan bakar dengan udara yang terjadi pada generator uap berlangsung pada ruang bakar. Pada ruang bakar ini proses perpindahan panas terjadi secara radiasi, konveksi dan konduksi. Namun perpindahan panas yang paling dominan adalah perpindahan panas yang terjadi secara radiasi, karena permukaan yang dipanasi menerima panas secara langsung dari api yang bersuhu

tinggi dari hasil pembakaran. Dan besarnya panas yang diterima oleh ruang bakar secara radiasi dapat dihitung dengan menggunakan rumus *Stefan-Boltzman*, yaitu¹²⁾

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

Dengan :

Q_r = total panas yang diserap radiasi (Btu / jam)

A = luas efektif nyala api (ft^2)

= ($S \times S$) $\times 5$

S = Sisi kotak api

= 1,5 m = 4,9215 ft (direncanakan)

A = (4,9215 $\times$ 4,9215) $\times 5$

= 121,106 ft^2

e = emisivitas bahan yang menerima panas radiasi untuk bahan silinder

= 0,79 (dari tabel 6)

T_1 = Temperatur rata-rata ($^{\circ}\text{R}$)¹³⁾ \dots\dots\dots(4.2)

$$= \left(\frac{T_{\text{pembakaran}} + T_{\text{gas asap meninggalkan ruang bakar}}}{2} \right), \text{ temperatur gas asap}$$

meninggalkan ruang bakar diperkirakan sebesar 2800 R = 2340,33 $^{\circ}\text{F}$

= 1282,406 $^{\circ}\text{C}$

¹²⁾ Carl De Shield, Boiler Type Characteristic And Function, Mc. Grawhikl Book Company, New York, 1972, hal 165

¹³⁾ Ibid, hal 165

$$= \left(\frac{2994,1099 + 2800}{2} \right)$$

$$= 2897,055 \text{ R}$$

$$= 2437,385^\circ \text{ F} = 1336,325^\circ \text{ C}$$

T_2 = temperatur permukaan yang menerima panas radiasi (R)

$$T_2 = (T_{\text{didih air}} + T_p)^{14)} \quad \dots\dots\dots(4.3)$$

T_p = Beda suhu permukaan dengan titik didih air

Permukaan pipa yang menerima panas secara radiasi dari nyala api mempunyai perbedaan temperatur $< 50^\circ \text{ F}$ lebih tinggi dari titik didih air yang ada di dalam pipa.

Dengan demikian perkiraan harga $T_p = 50^\circ \text{ F}$ dapat diterima.

Titik didih air pada tekanan 246,59 psia = $399,74^\circ \text{ F} = 204,3^\circ \text{ C}$

Sehingga :

$$T_2 = (399,74 + 50)^\circ \text{ F}$$

$$= 449,74^\circ \text{ F}$$

$$= 909,74 \text{ R}$$

$$= 232,078^\circ \text{ C}$$

Maka besarnya panas radiasi yang diterima pipa-pipa api radiasi adalah :

$$Q_r = 0,173 \times 121,106 \times 0,79 \times \left[\left(\frac{2437,385}{100} \right)^4 - \left(\frac{449,74}{100} \right)^4 \right]$$

$$= 5834876,589 \text{ Btu / jam}$$

¹⁴⁾ Ibid, hal 165

$$= 6154933,111 \text{ kJ / jam}$$

IV.3. Perhitungan Temperatur Gas Asap Meninggalkan Ruang Bakar

Temperatur gas asap yang meninggalkan ruang bakar diperkirakan sebesar 2800 R, maka dengan menentukan temperatur gas asap meninggalkan ruang bakar maka harga tersebut dapat diperiksa dengan menggunakan rumus sebagai berikut

.15)

$$Q_r = M_b [LHV \times \eta - (M_g \times C_{p_g} \times T_g)] \quad \dots\dots\dots(4.4)$$

Dengan : Q_r = Panas yang diserap secara radiasi (Btu / jam)

$$= 5834876,589 \text{ Btu / jam}$$

M_b = Kebutuhan bahan bakar tiap jam (lb / jam)

$$= 6356,449 \text{ lb / jam}$$

LHV = Nilai pembakaran bawah

$$= 11414,4753 \text{ Btu / lb } ^\circ \text{F}$$

η_f = efisiensi dapur = 0,9 (asumsi)

M_g = Berat gas asap yang dihasilkan per lb bahan bakar

$$= 13,9733 \text{ lb / lb bahan bakar}$$

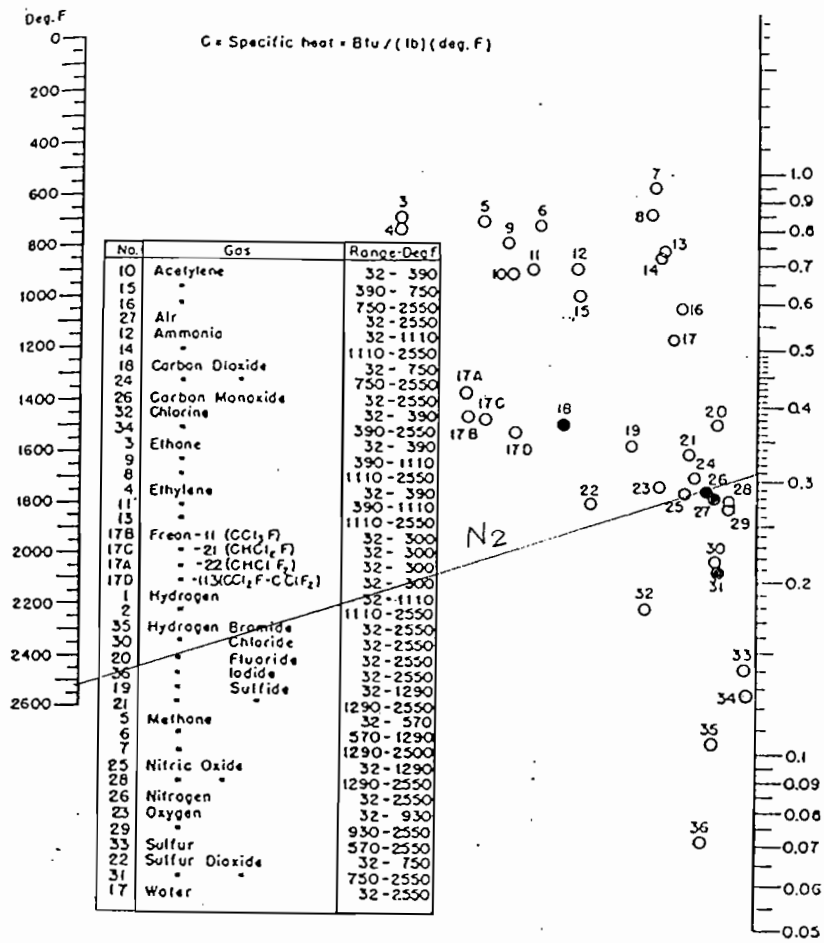
C_{p_g} = Panas jenis gas asap (Btu / lb $^\circ \text{F}$)

T_g = Temperatur gas asap meninggalkan ruang bakar

Dengan menggunakan monogram panas jenis gas panas pada tekanan 1 atm dan temperatur 3075,285 R dan dengan komposisi gas asap, maka :

¹⁵⁾ Ir. Syamsir A. Muin, Pesawat-pesawat Konversi Energi I, Ketel Uap, Rajawali, Jakarta, hal 48

$$C_p = \frac{\text{massa komposisi gas asap}}{\text{jumlah berat komposisi gas asap}} \times \text{panas jenis}$$



Gambar 4.1. Monogram panas jenis.

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 11-28)

Sehingga diperoleh :

$$C_p \text{CO}_2 = \frac{2,3305}{13,9733} \times 0,55 = 0,09173$$

$$C_p \text{H}_2\text{O} = \frac{0,6085}{13,9733} \times 0,29 = 0,01263$$

$$C_p \text{N}_2 = \frac{9,5741}{13,9733} \times 0,31 = 0,21240$$

$$C_p \text{SO}_2 = \frac{0,01}{13,9733} \times 0,21 = 0,00015$$

Didapat jumlah keseluruhan C_p adalah $0,31691 \text{ Btu / lb}^\circ \text{F}$

Dengan memasukkan harga-harga di atas ke persamaan 4.4, diperoleh :

$$5834876,589 = 6356,449 \times [11414,4753 \times 0,9 - (13,9733 \times 0,31691 \times T_g)]$$

$$T_g = 2254,88^\circ \text{F} = 1234,93^\circ \text{C}$$

Sehingga harga temperatur gas asap meninggalkan ruang bakar diperoleh dengan

$$\begin{aligned} \text{ralat sebesar} &= \frac{2340,33 - 2254,88}{2340,33} \times 100 \% \\ &= 3,65 \% \end{aligned}$$

Karena perbedaannya cukup kecil maka temperatur gas asap meninggalkan ruang bakar sebesar $= 2800 \text{ R} = 2340,33^\circ \text{F} = 1282,41^\circ \text{C}$.

IV.4. Perancangan Pipa Api

Perpindahan panas yang terjadi pada generator uap selain melalui dinding silinder juga terjadi melalui pipa-pipa api yaitu dari bagian dalam pipa dan bagian luar dinding pipa. Panas yang dihasilkan pada pembakaran bahan bakar dan oksigen yang terjadi pada ruang bakar seluruhnya diterima oleh air yang akan

berubah menjadi uap yaitu berupa uap jenuh. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan temperatur udara luar dengan temperatur bagian dalam ketel sehingga menimbulkan terjadinya kerugian panas yang mengalir melalui dinding ketel dan isolasi ketel ke udara luar.

Kemudian dalam generator uap Lokomotif ini, kalor yang dihasilkan pada cerobong :¹⁶⁾

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{cerobong}} &= W_g \times C_{p_{\text{gas}}} \times (T_{\text{masuk cerobong}} - T_{\text{udara luar}}) \quad \dots\dots\dots(4.5) \\
 &= 88820,569 \times 0,31691 \times (572 - 80) \\
 &= 13848878,25 \text{ Btu / jam} \\
 &= 14608521,36 \text{ kJ / jam}
 \end{aligned}$$

Dan panas yang diterima oleh air melalui dinding pipa api :¹⁷⁾

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{pa}} &= Q_{\text{kebutuhan}} - (Q_r + Q_{\text{superheater}} + Q_{\text{cerobong}}) \quad \dots\dots\dots(4.6) \\
 &= 63709065 - (5834876,589 + 650000 + 13848878,25) \\
 &= 43375310,16 \text{ Btu / jam} \\
 &= 45754546,58 \text{ kJ / jam}
 \end{aligned}$$

Dalam perancangan generator uap lokomotif ini, pipa-pipa api yang dirancang adalah pipa dengan ukuran 2 inchi (dari tabel 7) dengan :

Diameter dalam = 2,067 inchi

Diameter luar = 2,375 inchi

Panjang pipa = 4,5 m = 14,7645 ft

¹⁶⁾ Ibid, hal 48

¹⁷⁾ Ibid, hal 48

IV.5. Perpindahan Panas Pada Pipa-pipa Api

Perpindahan panas dari asap pembakaran ke air melalui bidang pemanas yaitu dinding pipa-pipa api terjadi secara konveksi karena pipa-pipa api memperoleh panas dari gas asap yang mengalir didalamnya. Selanjutnya panas dirambatkan dari dinding yang bersuhu tinggi ke dinding yang bersuhu lebih rendah yaitu dari permukaan bagian dalam pipa yang bersentuhan dengan asap ke permukaan luar pipa yang bersentuhan dengan air secara konveksi.

Laju perpindahan panas yang terjadi dari gas asap ke air berdasarkan rumus kesetimbangan panas yaitu :¹⁸⁾

$$Q = U \times A \times \Delta t_m \quad \dots\dots(4.7)$$

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

U = Konduktansi panas gabungan (Btu / ft² jam ° F)

A = Luas total bidang pemanas (ft²)

Jika luas bidang permukaan tiap pipa adalah :

$$\begin{aligned} A_o &= \pi \times OD \times L \\ &= 3,14 \times \left(\frac{2,375}{12} \right) \times 14,7645 \\ &= 9,176 \text{ ft}^2 \end{aligned}$$

Luas bidang pemanas untuk jumlah n pipa :

$$A = n \times A_o$$

Jumlah pipa yang direncanakan adalah 140 buah, maka :

¹⁸⁾ Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 11-22



$$A = 140 \times 9,176$$

$$= 1284,64 \text{ ft}^2$$

Untuk menghitung luas penampang dalam pipa :

$$A_{p_1} = \frac{\pi}{4} \times ID^2$$

$$= \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{2,067}{12} \right)^2$$

$$= 0,0233 \text{ ft}^2$$

Luas penampang dalam untuk 140 buah pipa adalah :

$$A_{p_n} = n \times A_{p_1}$$

$$= 140 \times 0,0233$$

$$= 3,262 \text{ ft}^2$$

Sehingga untuk menghitung massa gas *velocity* adalah dengan menggunakan rumus :¹⁹⁾

$$W_{vg} = \frac{W_g}{A_{p_n}} \quad \dots\dots\dots(4.8)$$

$$= \frac{88820,569}{3,262}$$

$$= 27228,868 \text{ lb / jam ft}^2$$

Karena suhu kedua fluida berubah dari inlet ke outlet maka Δt_m dihitung sebagai

log mean temperature difference :²⁰⁾

¹⁹⁾ Ibid, hal 11-23

²⁰⁾ Ir. G. Harjanto, Pesawat Pendingin Pemanas, Pusat Penerbitan, Fakultas Teknik UGM, 1980, hal 15

$$\Delta t_m = \frac{T_{g1} - T_{g2}}{\log e \frac{T_{g1} - T_a}{T_{g2} - T_a}} \dots\dots\dots(4.9)$$

Dengan : T_{g1} = Temperatur gas meninggalkan ruang bakar

$$= 2800 \text{ R} = 2340,33 \text{ } ^\circ\text{F} = 1282,41 \text{ } ^\circ\text{C}$$

T_{g2} = Temperatur gas meninggalkan pipa-pipa api

$$= 800 \text{ } ^\circ\text{F (rencana)} = 426,667 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} \Delta t_m &= \frac{2340,33 - 800}{\log e \frac{2340,33 - 399,74}{800 - 399,74}} \\ &= 731,401 \text{ } ^\circ\text{F} = 386,556 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Temperatur gas asap :

$$\begin{aligned} T_f &= T_{\text{titik didih air}} + \frac{\Delta t_m}{2} \\ &= 399,74 + \frac{731,401}{2} \\ &= 765,441 \text{ } ^\circ\text{F} = 407,467 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Untuk film gas dengan temperatur 765,441 °F dan diameter luar pipa (OD)

= 2,375 inchi dengan menggunakan gambar 4.2 dapat diperoleh harga $K_{re} = 2,1$,

jadi bilangan Reynoldnya adalah :²¹⁾

$$\begin{aligned} N_{re} &= K_{re} \times W_{vg} \\ &= 2,1 \times 27228,868 \end{aligned} \dots\dots\dots(4.10)$$

²¹⁾ Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 11-28

$$= 57180,624$$

Karena bilangan Reynold lebih besar dari 3200, sehingga dapat diketahui bahwa aliran gas asap dalam susunan pipa-pipa didih konveksi adalah aliran turbulen di sisi luar pipa, dan untuk konduktansi panas konveksi film gas dapat dihitung dengan menggunakan rumus :²²⁾

$$U_{cg} = U_{cl} \times F_{pp} \times F_t \quad \dots\dots\dots(4.11)$$

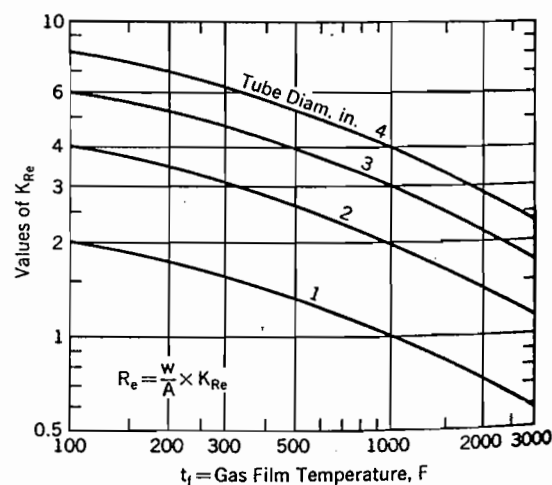
Dengan :

U_{cg} = Konduktansi panas konveksi film gas asap (Btu / ft² jam ° F)

U_{cl} = Dasar penghantar aliran konveksi memanjang (Btu / ft² jam ° F)

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

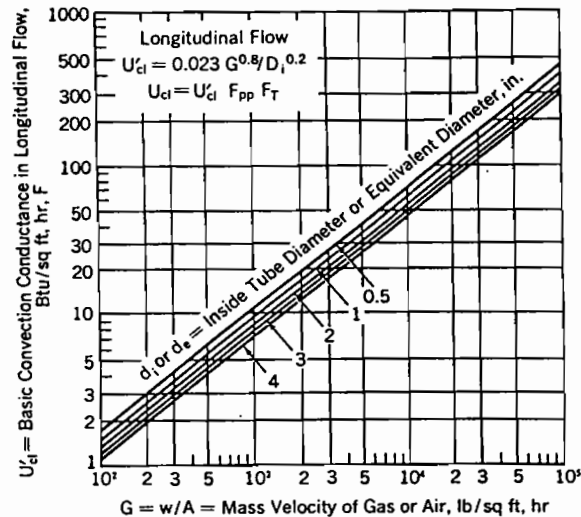
F_t = Faktor temperatur



Gambar 4.2. Diagram faktor bilangan Reynold untuk temperatur film gas pada berbagai diameter pipa

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 14-6)

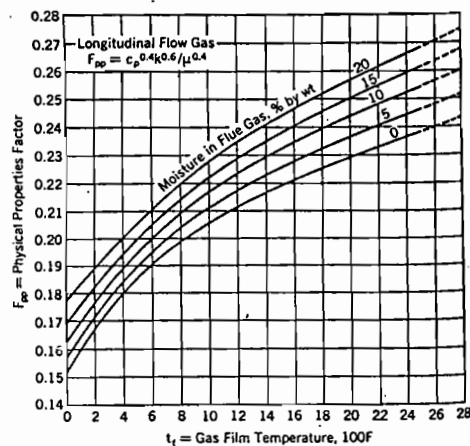
²²⁾ Ibid, hal 14-6



Gambar 4.3. Diagram konduktansi panas konveksi panas dasar aliran memanjang untuk laju aliran massa gas pada berbagai diameter pipa.

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 4-8)

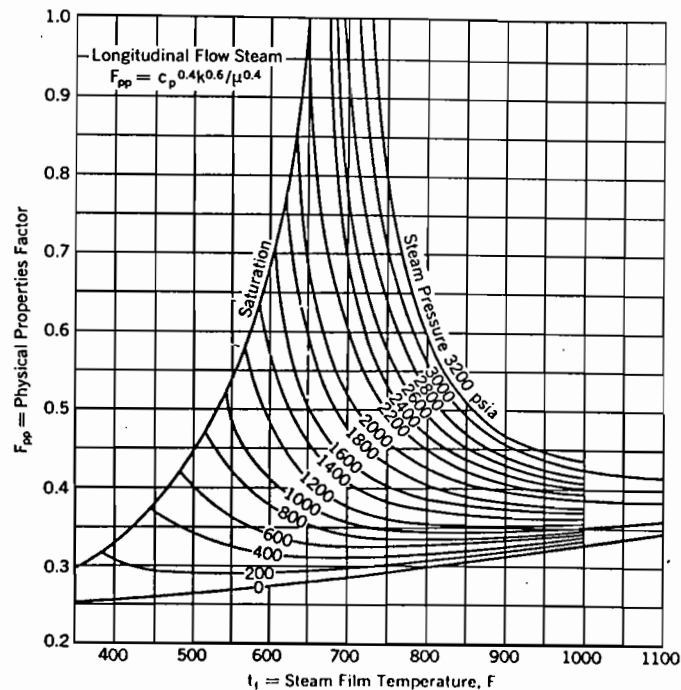
Berdasarkan gambar 4.3 untuk *gas mass flow* $W_{vg} = 27228,868 \text{ lb / jam ft}^2$ dan diameter dalam pipa = 2,067 inchi, maka besarnya konduktansi dasar (U_{cl}) adalah = $150 \text{ Btu / ft}^2 \text{ jam } ^\circ \text{F}$.



Gambar 4.4. Diagram pengaruh temperatur gas film (t_f) pada faktor sifat fisik

untuk arah aliran gas memanjang

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 4-8)



Gambar 4.5. Diagram faktor temperatur karena perubahan *mass velocity* dari keseluruhan lapisan film dasar untuk aliran memanjang dari udara gas atau uap.

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 4-9)

Sedangkan sifat-sifat fisis efek dari film temperatur, untuk $(t_f) = 765,441$ °F dan 4,35 % H_2O di dalam gas asap dengan menggunakan gambar 4.4 maka dapat diperoleh faktor fisik, efek film gas (F_{pp}) sebesar 0,2.

Sehingga untuk temperatur film (t_f) sebesar 765,441 °F dengan menggunakan temperatur borongan (bulk temperatur) sebesar
$$= \frac{2340,33 + 800}{2}$$

 $= 1570,165$ °F dapat dicari harga faktor temperatur (f_t) sebesar 1,6.

Dari harga-harga yang didapat maka dapat dihitung konduktansi panas film gas, yaitu sebagai berikut :

$$U_{cg} = 150 \times 0,2 \times 1,6$$

$$= 54,4 \text{ Btu / ft}^2 \text{ jam } ^\circ \text{F}$$

Perhitungan konduktansi panas film air dapat dihitung dengan memakai rumus :²³⁾

$$H_p = h_a \left[\frac{P}{P_a} \right]^{0,4} \text{ Btu / ft}^2 \text{ jam } ^\circ \text{F} \quad \dots\dots\dots(4.12)$$

Dengan :

H_p = konduktansi panas film air pada tekanan kerja (Btu / ft² jam ° F)

h_a = Konduktansi panas konveksi film air pada tekanan atmosfir (Btu / ft² jam ° F)

P = Tekanan kerja pada generator (Psia)

$$= 246,59 \text{ psia}$$

P_a = tekanan atmosfir (Psia)

$$= 14,7 \text{ psia}$$

Apabila $Q / A = 58044420 / 1284,64$

$$= 45183,413 \text{ Btu / ft}^2 \text{ } ^\circ \text{F}$$

Jika syarat Q / A adalah $5000 < Q / A < 75000$, maka Q / A memenuhi syarat.

Sehingga $h_a = 0,168 \times (\Delta T)^3 \text{ Btu / ft}^2 \text{ jam } ^\circ \text{F} \quad \dots\dots\dots(\text{tabel 8})$

Dengan $\Delta T = T_{\text{surface}} - T_{\text{saturated}}$

$$= 15^\circ \text{F (rencana)}$$

$$h_a = 0,168 \times (15)^3 = 567 \text{ Btu / ft}^2 \text{ jam } ^\circ \text{F}$$

²³⁾ Teori dan Soal Perpindahan Kalor, Alih Bahasa, E. Jasfi, Erlangga, 1987, hal 215

Setelah didapat harga h_a , kemudian harga-harga tersebut dimasukkan ke dalam persamaan 4.12, yaitu :

$$H_p = U_a = 567 \times (246,59 / 14,7)^{0,4}$$

$$= 1751,646 \text{ Btu} / \text{ft}^2 \text{ jam } ^\circ \text{F}$$

$$T_{\text{saturated rencana}} = 400^\circ \text{F dan } T_{\text{surface}} = 15 + 400 = 415^\circ \text{F}$$

$$Q_{pa} = U_a \times A \times (T_{\text{surface}} - T_{\text{saturated}})$$

$$39653300,03 = 1751,646 \times 1284,64 \times (T_{\text{surface}} - 400)$$

$$T_{\text{surface}} = 417,62^\circ \text{F}$$

$$\text{Pemeriksaan } T_{\text{surface}} = \left[\frac{417,62 - 415}{417,62} \right] \times 100 \% = 0,627 \%$$

Perbedaan sangat kecil sehingga perkiraan $\Delta T = 15^\circ \text{F}$ dapat diterima.

Kemudian konduktansi dari bahan pipa diambil dari tabel Konduktifitas bahan (tabel 9), yaitu sebesar 108. Sehingga dengan memasukkan harga-harga yang telah didapat, dapat dihitung besarnya U dengan rumus :²⁴⁾

$$U = \frac{1}{\left[\frac{1}{U_{cg} \frac{OD}{ID}} \right] + \left[\frac{0,5 \times OD \times \log e \frac{OD}{ID}}{K} \right] + \left[\frac{1}{U_a} \right]} \quad \dots\dots\dots(4.13)$$

$$= \frac{1}{0,0172681704 + 0,007413395 + 0,0005708916}$$

$$= 43,7 \text{ Btu} / \text{ft}^2 \text{ jam } ^\circ \text{F}$$

²⁴⁾ Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, 1952, hal 14-6

Jadi laju perpindahan panas pada pipa-pipa api adalah :

$$\begin{aligned}
 Q &= U \times A \times \Delta t_m \\
 &= 43,7 \times 1284,64 \times 731,401 \\
 &= 41059951,05 \text{ Btu / jam} \\
 &= 43312184,65 \text{ kJ / jam}
 \end{aligned}$$

Pemeriksaan laju perpindahan panas pada pipa-pipa api :

$$\begin{aligned}
 \text{Ralat} &= \frac{43375310,16 - 41059951,05}{43375310,16} \times 100 \% \\
 &= 5,34 \%
 \end{aligned}$$

Perbedaan cukup kecil sehingga perancangan generator uap lokomotif dengan 140 buah pipa api dapat dilaksanakan.

IV.6. Perencanaan *Superheater*

Superheater merupakan salah satu bagian atau kelengkapan dari ketel uap yang berfungsi untuk memanaskan uap jenuh yang telah dihasilkan oleh pipa-pipa penguap menjadi uap panas lanjut sehingga diperoleh temperatur dan tekanan uap yang sesuai dengan kebutuhan. Namun pada perencanaan kali ini *superheater* berfungsi hanya untuk menjaga agar suhu uap jenuh tidak turun dan tidak mengembun.

Disamping fungsi langsung dari *superheater* tersebut secara tidak langsung *superheater* juga merupakan alat untuk meningkatkan efisiensi ketel, karena *superheater* memperoleh panas dengan jalan mengabsorpsi kembali gas asap yang akan dibuang ke cerobong asap. Oleh karena itu perencanaan *superheater* dibuat agar dapat melaksanakan perpindahan panas sesuai dengan jumlah panas yang

diperlukan untuk menaikkan temperatur uap jenuh menjadi uap panas lanjut yang dikehendaki pada tekanan konstan.

Pada perencanaan generator uap lokomotif ini digunakan *superheater* konveksi yang dipasang di luar ruang bakar. Diharapkan arah aliran uap dan gas adalah searah (*parallel flow*). Dengan *parallel flow*, pipa-pipa *superheater* mempunyai perbedaan temperatur rata-rata (ΔT_w) yang lebih rendah sehingga memerlukan bidang pemanas yang lebih besar, akan tetapi *superheater* mempunyai distribusi temperatur yang merata.

Data-data *superheater* yang direncanakan adalah sebagai berikut :

Kebutuhan panas *superheater*, $Q_{sup} = 650000 \text{ Btu / jam}$

Jumlah aliran uap yang dipanaskan, $W_u = 55125 \text{ lb / jam}$

Tekanan kerja, $P = 246,59 \text{ Psia}$

Temperatur uap masuk *superheater*, $T_{u_1} = 399,74^\circ \text{ F} = 204,3^\circ \text{ C}$

Temperatur uap keluar *superheater*, $T_{u_2} = 572^\circ \text{ F} = 300^\circ \text{ C}$

Temperatur gas asap masuk, $T_{g_1} = 800^\circ \text{ F} = 426,667^\circ \text{ C}$

Nominal pipa 2 inchi schedule 80 XS (table 7), dengan :

- Diameter luar, $OD = 6,0325 \text{ cm} = 2,375 \text{ inchi}$
- Diameter dalam, $ID = 5,25 \text{ cm} = 2,067 \text{ inchi}$

Tebal pipa, $t = 0,55 \text{ cm} = 0,154 \text{ inchi}$

Bahan pipa baja Carbon SA 210 C, $\tau_{ijin} = 12000 \text{ Psia}$ (table 13)

Jarak dari pusat ke pusat :

- Ke samping (*side spacing*), $SS = 12 \text{ cm} = 4,728 \text{ in} = 0,394 \text{ ft}$

- Ke belakang (*back spacing*), BS = 12 cm

Jumlah pipa, $n = 81$ buah

Jumlah deret pipa :

- Ke samping, $m = 9$ pipa
- Ke belakang, $h = 9$ pipa

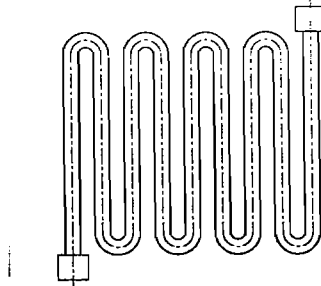
Radius kelengkungan pipa, $r = 6$ cm

Lebar *superheater*, $b = 90$ cm

Panjang tiap pipa *superheater*, L :

$$\begin{aligned}
 L &= 0,5 \times h \times \{(b + X) - (r + 0,5 \times OD) + [b - (2 \times r + OD)]\} + [(h - 1) \times 3,14 \times r] \\
 &= 0,5 \times 9 \times [(90 + 5) - (6 + 0,5 \times 6,0325) + [90 - (2 \times 6 + 6,0325)]] + [(8 \times 3,14 \times 6)] \\
 &= 860,56 \text{ cm} \\
 &= 28,652 \text{ ft}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan data-data spesifikasi dan skema susunan *superheater* di atas, maka dapat dihitung luas *superheater* yang direncanakan.



Gambar 4.6. Konstruksi Pipa-pipa Superheater

Luas permukaan tiap pipa *superheater*, A_o :

$$\begin{aligned}
 A_o &= 3,14 \times OD \times L \\
 &= 3,14 \times \frac{2,375}{12} \times 28,652
 \end{aligned}$$

$$= 17,806 \text{ ft}^2$$

Luas penampang dalam pipa *superheater*, A_s :

$$\begin{aligned} A_s &= n \times \left(\frac{1}{4} \times 3,14 \times ID^2 \right) \\ &= 81 \times \left(\frac{1}{4} \times 3,14 \times \left(\frac{2,067}{12} \right)^2 \right) \\ &= 1,88 \text{ ft}^2 \end{aligned}$$

Luas permukaan kotak *superheater* dengan m baris pipa, A_t :

$$\begin{aligned} A_t &= m \times A_o \\ &= 9 \times 17,806 \\ &= 160,25 \text{ ft}^2 \end{aligned}$$

Luas penampang aliran gas asap, A_g :

$$\begin{aligned} A_g &= [(m-1)(SS-OD)(b+2X)] + [(2Y-OD)(b+2X)] + (m \times OD \times X) \\ &= [(9-1)(12-6,0325)(90+2 \times 5)] + [(2 \times 5-6,0325)(90+2 \times 5)] + (9 \times 6,0325 \times 5) \\ &= 6038,96 \text{ cm}^2 = 6,71 \text{ ft}^2 \end{aligned}$$

IV. 7. Perpindahan Panas pada *Superheater*

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya bahwa *superheater* yang direncanakan menerima perpindahan panas secara konveksi. Laju perpindahan panas *superheater* dapat dihitung dengan rumus :²⁵⁾

$$Q = U \times A \times \Delta T_m \quad \dots\dots\dots(4.14)$$

²⁵⁾ J. P. Holman, Perpindahan Kalor, Ed.5, 1984, hal 453

Dimana :

U = Konduktansi panas gabungan (Btu / ft² jam ° F)

A = Luas permukaan bidang pemanas (ft²)

ΔT_m = Beda temperatur rata-rata logaritma (° F)

Kemudian mencari besarnya beda temperatur rata-rata logaritmik, ΔT_m .²⁶⁾

$$\Delta T_m = \frac{(T_{g1} - T_{u1}) - (T_{g2} - T_{u2})}{\ln \left(\frac{T_{g1} - T_{u1}}{T_{g2} - T_{u2}} \right)} \dots\dots\dots(4.15)$$

Dengan : T_{u1} = Temperatur uap masuk *superheater*

$$= 399,74^\circ \text{F} = 204,3^\circ \text{C}$$

T_{u2} = Temperatur uap keluar *superheater*

$$= 572^\circ \text{F} = 300^\circ \text{C}$$

T_{g1} = Temperatur gas asap masuk *superheater*

$$= 800^\circ \text{F}$$

T_{g2} = Temperatur gas asap keluar *superheater*

Temperatur gas asap keluar *superheater* (T_{g2}) dapat dicari dengan rumus :²⁷⁾

$$m_u \times C_{p_u} \times (T_{u2} - T_{u1}) = W_g \times C_{p_g} \times (T_{g1} - T_{g2}) \dots\dots\dots(4.16)$$

dengan :

m_u = Kapasitas ketel

²⁶⁾) Ir. Syamsir A. Muin, Pesawat-pesawat Konversi Energi : Ketel Uap, 1987, hal 105

²⁷⁾) Gustaf A. Gaffet, ScD, Steam Power Operation, 1952, hal 93

$$= 55125 \text{ lb / jam} = 25000 \text{ kg / jam}$$

Cp_u = Panas jenis uap panas lanjut pada suhu $572^\circ \text{F} = 300^\circ \text{C}$ (tabel 10)

$$= 1,9825 \text{ kJ / kg } ^\circ \text{C}$$

W_g = Massa gas asap hasil tiap jam

$$= 88820,569 \text{ lb / jam} = 40324,538 \text{ kg / jam}$$

Cp_g = Panas jenis gas asap pada suhu $800^\circ \text{F} = 426,667^\circ \text{C}$ (tabel 10)

$$= 1,134 \text{ kJ / kg } ^\circ \text{C}$$

Dengan memasukkan harga-harga di atas ke persamaan 4.16, maka didapat :

$$25000 \times 1,9825 (300 - 204,3) = 40324,538 \times 1,134 \times (426,667 - T_{g_2})$$

$$T_{g_2} = 272,365^\circ \text{C} = 522,257^\circ \text{F}$$

Dengan demikian harga ΔT_m :

$$\Delta T_m = \frac{(426,667 - 204,3) - (300 - 272,365)}{\ln \left(\frac{426,667 - 204,3}{300 - 272,365} \right)}$$

$$= 93,621^\circ \text{C} = 200,518^\circ \text{F}$$

Temperatur rata-rata uap, T_{ur} :

$$T_{ur} = 0,5 (T_{u_1} + T_{u_2})$$

$$= 0,5 (204,3 + 300)$$

$$= 252,15^\circ \text{C} = 485,87^\circ \text{F}$$

Temperatur rata-rata gas asap, T_{gr} :

$$T_{gr} = 0,5 (T_{g_1} + T_{g_2})$$

$$= 0,5 (426,667 + 272,365)$$

$$= 349,519^{\circ}\text{C} = 661,129^{\circ}\text{F}$$

Temperatur gas film rata-rata, T_{fr} :

$$\begin{aligned} T_{fr} &= T_{ur} + 0,5 \Delta T_m \\ &= 252,15 + (0,5 \times 93,621) \\ &= 298,961^{\circ}\text{C} = 570,1298^{\circ}\text{F} \end{aligned}$$

Kemudian besarnya harga U dapat ditentukan dengan rumus :²⁸⁾

$$U = \frac{(U_{rg} + U_{cg}) \times U_{cs}}{U_{rg} + U_{cg} + U_{cs}} \quad \dots\dots\dots(4.17)$$

Dengan :

U_{rg} = Konduktansi panas konveksi gas asap antar pipa (Btu / ft² jam ° F)

U_{cg} = Konduktansi panas konveksi gas asap (Btu / ft² jam ° F)

U_{cs} = Konduktansi panas konveksi uap (Btu / ft² jam ° F)

Mencari U_{rg} :²⁹⁾

$$U_{rg} = U_r \times K \quad \dots\dots\dots(4.18)$$

Dimana temperatur rata-rata logaritmik, $\Delta T_m = 200,518^{\circ}\text{F}$ dan besarnya temperatur pipa *superheater* adalah :

$$T_{ps} = 300^{\circ}\text{C} + \Delta T$$

Dengan :

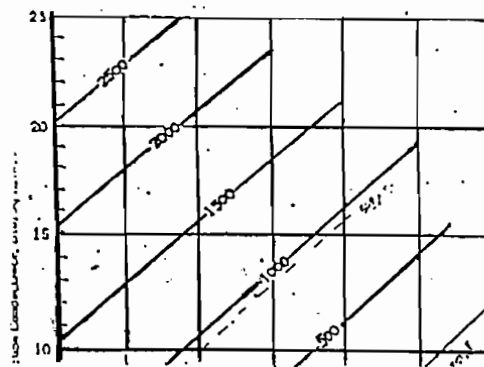
²⁸⁾ Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, Ed.38, 1952, hal 4-12

²⁹⁾ Ibid, hal 14-3

ΔT = Temperatur perkiraan antara pipa-pipa *superheater* dengan temperatur uap yang mengalir didalamnya yaitu antara 10 – 37,7° C, maka diambil 37,7° C.

Sehingga :

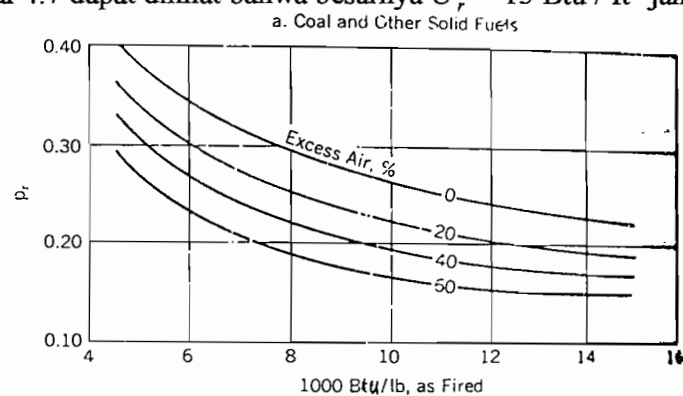
$$\begin{aligned} T_{ps} &= 300 + 37,7 \\ &= 337,7^{\circ} \text{C} \\ &= 639,86^{\circ} \text{F} \end{aligned}$$



Gambar 4.7. Harga pendekatan panas jenis rata-rata gas

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 14-3)

Dari gambar 4.7 dapat dilihat bahwa besarnya $U_r = 13 \text{ Btu} / \text{ft}^2 \text{ jam}^{\circ} \text{F}$.



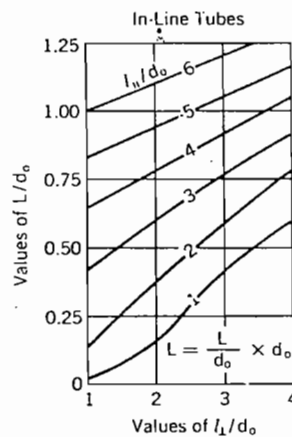
Gambar 4.8. Tekanan Parsial

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 14-4)

Kemudian pada gambar 4.8 untuk pembakaran bahan bakar batubara dengan HHV = 11709,095 Btu / lb dengan udara berlebih 40 %, maka didapat harga $P_r = 0,25$.

$$L \Rightarrow \frac{l_1}{d_o} = \frac{SS}{OD} = \frac{12 \text{ cm}}{6,0325 \text{ cm}} = 1,99$$

$$\Rightarrow \frac{l_1}{d_o} = \frac{SS}{OD} = \frac{12 \text{ cm}}{6,0325 \text{ cm}} = 1,99$$



Gambar 4.9. Panjang radiasi rata-rata

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, 1952, hal 14-5)

Dari kedua nilai tersebut, maka dari gambar 4.9 diperoleh $l / d_o = 0,375$, sehingga :

$$L = 2,375 \times 0,375$$

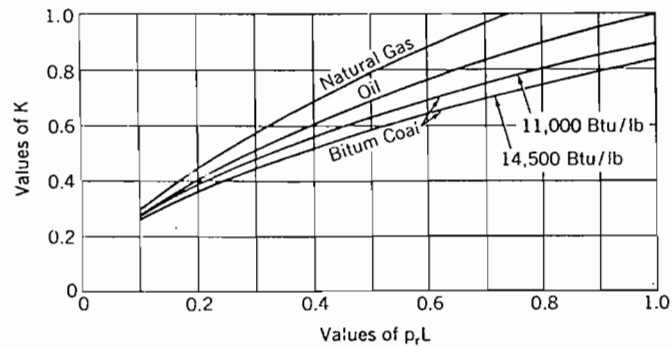
$$= 0,89 \text{ inchi}$$

$$= 2,26 \text{ cm}$$

Dan :

$$P_r \times L = 0,25 \times 0,89$$

$$= 0,2225 \text{ inchi}$$



Gambar 4.10. Pengaruh bahan bakar dan panjang radiasi pada konduktansi panas radiasi

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, 1952, hal 14-5)

Dengan demikian dari gambar 4.10 dapat dilihat $K = 0,4$ dan dengan persamaan 4.18, maka :

$$U_{rg} = 13 \times 0,4$$

$$= 5,2 \text{ Btu} / \text{ft}^2 \text{ jam}^\circ \text{F}$$

Kemudian untuk mencari U_{cg} , digunakan rumus :³⁰⁾

$$U_{cg} = U_{cc} \times F_{pp} \times F_a \times F_d \quad \dots\dots\dots(4.19)$$

Dengan :

U_{cc} = konduktansi panas konveksi dasar

Besarnya U_{cc} ditentukan berdasarkan *mass velocity of gas* dan diameter luar pipa *superheater* :

- *Mass velocity of gas*, W_{vg} .³¹⁾

³⁰⁾ Ibid, hal 14-6

³¹⁾ Ibid, hal 14-7

$$W_{vg} = \frac{W_g}{A_g} \quad \dots\dots\dots(4.20)$$

Dimana :

W_g = Massa gas asap hasil tiap jam

$$= 88820,569 \text{ lb / jam}$$

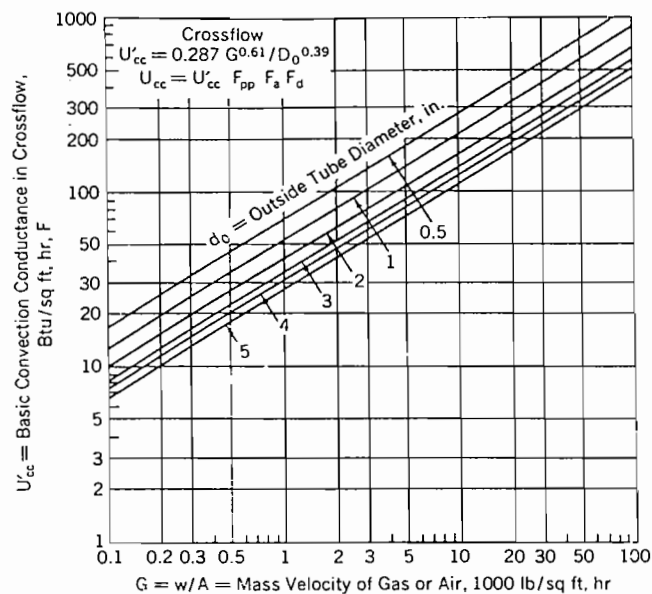
A_g = Luas penampang aliran gas asap

$$= 6,71 \text{ ft}^2$$

$$W_{vg} = \frac{88820,569}{6,71}$$

$$= 13237,045 \text{ lb / ft}^2 \text{ jam}$$

- Diameter luar pipa *superheater* (OD) = 2 inchi



Gambar 4.11. Konduktansi panas konveksi dasar aliran silang

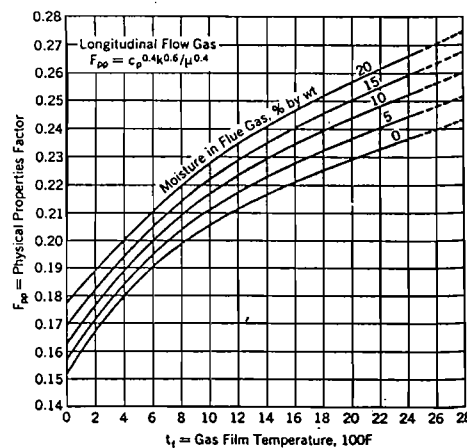
(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, 1952, hal 4 – 10)

Sehingga dengan demikian dari gambar 4.11 dapat dilihat :

$$U_{cc} = 190 \text{ Btu} / \text{ft}^2 \text{ jam } ^\circ \text{F}$$

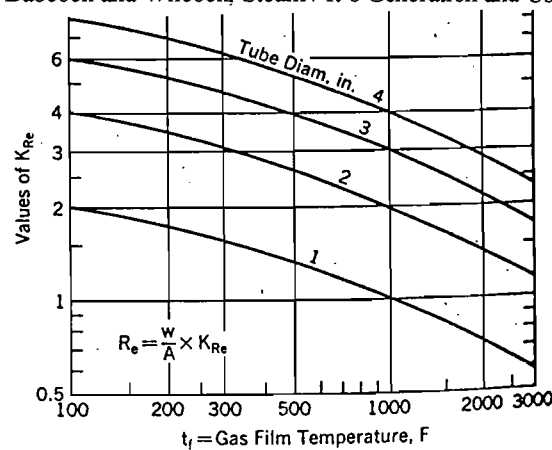
Faktor fisik untuk temperatur gas film, $T_{fr} = 570,1298^\circ \text{F}$ dan dengan 4,35 %

H_2O di dalam gas asap, dengan gambar 4.12 dapat diketahui besarnya $F_{pp} = 0,2$.



Gambar 4.12. Pengaruh film temperatur pada faktor sifat fisik untuk gas asap pada aliran silang.

(Sumber : Babcock and Wilcock, Steam / It's Generation and Use, hal 4 – 10)



Gambar 4.13. Reynold Number.

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 14 – 6)

Pada gambar 4.13, untuk $T_{fr} = 570,1298^{\circ}\text{F}$ dan diameter pipa 2 inchi, diperoleh harga $K_{re} = 2,3$, sehingga *Reynold Number* dapat dihitung dengan rumus :³²⁾

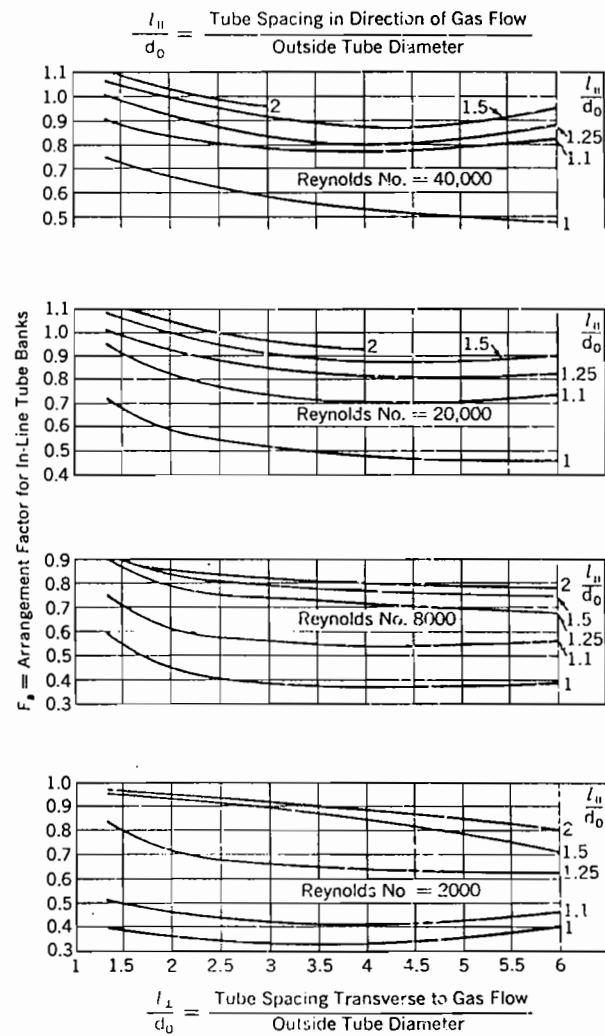
$$\begin{aligned} R_e &= K_{re} \times W_{vg} && \dots\dots\dots(4.21) \\ &= 2,3 \times 13237,045 \\ &= 30445,204 \end{aligned}$$

Untuk harga $BS / OD = 2,15$, maka pada gambar 4.14 diperoleh $F_a = 0,75$, kemudian dengan melihat gambar 4.15 untuk deret pipa ke belakang sebanyak 9 pipa maka dapat dilihat besarnya $F_d = 0,95$.

Jadi dengan memasukkan harga-harga di atas ke dalam persamaan 4.19 :

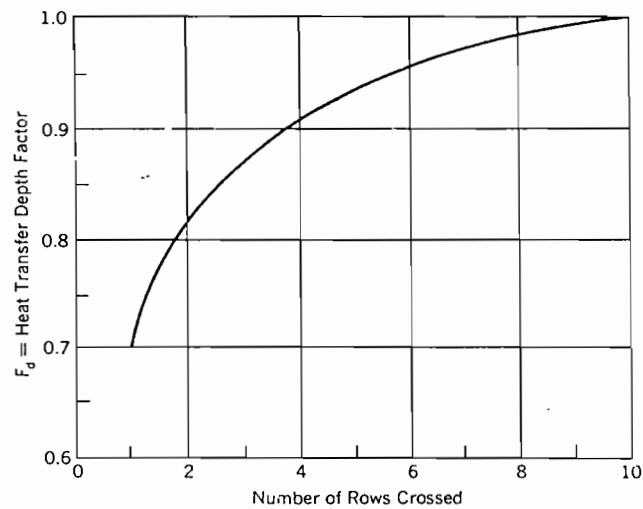
$$\begin{aligned} U_{cg} &= 190 \times 0,2 \times 0,75 \times 0,95 \\ &= 27,075 \text{ Btu / ft}^2 \text{ jam}^{\circ}\text{F} \end{aligned}$$

³²⁾ Ibid, hal 14 - 8



Gambar 4.14. Faktor susunan pipa.

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 4 – 11)



Gambar 4.15. Faktor perpindahan panas untuk jumlah deret pipa aliran menyilang.

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 4 – 11)

Menentukan U_{cs} dipakai rumus :³³⁾

$$U_{cs} = U_{cl} \times F_{pp} \times F_t \times (ID / OD) \quad \dots\dots\dots(4.22)$$

Dengan :

U_{cl} = Konduktansi panas konveksi utama yang ditentukan oleh *mass velocity of steam*.

Dimana telah diketahui bahwa :

W_u = Jumlah uap yang mengalir dalam pipa *superheater* tiap jam

$$= 55125 \text{ lb / jam}$$

A_s = Luas total diameter dalam pipa *superheater*

$$= 1,88 \text{ ft}^2$$

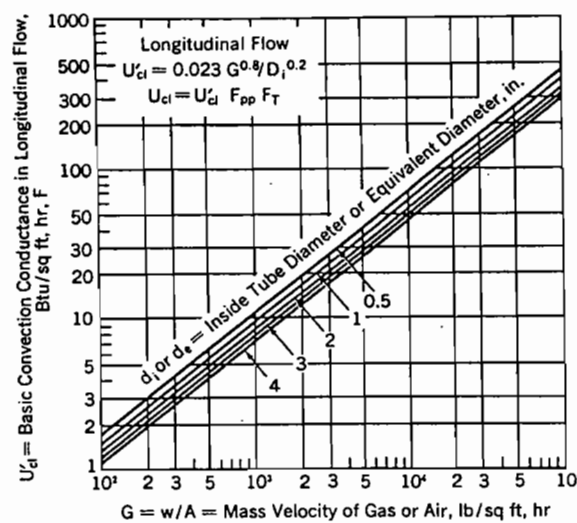
³³⁾ Ibid, hal 14-7

Sehingga dengan demikian nilai *Mass Velocity*, W_{vu} :

$$\begin{aligned} W_{vu} &= \frac{W_u}{A_s} \\ &= \frac{55125}{1,88} \\ &= 29321,81 \text{ lb / ft}^2 \text{ jam} \end{aligned}$$

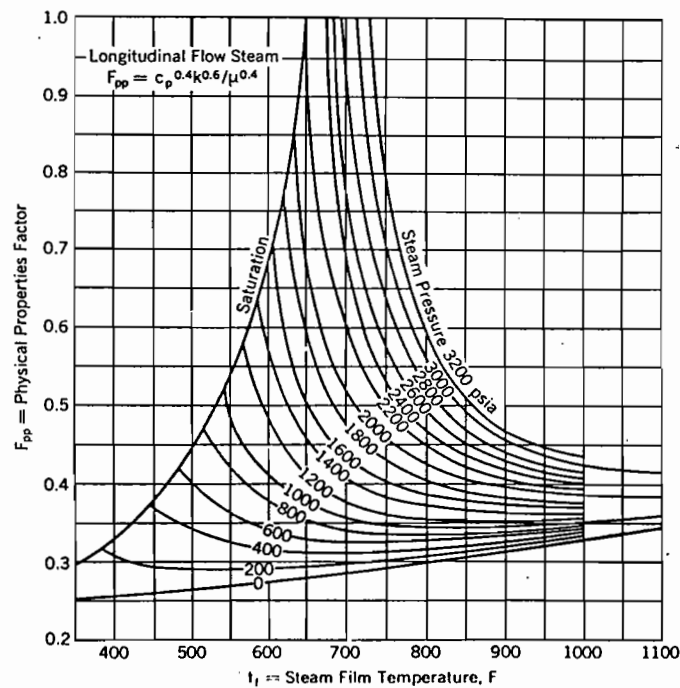
Dengan $W_{ug} = 29321,81 \text{ lb / ft}^2 \text{ jam}$ dan diameter pipa = 2 inchi, maka pada gambar 4.16 dapat dilihat bahwa :

$$U_{cl} = 150 \text{ Btu / ft}^2 \text{ jam } ^\circ \text{F}$$



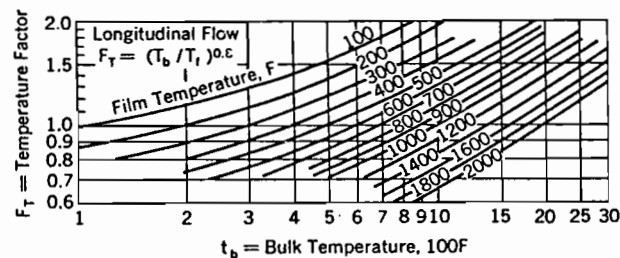
Gambar 4.16. Konduktansi panas konveksi dasar pada aliran memanjang.

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 4 – 8)



Gambar 4.17. Pengaruh film temperatur dan tekanan pada faktor-faktor fisik uap pada aliran memanjang.

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 14 – 9)



Gambar 4.18. Faktor temperatur karena perubahan mass velocity.

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 14 – 8)

Untuk temperatur film uap besarnya sama dengan temperatur uap rata-rata,

$T_{fu} = T_{ur} = 485,87^\circ \text{F}$ dan dengan tekanan kerja generator uap, $P = 246,59 \text{ Psia}$,

maka dari gambar 4.17 dapat dilihat besarnya $F_{pp} = 0,33$.

Dari gambar 4.18, dengan $T_{fr} = 570,1298^{\circ}\text{F}$ dan $T_{ur} = 485,87^{\circ}\text{F}$ diperoleh besarnya $F_r = 0,95$

Kemudian dengan memasukkan harga-harga di atas ke persamaan 4.22, maka :

$$\begin{aligned} U_{cs} &= 150 \times 0,95 \times 0,33 \times (2,067 / 2,375) \\ &= 47,025 \text{ Btu} / \text{ft}^2 \text{ jam}^{\circ}\text{F} \end{aligned}$$

Sehingga dengan memasukkan harga-harga konduktansi di atas ke persamaan 4.17, maka :

$$\begin{aligned} U &= \frac{(5,2 + 27,075) \times 47,025}{5,2 + 27,075 + 47,025} \\ &= 19,139 \text{ Btu} / \text{ft}^2 \text{ jam}^{\circ}\text{F} \end{aligned}$$

Dengan diketahuinya harga konduktansi gabungan, maka besarnya perpindahan panas pada pipa-pipa api berdasarkan persamaan 4.14 adalah :

$$\begin{aligned} Q &= 19,139 \times 160,25 \times 200,518 \\ &= 615000 \text{ Btu} / \text{jam} \\ &= 648734,177 \text{ kJ} / \text{jam} \end{aligned}$$

Dari pembahasan di atas, maka besarnya ralat nilai perpindahan panas pada

$$\begin{aligned} \text{pipa-pipa } \textit{superheater} \text{ adalah sebesar } &= \frac{650000 - 615000}{650000} \times 100 \% \\ &= 4,38 \% \end{aligned}$$

Dengan demikian , karena besarnya ralat yang cukup kecil maka perencanaan pipa-pipa *superheater* sesuai dengan spesifikasi di atas memenuhi syarat untuk digunakan sesuai keperluan.



Sedangkan tebal minimum pipa yang diijinkan untuk baja karbon SA 210 C dengan $\tau_{ijin} = S = 12000$ Psia (table 11), dapat dihitung dengan persamaan :

$$\begin{aligned} t_m &= \frac{P \times d}{2 \times S} + C \\ &= \frac{246,59 \times 2,067}{2 \times 12000} + 0.065 \\ &= 0,021 + 0,065 \\ &= 0,086 \text{ inchi} \end{aligned}$$

Ternyata $t_m < t_{\text{yang direncanakan}}$, sehingga pipa yang direncanakan memenuhi syarat untuk digunakan dalam perancangan ini.

BAB V

PERHITUNGAN KEKUATAN

Dalam pengoperasiannya, generator uap harus dapat berjalan lancar dan baik dalam arti cukup aman, maka harus didukung oleh bagian-bagian dari generator uap yang kuat dan aman untuk dioperasikan. Oleh karena itu, untuk menjamin keamanan pada saat pengoperasiannya, sangatlah perlu diperhitungkan kekuatan dari bagian-bagian generator uap berdasarkan gaya dan tekanan yang diterima.

V. 1. Perhitungan Dinding Silinder Generator Uap

Pada perancangan generator uap lokomotif ini, silinder generator berfungsi untuk memisahkan antara uap dan air. Pada generator uap lokomotif ini, bahan yang dipakai direncanakan menggunakan bahan dari jenis baja karbon SA 515 70, dimana bahan ini mempunyai kekuatan tarik yang diijinkan sebesar 17500 psia pada temperatur 650°F (tabel 12). Bahan ini mengandung 0,3 % carbon (C), 0,3 % silicon (Si), serta kandungan mangan (Mn), fosfor (P), 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 generator uap, maka dapat digunakan rumus sebagai berikut :³⁴⁾

³⁴⁾ Ir. Syamsir A. Muin, Pesawat-pesawat Konversi Energi I, Rajawali, Jakarta, hal 334

$$D = S + (2 \times L_s) \quad \dots\dots\dots(5.1)$$

Dengan :

D = diameter silinder generator

L_s = panjang baut penahan (*stay*) = 0,25 m = 0,82 ft

S = Sisi kotak api = 1,5 m = 4,921 ft

Sehingga :

$$\begin{aligned} D &= 4,921 + (2 \times 0,82) \\ &= 6,561 \text{ ft} = 78,732 \text{ inchi} = 199,98 \text{ cm} \end{aligned}$$

Tebal minimum silinder generator pada pipa-pipa api dapat dihitung dengan menggunakan rumus :³⁵⁾

$$t_m = \frac{p \times r}{\sigma \times E - (1 - Y) p} \quad \dots\dots\dots(5.2)$$

dengan :

t_m = tebal minimum dinding generator (inchi)

p = tekanan kerja generator = 246,59 Psia

r = jari-jari silinder generator bagian dalam = 39,366 inchi

σ = tegangan yang diijinkan pada bahan = 17500 psia

E = efisiensi sambungan pada arah memanjang untuk pengerjaan konstruksi dengan sambungan las = 90 % = 0,9

Y = koefisien friksi temperatur karena suhu dalam silinder dibawah 1150 ° F = 0,7 (tabel 13)

³⁵⁾ Evert B. Wooddruff, Hebert B. Lammers, Steam – Plant Operation, New York, 1977, hal 70

C = nilai minimum yang diijinkan karena stabilitas dan pengerjaan untuk ukuran pipa lebih dari $1 \frac{1}{2}$ inchi (tabel 14)
 $= 0,065$

Sehingga :

$$t_m = \frac{246,59 \times 39,366}{(17500 \times 0,9) - ((1 - 0,7) \times 246,59)} + 0,065$$

$$= 0,684 \text{ inchi} = 1,74 \text{ cm}$$

Karena tebal tersebut adalah nilai minimal, maka untuk menjamin kekuatan dan keamanannya, tebal dinding silinder generator :

$$t_{sg} = t_m \times a_k$$

dengan :

t_{sg} = tebal dinding silinder generator

a_k = angka keamanan = 2 (rencana)

Sehingga :

$$t_{sg} = 0,684 \times 2$$

$$= 1,368 \text{ inchi} = 3,475 \text{ cm}$$

V. 2. Pemeriksaan Tebal Dinding Silinder Generator

Pada perancangan silinder generator pipa-pipa api ini, digunakan bahan baja SA 515 70. Tegangan tarik maksimal dari bahan ini yaitu sebesar 17500 psia (tabel 12). Maka ukuran untuk silinder api, yaitu sebagai berikut :

Diameter dalam silinder (ID) = 78,732 inchi

Diameter luar silinder (OD) = 78,732 + (1,368 x 2)

$$= 81,468 \text{ inchi}$$

Tebal dari silinder dapat diperiksa kembali dengan menggunakan rumus ³⁶⁾

$$t_m = \frac{p \times D}{2\sigma + 2Yp} \dots\dots\dots(5.3)$$

dengan :

t_m = tebal minimum dinding silinder generator pada pipa-pipa api (inchi)

p = tekanan kerja generator = 246,59 psia

D = diameter luar = 81,468 inchi

σ = kekuatan tarik maksimum bahan = 17500 psia

Y = koefisien faktor temperatur pada temperatur kurang dari 1150 ° F = 0,7

Sehingga :

$$\begin{aligned} t_m &= \frac{246,59 \times 81,468}{(2 \times 17500) + (2 \times 0,7 \times 246,59)} \\ &= 0,568 \text{ inchi} \end{aligned}$$

Jadi dari hasil pemeriksaan tebal silinder di atas, tebal silinder generator (t_{sg}) yaitu setebal 1,368 inchi sudah cukup aman sehingga perancangan ini dapat diteruskan.

V. 3. Perhitungan Kekuatan Pipa-Pipa Api

Untuk pipa-pipa api pada generator uap lokomotif ini, digunakan bahan baja karbon dengan tingkat spesifik SA 210 C, sedangkan ukuran pipa-pipa apinya adalah menggunakan pipa baja dengan ukuran 2 inchi yang memiliki ukuran standar sebagai berikut :

³⁶⁾ Ibid, hal 71

- Diameter luar (OD) = 2,375 inchi
- Diameter dalam (ID) = 2,067 inchi
- Tebal pipa (t_p) = 0,154 inchi
- Tegangan yang diijinkan (σ) = 17500 psi (tabel 11)

Maka dengan persamaan 5.3, didapat tebal minimum pipa-pipa api yaitu :

$$t_m = \frac{246,59 \times 2,375}{(2 \times 17500) + (2 \times 0,7 \times 246,59)} + 0,065$$

$$= 0,082 \text{ inchi}$$

Dengan demikian tebal ukuran pipa sebesar 0,154 inchi dapat digunakan karena cukup kuat.

V. 4. Perhitungan Jarak Antar Pipa-Pipa Api

Dalam perhitungan jarak antar pipa-pipa api harus disesuaikan dengan tekanan yang bekerja pada pipa-pipa api tersebut dengan diameter nominal dari pipa api tersebut. Berdasarkan tekanan kerja dari dalam pipa yaitu 246,59 psia, maka diambil bahan pipa SA 210 C, dengan :

- diameter dalam pipa = 2,067 inchi
- diameter silinder ketel = 78,732 inchi
- lebar dan tinggi ruang bakar = 1,5 m = 4,921 ft = 59,055 inchi

Jarak pipa minimum :

$$s_m = 0,5 \times d_o$$

$$= 0,5 \times 2,375$$

$$= 1,1875 \text{ inchi} = 3,016 \text{ cm}$$

Banyaknya pipa maksimum dalam 1 baris :

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{P - S_m}{S_m + d_o} \\
 &= \frac{59,055 - 1,1875}{1,1875 + 2,375} \\
 &= 16,24 = 16 \text{ buah pipa}
 \end{aligned}$$

Sehingga dapat dihitung jarak antar pipa :

$$\begin{aligned}
 s &= \frac{P - n \times d_o}{n + 1} \\
 &= \frac{59,055 - 16 \times 2,375}{16 + 1} \\
 &= 1,2385 \text{ inchi} \\
 &= 31,458 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Karena jarak pipa lebih besar dari jarak pipa minimum, maka perancangan jarak pipa ini sudah cukup baik.

V. 5. Perhitungan Rangka Pendukung (Penahan / Stay)

Pada perancangan generator uap ini, akan terjadi suatu gaya yang disebabkan karena pengoperasian pada generator uap. Sehingga untuk menahan gaya dorong dalam generator uap ini digunakan penahan atau rangka pendukung generator uap yang terbuat dari bahan baja tahan karat atau korosi dengan kemampuan menahan beban kurang lebih sebesar 40000 psi, dengan perincian sebagai berikut :

- Diameter batang penahan pipa (d) = 2 inchi
- Diameter silinder generator (D) = 78,732 inchi
- Tekanan kerja generator maximum (P) = 246,59 psia
- Jarak dari pipa api yang tertinggi (h) = 20 inchi = 508 mm (rencana)

- Tebal lebar tabung (T) = 11,22 lb / in

Jarak dari dinding silinder generator dengan bagian lebar tabung yang diperhitungkan untuk ditahan dengan batang penahan dapat dihitung dengan menggunakan rumus :³⁷⁾

$$\begin{aligned} d &= \frac{5T}{\sqrt{P}} \dots\dots\dots(5.4) \\ &= \frac{5 \times 11,22}{\sqrt{246,59}} \\ &= 3,573 \text{ inchi} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} A &= (D-2d)^2 \times \pi/8 - (D/2 - h + 2) (D + 2d) \\ &= (78,732 - 2 \times 3,573)^2 \times \pi/8 - (78,732/2 - 20 + 2) (78,732 + 2 \times 3,573) \\ &= 521,051 \text{ in}^2 \end{aligned}$$

Sehingga jumlah beban secara keseluruhan yang diterima oleh batang penahan, yaitu sebesar :³⁸⁾

$$\begin{aligned} F &= P \times A \dots\dots\dots(5.5) \\ &= 246,59 \times 521,051 \\ &= 128485,9661 \text{ lb} \end{aligned}$$

³⁷⁾ Ibid, hal 615

³⁸⁾ Nieman. G, Elemen Mesin Design and Kalkulasi, Alih Bahasa Anton Budiman dan Bambang Priambodo, Jilid II, Edisi Kedua, hal 250

Untuk setiap penampang batang mampu menahan beban sebesar :³⁹⁾

$$\begin{aligned}
 f &= \sigma \times \frac{\pi}{4} \times d^2 && \dots\dots\dots(5.6) \\
 &= 40000 \times \frac{\pi}{4} \times 2^2 \\
 &= 125663,71 \text{ lb}
 \end{aligned}$$

Sehingga jumlah penahan yang diperlukan untuk menahan generator uap, yaitu :

$$\begin{aligned}
 N &= F / f \\
 &= 128485,9661 / 125663,71 \\
 &= 1,02 = 2 \text{ buah}
 \end{aligned}$$

V. 6. Perhitungan Sambungan Las

Dalam pembuatan silinder generator uap pada perancangan kali ini, seluruh pengerjaan pembuatan sambungan dilakukan dengan jalan pengelasan. Dan untuk mendapat silinder generator dengan arah memanjang dapat dibuat dengan cara melekkukan plat baja dengan menggunakan mesin pelengkung atau dengan mesin pengerol plat.

Sedangkan untuk memperoleh sambungan silinder generator dengan arah melintang dimana dilakukan sambungan bahan dasar plat baja yaitu plat yang akan ditembus oleh pipa-pipa dan lorong api pada dinding generator. Hal ini dilakukan setelah pembuatan penyambungan dengan arah memanjang selesai dilakukan, dengan tujuan untuk mempercepat dan mempermudah pengerjaan silinder generator.

³⁹⁾ Ir. Sularso, Mekanika Kekuatan Material, hal 30

Karena adanya tekanan dalam generator, menyebabkan terjadinya gaya-gaya yang akan diterima oleh silinder sebesar :⁴⁰⁾

$$F_t = D \times L \times P \quad \dots\dots\dots(5.7)$$

Dengan : F_t = gaya pada dinding silinder generator

D = diameter dalam silinder generator = 78,732 in

L = panjang silinder generator = 6,25 m = 246,063 in = 20,505 ft

P = Tekanan kerja generator = 246,59 psia

Maka :

$$\begin{aligned} F_t &= 78,732 \times 246,063 \times 246,59 \\ &= 4777195,989 \text{ lb} \end{aligned}$$

Sedangkan tegangan yang diijinkan pada arah sambungan las memanjang dapat dihitung :⁴¹⁾

$$\sigma = \frac{F_t}{a \times b} \quad \dots\dots\dots(5.8)$$

dengan : F_t = gaya pada dinding silinder generator (lb) = 4777195,989 lb

a = tebal kampuh = $\frac{1}{2} (\sqrt{2} \times S)$, dengan S = tebal plat = 1,368 in

$$= \frac{1}{2} (\sqrt{2} \times 1,368) = 0,967 \text{ in}$$

b = panjang kampuh = $L - 3a = 246,063 - 3 \times 0,967 = 243,162 \text{ in}$

sehingga :

⁴⁰⁾ Ibid, hal 70

⁴¹⁾ Nieman G. Elemen Mesin Design dan Kalkulasi, Alih Bahasa Anton Budiman dan Bambang Priambodo, Jilid I, Edisi Kedua, hal 150

$$\sigma = \frac{4777195,989}{0,967 \times 243,162} = 19646,145 \text{ psi}$$

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

Untuk menghitung gaya yang diterima dinding generator untuk sambungan las pada arah melintang, digunakan rumus :⁴²⁾

$$F_m = \frac{\pi \times D^2 \times P}{4} \dots\dots\dots(5.9)$$

$$= \frac{\pi \times (78,732)^2 \times 246,59}{4}$$

$$= 4802063,525 \text{ lb}$$

Sehingga tegangan yang diterima oleh sambungan las dengan arah melintang, yaitu :⁴³⁾

$$\sigma = \frac{F_m}{axl} \dots\dots\dots(5.10)$$

dengan : F_m = gaya pada arah melintang

$$= 4802063,525 \text{ lb}$$

$$a = \text{tebal kampuh} = 0,967 \text{ in}$$

$$L = \text{panjang kampuh} = \pi D - 3a$$

$$= (\pi \times 78,732) - (3 \times 0,967)$$

⁴²⁾ Ibid, hal 152

⁴³⁾ Ibid, hal 160

$$= 244,443 \text{ in}$$

sehingga :

$$\sigma = \frac{4802063,525}{0,967 \times 244,443} = 20315,33 \text{ psia}$$

Dari syarat tegangan yang diijinkan 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.

Karena diameter dan panjang silinder generator telah didapat, maka dapat dihitung kapasitas maksimal air isian ($V_{\max}$) :

$$\begin{aligned} V_{\max} &= [(V_{\text{drum ketel}} - V_{\text{pipa api}})] + [(V_{\text{kotak generator}} - V_{\text{ruang bakar}})] \\ &= \left\{ \left[\left(\frac{\pi}{4} D^2 L \right) - 140 \left(\frac{\pi}{4} d^2 L \right) \right] + [(P_k \times L_k \times T_k) - (P_{rb} \times L_{rb} \times T_{rb})] \right\} \\ &= \left\{ \left[\left(\frac{\pi}{4} 2^2 4,5 \right) - 140 \left(\frac{\pi}{4} 0,060325^2 4,5 \right) \right] + [(1,75 \times 2 \times 2,72687) - (1,5 \times 1,5 \times 2)] \right\} \\ &= 17,3743 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Kemudian dengan batas minimal ketinggian permukaan air isian 10 cm di atas dinding bagian atas kotak api, maka dapat dihitung volume maksimum air yang menguap (V_u) : $V_u = V_{us} + V_{uk}$

Dengan : V_{us} = Volume air isian yang menguap pada silinder generator

$$= 3,789 \text{ m}^3$$

V_{uk} = Volume air isian yang menguap pada kotak generator

$$= 2,194 \text{ m}^3$$

$$\text{Sehingga : } V_u = 3,789 + 2,194 = 5,983 \text{ m}^3$$

BAB VI

DINDING DAN ISOLASI GENERATOR

Untuk mengurangi kerugian panas sebagai akibat dari perbedaan temperatur nyala api dan gas asap hasil dari pembakaran bahan bakar yang digunakan sebagai pemanas di dalam generator uap dengan udara luar, maka dinding generator tersebut perlu diisolasi dengan baik.

Walaupun pembuatan isolasi pada dinding generator dibuat sedemikian rupa dan sebaik mungkin, namun pada intinya fungsinya hanya untuk dapat memperkecil kerugian panas saja karena belum dapat sepenuhnya untuk meniadakan kerugian panas yang terjadi akibat perbedaan temperatur tersebut, akan tetapi apabila ditinjau dari segi keamanan maka perencanaan dinding dan isolasi menjadi lebih baik.

Setelah dinding generator diisolasi maka temperatur dinding generator sebelah luar akan menjadi lebih kecil atau lebih rendah tetapi sedikit lebih tinggi diatas temperatur udara luar.

Dinding generator 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 generator harus dapat sekecil mungkin.
- e. Kebocoran pada dinding generator harus dapat dicegah.

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

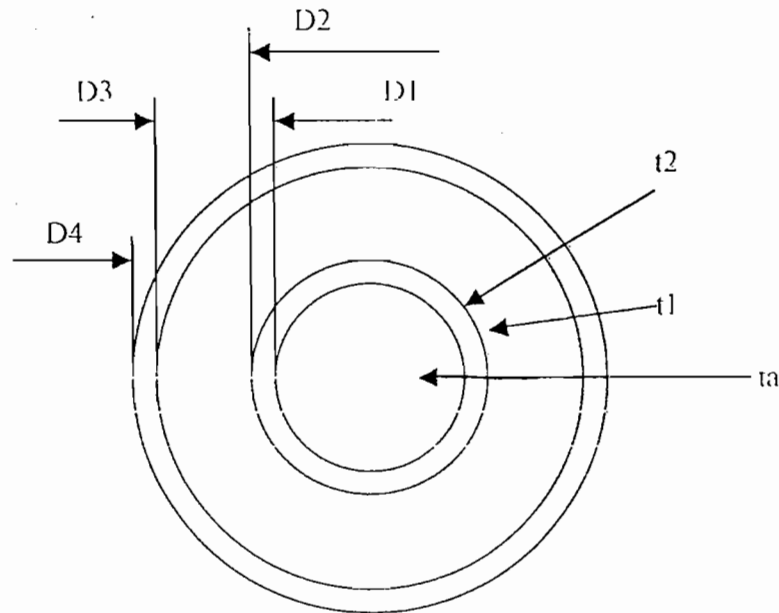
VI.1. Perancangan Dinding dan Isolasi Silinder Generator

Konstruksi dinding generator dirancang agar mempunyai konduktivitas rendah, sehingga kerugian panas yang terjadi kecil. Pada perencanaan isolasi dinding silinder generator ini akan terdapat jenis bahan dan ketebalan yang berbeda karena disesuaikan dengan kondisi dan fungsinya untuk memperkecil kerugian panas.

Data perencanaan :

- plat penutup isolasi digunakan dari aluminium dengan ketebalan = 0,10 inchi
- isolasi digunakan dari bahan *glasswool* dengan ketebalan = 3 inchi

Dinding dan isolasi generator yang direncanakan dapat ditentukan sebagai berikut :



Gambar 6.19. Gambar Penampang Dinding dan Isolasi Generator

Keterangan :

t_a = Temperatur titik didih air dalam generator = $399,74^{\circ}\text{F}$

t_u = Temperatur udara luar = 80°F

d_1 = Diameter dalam silinder generator = 78,732 inchi = 6,561 ft

d_2 = Diameter luar silinder generator = 81,468 inchi = 6,789 ft

d_3 = Diameter generator setelah diisolasi = 87,468 inchi = 7,289 ft

d_4 = Diameter generator setelah diisolasi dan dilapisi dengan plat aluminium = 87,668 in = 7,306 ft

U_a = Konduktifitas panas film air (Btu / $\text{ft}^2\text{jam }^{\circ}\text{F}$)

U_u = Konduktifitas panas film udara, dalam perancangan ini direncanakan sebesar = 5

$$\text{Btu} / \text{ft}^2 \text{ jam } ^\circ \text{F}$$

K_1 = Konduktifitas panas baja (tabel 15)

$$= 26 \text{ Btu} / \text{ft}^2 \text{ jam } ^\circ \text{F} / \text{ft}$$

$$= 312 \text{ Btu} / \text{ft}^2 \text{ jam } ^\circ \text{F} / \text{in}$$

K_2 = Konduktifitas panas bahan isolasi generator (tabel 16)

$$= 0,22 \text{ Btu} / \text{ft}^2 \text{ jam } ^\circ \text{F} / \text{ft}$$

$$= 0,264 \text{ Btu} / \text{ft}^2 \text{ jam } ^\circ \text{F} / \text{in}$$

K_3 = Konduktifitas bahan plat aluminium (tabel 15)

$$= 117 \text{ Btu} / \text{ft}^2 \text{ jam } ^\circ \text{F} / \text{ft}$$

$$= 1404 \text{ Btu} / \text{ft}^2 \text{ jam } ^\circ \text{F} / \text{in}$$

VI. 1.1. Perhitungan Kerugian Panas Melalui Dinding Silinder

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

$$\begin{aligned} A &= \pi d L + \frac{\pi}{4} d^2 \\ &= \pi \times \left(\frac{87,468}{12} \right) \times 19,686 + \pi \times \frac{1}{4} \times \left(\frac{87,468}{12} \right)^2 \\ &= 492,269 \text{ ft}^2 \end{aligned}$$

Sedangkan untuk menghitung konduktansi panas film air adalah dengan rumus :

$$U_a = h_a \times \left(\frac{P}{P_a} \right)^{0.4}$$

Dengan : h_a = Konduktansi panas film air pada tekanan atmosfer

$$P = \text{Tekanan uap} = 246,59 \text{ psi}$$

$$P_a = \text{Tekanan atmosfer} = 14,7 \text{ psi}$$

Sedangkan untuk menghitung konduktansi panas film air, dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$h_a = 0,168 (\Delta T)^3$$

Pada perencanaan ini direncanakan temperatur permukaan dalam dinding silinder generator sebesar $381,74^\circ \text{F}$, dimana temperatur tersebut ditentukan lebih kecil atau lebih rendah dibandingkan temperatur titik didih air yaitu sebesar $399,74^\circ \text{F}$, hal ini disebabkan karena adanya film air sehingga terdapat selisih sebesar 18°F , sehingga :

$$h_a = 0,168 (18)^3 = 979,776 \text{ Btu / ft}^2 \text{ jam}^\circ \text{F}$$

Setelah diketahui nilai konduktansi panas film air sebesar $979,776 \text{ Btu / ft}^2 \text{ jam}^\circ \text{F}$, maka jumlah konduktansi panas konveksi film air sebesar :

$$\begin{aligned} U_a &= 979,776 \times \left(\frac{246,59}{14,7} \right)^{0,4} \\ &= 3026,844 \text{ Btu / ft}^2 \text{ jam}^\circ \text{F} \end{aligned}$$

Dari perkiraan temperatur permukaan dalam dinding silinder generator, dapat dicek dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

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

$$43375310,16 = 3026,844 \times 492,269 \times (T_a - T_s)$$

$$43375310,16 = 3026,844 \times 492,269 \times (399,74 - T_s)$$

$$T_s = 370,629^\circ \text{F}$$

Perbedaan temperatur permukaan dalam dinding silinder dari hasil perkiraan dengan pengecekan sebesar :

$$\frac{381,74 - 370,629}{381,74} \times 100\% = 2,91\%$$

Karena perbedaan cukup kecil, maka temperatur permukaan dalam dinding silinder dapat diterima.

Perhitungan kerugian panas melalui dinding generator yaitu dengan rumus :⁴⁴⁾

$$Q_s = \frac{Ax(T_a - T_u)}{\left(\frac{d_4}{dl} \times \frac{1}{U_a}\right) + \left(\frac{d_4}{2K_1} \times \ln \frac{d_2}{d_1}\right) + \left(\frac{d_4}{2K_2} \times \ln \frac{d_3}{d_2}\right) + \left(\frac{d_4}{2K_3} \times \ln \frac{d_4}{d_3}\right) \times \left[\frac{1}{4}\right]} \dots\dots\dots(6.1)$$

=

$$\frac{492,269 \times (399,74 - 80)}{\left(\frac{7,306}{6,561} \times \frac{1}{3299,099}\right) + \left(\frac{7,306}{2 \times 26} \times \ln \frac{6,789}{6,561}\right) + \left(\frac{7,306}{2 \times 0,22} \times \ln \frac{7,289}{6,789}\right) + \left(\frac{7,306}{2 \times 117} \times \ln \frac{7,306}{7,289}\right) \times \left[\frac{1}{4}\right]}$$

$$= \frac{157398,0901}{0,00034 + 0,00479 + 1,17996 + 0,00002}$$

$$= 132813,064 \text{ Btu / jam}$$

VI.1.2. Perhitungan Temperatur Bagian Luar Plat Penutup Isolasi Silinder Generator

Untuk menghitung temperatur bagian luar plat penutup isolasi silinder generator digunakan rumus sebagai berikut :⁴⁵⁾

$$Q_s = \frac{Ax(T_a - T_u)}{\left(\frac{d_4}{dl} \times \frac{1}{U_a}\right) + \left(\frac{d_4}{2K_1} \times \ln \frac{d_2}{d_1}\right) + \left(\frac{d_4}{2K_2} \times \ln \frac{d_3}{d_2}\right) + \left(\frac{d_4}{2K_3} \times \ln \frac{d_4}{d_3}\right) \times \left[\frac{1}{4}\right]} \dots\dots\dots(6.2)$$

⁴⁴⁾ Babcock and Wilcox, Steam ? It's Generation and Use, 1952, hal 14-4

⁴⁵⁾ Ibid, hal 14-5

$$132813,064 = \frac{492,269 \times (399,74 - T_i)}{1,18511}$$

Maka :

$$\begin{aligned} T_i &= 79,99^\circ \text{ F} \\ &= 26,66^\circ \text{ C} \end{aligned}$$

VI. 2. Perancangan Isolasi Tutup Belakang Kotak Generator

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 generator uap lokomotif ini akan semakin aman pada saat pengoperasiannya.

Maka akan direncanakan tebal dari batu tahan api tersebut sebesar 3 inchi dari tebal isolasinya sehingga dalam perhitungannya digunakan rumus sebagai berikut :⁴⁶⁾

$$Q_{ib} = \frac{A_{ib} \times (T_g - T_u)}{\frac{1}{U_a} + \frac{t_1}{K_1} + \frac{t_2}{K_2} + \frac{t_3}{K_3} + \frac{t_4}{K_4} + \frac{1}{U_u}} \quad \dots\dots\dots(6.3)$$

Dengan :

$$\begin{aligned} A_{ib} &= \text{luas penampang tutup belakang (lebar, } L = 7,306 \text{ ft ; panjang } = L + 0,5 \text{ m)} \\ &= 7,306 \times (7,306 + 1,640) \\ &= (7,306 \times 8,946) \\ &= 65,359 \text{ ft}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_g &= \text{temperatur penampang gas asap dalam lemari api} \\ &= 2340,33^\circ \text{ F} \end{aligned}$$

$$U_a = \text{konduktansi panas film gas}$$

⁴⁶⁾ Ibid, hal 14-5

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

t_1 = tebal batu tahan api

$$= 3 \text{ inchi} = 0,414 \text{ ft}$$

K_1 = konduktansi panas batu tahan api (tabel 16)

$$= 0,27 \text{ Btu} / \text{ft}^2 \text{ jam}^\circ \text{F} / \text{ft} = 3,272 \text{ Btu} / \text{ft}^2 \text{ jam}^\circ \text{F} / \text{in}$$

t_2 = tebal silinder generator

$$= 1,678 \text{ inchi} = 0,140 \text{ ft}$$

K_2 = konduktansi panas bahan silinder (tabel 15)

$$= 26 \text{ Btu} / \text{ft}^2 \text{ jam}^\circ \text{F} / \text{ft} = 312 \text{ Btu} / \text{ft}^2 \text{ jam}^\circ \text{F} / \text{in}$$

t_3 = tebal isolasi

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

K_3 = konduktansi panas bahan isolasi (tabel 16)

$$= 0,022 \text{ Btu} / \text{ft}^2 \text{ jam}^\circ \text{F} / \text{ft} = 0,264 \text{ Btu} / \text{ft}^2 \text{ jam}^\circ \text{F} / \text{in}$$

t_4 = tebal plat aluminium

$$= 0,15 \text{ in} = 0,0125 \text{ ft}$$

K_4 = konduktansi panas aluminium (tabel 15)

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

U_u = konduktansi panas film udara = 3 Btu / ft² jam^o F (tabel 16)

Sehingga dari data-data di atas, dapat ditentukan temperatur bagian luar plat penutup belakang generator adalah sebagai berikut :⁴⁷⁾

⁴⁷⁾ Ibid, hal 14-6

$$Q_{tb} = \frac{A_{tb} \times (T_g - T_u)}{\frac{1}{U_a} + \frac{t_1}{K_1} + \frac{t_2}{K_2} + \frac{t_3}{K_3} + \frac{t_4}{K_4} + \frac{1}{U_u}} \quad \dots\dots\dots(6.4)$$

$$= \frac{65,359 \times (2340,33 - 80)}{\frac{1}{10,052} + \frac{0,414}{0,27} + \frac{0,14}{26} + \frac{0,333}{0,022} + \frac{0,0125}{117} + \frac{1}{3}}$$

$$= \frac{147732,9085}{17,108}$$

$$= 8635,311 \text{ Btu / jam}$$

Dan temperatur pada permukaan luar plat penutup isolasi adalah sebagai berikut :

$$Q_{tb} = \frac{A_{tb} \times (T_g - T_{is})}{\frac{1}{U_a} + \frac{t_1}{K_1} + \frac{t_2}{K_2} + \frac{t_3}{K_3} + \frac{t_4}{K_4} + \frac{1}{U_u}}$$

$$8635,311 = \frac{65,359 \times (2340,33 - T_{is})}{17,108}$$

$$T_{is} = 80^\circ \text{F}$$

$$= 26,67^\circ \text{C}$$

VI. 3. Perancangan Isolasi Dinding Kotak Api Generator

Luas dinding kotak api :

$$A_{dka} = (5,741 \times 8,946 \times 2) + (5,741 \times 7,306) + (65,359 - 41,707)$$

$$= 168,314 \text{ ft}^2$$

Sehingga besarnya kerugian panas yang terjadi pada dinding kotak api :⁴⁸⁾

$$\begin{aligned}
 Q_{dka} &= \frac{A_{tb} \times (T_g - T_s)}{\frac{1}{U_a} + \frac{t_1}{K_1} + \frac{t_2}{K_2} + \frac{t_3}{K_3} + \frac{t_4}{K_4} + \frac{1}{U_u}} \dots\dots\dots(6.5) \\
 &= \frac{168,314 \times (2340,33 - 80)}{17,108} \\
 &= 22237,853 \text{ Btu / jam}
 \end{aligned}$$

Maka temperatur permukaan luar isolasi dinding kotak api generator :

$$\begin{aligned}
 T_{dka} &= \frac{(168,314 \times 2340,33) - (Q_{dka} \times 17,108)}{168,314} \\
 &= 79,99^\circ \text{ F} \\
 &= 26,66^\circ \text{ C}
 \end{aligned}$$

VL.1.4. Pemeriksaan Kerugian Panas Melalui Dinding dan Isolasi Generator

Kerugian panas yang terjadi pada generator ditimbulkan karena hilangnya panas melalui dinding generator dan isolasi generator yaitu dari kerugian panas pada silinder generator dijumlah dengan kerugian panas pada tutup belakang kotak api dan kerugian panas pada dinding kotak api generator.

Sehingga jumlah kerugian panas yang terjadi pada generator uap lokomotif ini, yaitu :⁴⁹⁾

$$\begin{aligned}
 Q_{ds} &= Q_s + Q_{tb} + Q_{dka} \dots\dots\dots(6.6) \\
 &= 132813,064 + 8635,311 + 22237,853 \\
 &= 163686,228 \text{ Btu / jam}
 \end{aligned}$$

⁴⁸⁾ Ibid, hal 14-6

⁴⁹⁾ Ibid, hal 14-7

Sehingga persentase panas yang dihasilkan oleh pembatasan bahan bakar yaitu sebagai berikut :⁵⁰⁾

$$\begin{aligned}
 Q_{pbb} &= \frac{Q_{ds}}{LHV \times M_b} \times 100\% \\
 &= \frac{163686,228}{11414,4753 \times 6356,449} \times 100\% \\
 &= 0,227 \%
 \end{aligned}$$

⁵⁰⁾ Ibid, hal 14-8

BAB VII

EFISIENSI GENERATOR

VII. 1. Pengertian Efisiensi Generator

Yang dimaksud dengan efisiensi generator adalah perbandingan konsumsi panas yang digunakan dengan persediaan panas yang ada, maka efisiensi pada generator uap dapat dihitung dengan menggunakan dua cara, yaitu :

VII. 1. 1. Efisiensi Dengan Cara Langsung

Pada perhitungan efisiensi dengan cara langsung ini akan dapat kita hitung berdasarkan pada jumlah panas yang tersedia. Dalam hal ini perhitungan efisiensi merupakan hasil perhitungan dari energi uap yang dihasilkan dibagi dengan nilai pembakaran bahan bakar, sehingga dapat digunakan rumus :⁵¹⁾

$$\eta_k = \frac{M_a \times (h_u - h_a)}{M_b \times LHV} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(7. 1)$$

dengan :

$$\eta_k = \text{Efisiensi ketel (\%)}$$

$$M_a = \text{jumlah uap yang dihasilkan tiap jam} = 55125 \text{ lb / jam}$$

$$h_u = \text{Entalpi uap hasil} = 1200,96 \text{ Btu / lb}$$

$$h_a = \text{Entalpi air isian masuk ketel} = 148,00 \text{ Btu / lb}$$

$$M_b = \text{Kebutuhan bahan bakar per jam} = 6356,449 \text{ lb / jam}$$

$$LHV = 11414,4753 \text{ Btu / lb}$$

⁵¹⁾ Ir. Syamsir A. Muin, Pesawat-pesawat Konversi Energi, 1988, hal 223

Maka :

$$\eta_k = \frac{55125 \times (1200,96 - 148)}{6356,449 \times 11414,4753} \times 100\%$$

$$= 79,99 \%$$

VII.1.2. Efisiensi Secara Tidak Langsung

Perhitungan secara tidak langsung adalah perhitungan efisiensi yang juga merupakan pemeriksaan atau perhitungan terhadap efisiensi yang sudah didapat dari hasil perhitungan efisiensi secara langsung.

Sehingga untuk menghitung efisiensi ketel secara tidak langsung digunakan rumus :⁵²⁾

$$\eta_k = \frac{LHV - Q_{losses}}{LHV} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(7.2)$$

Dimana Q_{losses} adalah kerugian-kerugian yang terjadi atau jumlah panas yang telah ditimbulkan yaitu kerugian panas yang terbawa oleh gas asap yang keluar melalui cerobong. Dimana gas asap yang terbuang keluar melalui cerobong tersebut masih mempunyai temperatur yang cukup tinggi dan masih tersimpan panas didalamnya.

Untuk menghitung panas yang terbawa oleh gas asap tersebut dapat kita hitung dengan menggunakan rumus :⁵³⁾

$$Q_g = 0,2736 \times M_g \times (T_{gc} - T_{um}) \quad \dots\dots\dots(7.3)$$

Dengan : M_g = Gas asap yang dihasilkan per lb bahan bakar

$$= 13,9733 \text{ lb / lb bahan bakar}$$

T_{gc} = Temperatur gas asap meninggalkan pipa superheater

$$= 522,257 \text{ } ^\circ\text{F}$$



⁵²⁾ Ibid, hal 224

⁵³⁾ Ibid, hal 225

$$T_{um} = \text{Temperatur udara masuk ruang bakar}$$

$$= 80^{\circ} \text{ F}$$

sehingga :

$$Q_g = 0,2736 \times 13,9733 \times (522,257 - 80)$$

$$= 1690,79 \text{ Btu / lb}$$

Kemudian dalam generator lokomotif ini juga terjadi kerugian panas melalui dinding isolasi generator, dan untuk menghitungnya digunakan rumus :⁵⁴⁾

$$Q_{dg} = \frac{Q_{ds}}{M_b} \quad \dots\dots\dots(7.4)$$

Dengan : Q_{dg} = Kerugian panas melalui dinding isolasi generator

$$Q_{ds} = \text{Kerugian panas dinding silinder generator}$$

$$= 163686,228 \text{ Btu / jam}$$

$$M_b = \text{Kebutuhan bahan bakar per jam}$$

$$= 6356,449 \text{ lb / jam}$$

sehingga :

$$Q_{dg} = \frac{163686,228}{6356,449} = 25,751 \text{ Btu / lb}$$

Selain itu, dalam pengoperasian generator uap lokomotif ini juga terjadi kerugian panas pada terbentuknya abu, yang dapat dihitung sebagai berikut :⁵⁶⁾

$$Q_{ab} = \frac{W_{ab} \times C \times (t - t_u)}{LHV} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(7.6)$$

Dengan : W_{ab} = berat abu = 0,05 (asumsi)

⁵⁴⁾ Ibid, hal 225

⁵⁶⁾ Ibid, hal 227

$$C = \text{Panas jenis abu} = 0,108 \text{ Btu / lb } ^\circ\text{F}$$

$$\text{LHV} = 11414,4753 \text{ Btu / lb bahan bakar}$$

Maka :

$$Q_{ab} = \frac{0,05 \times 0,108 \times (2340,33 - 80)}{11414,4753} \times 100\%$$

$$= 0,1069 \% \times Q_{\text{kebutuhan}} = 0,1069 \times 63709065 = 6810499,049 \text{ Btu / jam}$$

Dan kerugian panas akibat abu dalam persentase terhadap bahan bakar :

$$Q_{kpa} = \frac{Q_{abu}}{M_b} = \frac{6810499,049}{6356,449}$$

$$= 1071,4314 \text{ Btu / lb}$$

Sehingga kerugian panas secara keseluruhan (Q_{losses}) adalah sebagai berikut :⁵⁵⁾

$$Q_{\text{losses}} = Q_g + Q_{dg} + Q_{pa} \quad \dots\dots\dots(7.5)$$

$$= 1690,79 + 25,751 + 1071,4314$$

$$= 2787,97 \text{ Btu / lb}$$

Sehingga perhitungan efisiensi generator secara tidak langsung adalah :

$$\eta_k = \frac{\text{LHV} - Q_{\text{losses}}}{\text{LHV}} \times 100 \%$$

$$= \frac{11414,4753 - 2787,97}{11414,4753} \times 100 \%$$

$$= 77 \%$$

⁵⁵⁾ Ibid, hal 226

BAB VIII

CEROBONG ASAP

VIII.1. Cerobong Asap

Dalam sebuah industri, suatu hal yang tidak boleh dilupakan adalah memperhatikan dampak dari gas atau zat yang dibuang atau dilepas ke lingkungan. Untuk itulah, maka dalam perancangan sebuah generator uap, seorang perancang harus memperhatikan perencanaan cerobong asap yang merupakan bagian terakhir dari generator uap yang akan melepas gas panas ke lingkungan.

Cerobong asap berfungsi untuk menghisap gas asap hasil reaksi pembakaran dari ruang bakar dan membuang gas asap tersebut ke lingkungan pada kecepatan dan ketinggian tertentu. Gas asap yang dibuang tersebut mengandung debu dan zat-zat sisa yang dapat meracuni lingkungan sehingga sangat berbahaya bagi kehidupan manusia dan makhluk hidup disekitarnya. Cerobong harus dirancang cukup tinggi agar gas asap tersebut tidak mengganggu lingkungan sekitarnya.

Cerobong asap dapat dibangun dari batubata, beton bertulang, ataupun plat baja. Konstruksi yang paling ringan adalah plat baja, tetapi memiliki kekurangan yang cukup merugikan yaitu dapat terjadi pengkaratan atau korosi. Sedangkan kelebihanya dibandingkan batubata yaitu mudah dan cepat dalam pembuatannya, lebih ringan untuk diameter dan tinggi yang sama, serta harga lebih murah dan tidak memakan banyak tempat. Adapun tinggi dan rendahnya cerobong asap dapat dipengaruhi oleh kondisi daerah setempat dan kondisi dari generator yang dirancang. Misalnya untuk daerah yang berpenduduk padat dan berangin lembut, maka harus dibangun lebih tinggi dengan

tujuan untuk mencegah agar gas asap yang berbahaya tidak terhisap oleh makhluk hidup disekitarnya.

Penghisapan dan penarikan gas asap hasil dari pembakaran masuk ke cerobong asap dan kemudian dibuang ke udara bebas dapat terjadi dengan dua sistem, yaitu :

1. Sistem tarikan alam (*Natural Draft*)

Dalam sistem ini, sirkulasi dari aliran udara masuk ruang bakar dan aliran gas asap dari ruang bakar melewati bagian-bagian dari generator hingga keluar melalui cerobong terjadi akibat dari adanya perbedaan berat jenis gas asap dengan udara luar karena adanya perbedaan temperatur yang cukup tinggi.

2. Sistem tarikan paksa (*Forced Draft*)

Sistem ini adalah sistem yang memakai bantuan dari alat tambahan berupa *fan* atau *blower*. Hal ini disebabkan karena tarikan yang ditimbulkan oleh cerobong tidak mampu menimbulkan aliran udara masuk ke ruang bakar dan aliran gas asap melewati bagian-bagian dalam generator untuk dibuang ke udara bebas sehingga membutuhkan adanya paksaan.

Sistem tarikan paksa dapat dirancang dengan 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 generator dan membuang keluar lewat cerobong. Pada dasarnya, sistem ini dapat berlangsung karena tungku atau ruang bakar memiliki tekanan yang lebih rendah dari tekanan udara luar sehingga menghasilkan sirkulasi.

Kondisi pada ruang bakar ini disebut *Under Pressure Furnace*.

b. Sistem tarikan tekan (*Forced Draft Fan*)

Tarikan tekan terjadi bila gas asap dihembuskan keluar ruang bakar oleh *fan* yang dipasang pada dinding ruang bakar sehingga memiliki tekanan yang lebih tinggi dari tekanan udara luar. Kondisi ini sering disebut tungku bertekanan (*Preasurized Furnace*)

c. Sistem tarikan kombinasi (isap dan tekan)

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

VIII. 2. Perencanaan Cerobong

Perencanaan cerobong pada sebuah generator uap sangat tergantung pada beberapa hal berikut, 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

Generator uap lokomotif ini dirancang dengan cerobong asap yang dibuat dari plat baja dengan data-data sebagai berikut :

- Tinggi cerobong (L) = 6 ft = 1,829 m
- Temperatur gas asap masuk cerobong (T_{mc}) = 522,257 ° F = 272,365 ° C
- Temperatur udara luar (T_u) = 80 ° F

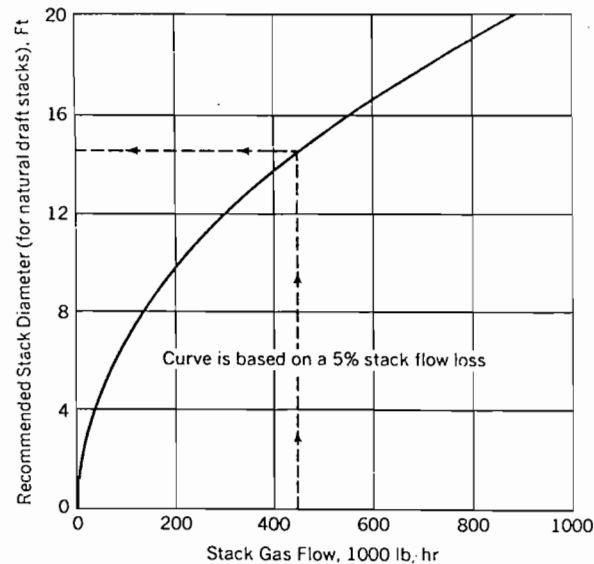
- Jumlah aliran gas asap (W_g) = 88820,569 lb / jam

Dari gambar 8.1. untuk aliran gas asap di dalam cerobong (*stack gas flow*) sebanyak 88820,569 lb / jam, diperoleh diameter cerobong asap (D_c) = 3 ft. Dengan menggunakan perencanaan diameter sebesar 3 ft dan tinggi 6 ft serta temperatur gas asap masuk cerobong = $522,257^\circ\text{F}$, maka dari gambar 8.2 didapat temperatur gas asap keluar cerobong (T_{kc}) = $500^\circ\text{F} = 260^\circ\text{C}$.

Sehingga temperatur rata-rata di dalam cerobong, yakni :

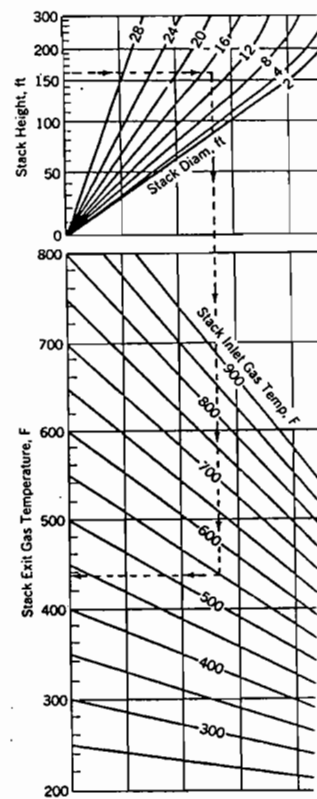
$$T_{cr} = \left(\frac{522,257 + 500}{2} \right) = 511,1285^\circ\text{F} = 266,1825^\circ\text{C}$$

Untuk $T_{cr} = 511,1285^\circ\text{F}$ dan tinggi cerobong 6 ft, dengan menggunakan gambar 8.3 diperoleh tarikan teoritis sebesar (t_c) = 0,1 in H_2O .



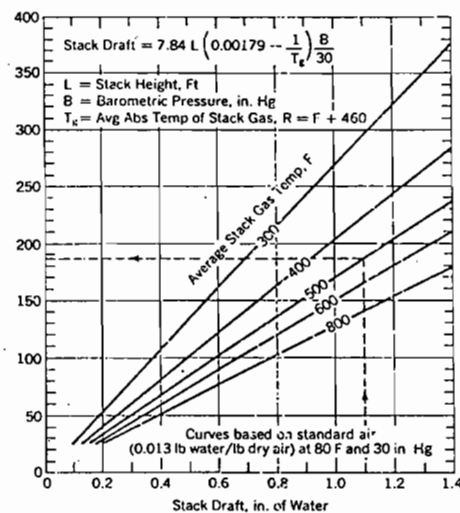
Gambar 8.1. Diagram diameter cerobong berdasarkan jumlah gas asap yang mengalir

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 15-7)



Gambar 8.2. Diagram hubungan antara temperatur gas asap keluar cerobong dengan dimensi cerobong

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 15-6)



Gambar 8.3. Diagram hubungan antara tinggi cerobong untuk harga tarikan cerobong dan temperatur rata-rata gas dalam cerobong

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 17-5)

VIII.2 1. Perhitungan Kerugian Aliran Gas Asap Di Dalam Cerobong

Untuk menghitung kerugian aliran gas asap di dalam cerobong (*Stack Flow Lose*), digunakan rumus :⁵⁷⁾

$$SFL = \frac{2,76}{B} \times \frac{T_{cr}}{(D_i)^4} \times \left(\frac{W_g}{100000} \right)^2 \times \left(\frac{f \times L}{D_i} + 1 \right) \quad \text{.....(8.1)}$$

$$\text{Dengan : } W_{fr} = \frac{W_u}{A_{pc}} = \frac{88820,569}{4,71} = 18857,87 \text{ lb / jam}$$

B = Tekanan rata-rata gas asap di dalam cerobong

T_{cr} = Temperatur rata-rata gas asap di dalam cerobong

$$= 1205,81 \text{ R} = 746,14^\circ \text{ F} = 396,74^\circ \text{ C}$$

D_{ic} = Diameter dalam cerobong = 3 ft = 0,9144 m

F = Faktor gesekan

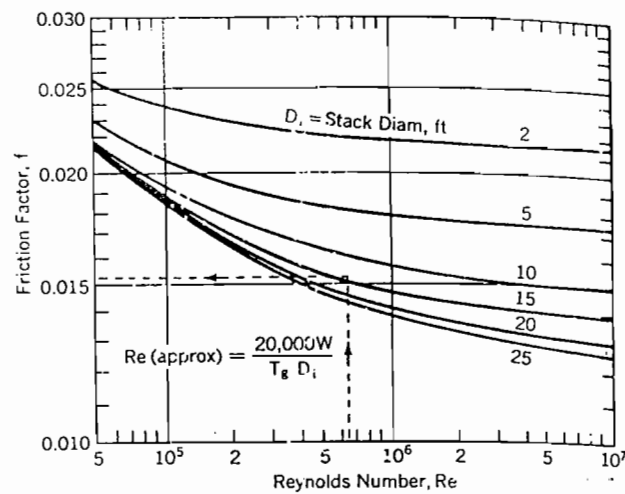
L = Tinggi cerobong = 6 ft = 1,829 m

Untuk menentukan besarnya faktor gesekan, dicari dahulu besarnya bilangan Reynold :

$$\begin{aligned} N_{RE} &= \frac{20000 \times W_{fr}}{T_{cr} \times D_{ic}} \\ &= \frac{20000 \times 18857,87}{970,7985 \times 3} \\ &= 129500,7495 \end{aligned}$$

Dari gambar 8.4 untuk $D_{ic} = 3 \text{ ft}$ dan $N_{RE} = 129500,7495$, didapat $f = 0,024$.

⁵⁷⁾ Babcock and Wilcox, *Steam / It's Generation and Use*, hal 17-2



Gambar 8.4. Diagram hubungan faktor gesekan dengan diameter cerobong berdasarkan bilangan Reynold

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 15-6)

Sehingga harga *Stack Flow Lose* sebesar :

$$SFL = \frac{2,76}{30} \times \frac{511,1285}{81} \times \left(\frac{18857,87}{100000} \right)^2 \times \left(\frac{0,024 \times 6}{3} + 1 \right)$$

$$= 0,0217 \text{ in H}_2\text{O}$$

VIII. 2. 2. Perhitungan Kerugian Aliran Gas Asap Dalam Generator

Untuk menghitung besarnya kerugian aliran gas asap selama mengalir di dalam generator, sebelumnya dihitung dahulu hambatan dalam pipa-pipa api dan *superheater* :

- Hambatan aliran gas asap pada saat melewati pipa-pipa api :

Hambatan aliran gas pada pipa-pipa api, dapat dihitung dengan rumus :⁵⁸⁾

⁵⁸⁾ Ibid, hal 17-10

$$\Delta P_1 = \frac{F \left(\frac{L}{D_e} \right) \left(460 + \frac{T_1 + 2T_2}{3} \right) \left[\left(\frac{G_g}{10^3} \right)^2 \right]}{14400} \dots\dots\dots(8.2)$$

Dengan :

F = faktor gesekan

D_i = diameter dalam pipa api = 2,067 in

n = banyaknya pipa api = 140 buah

L = panjang pipa-pipa api = 14,7645 ft

G_g = massa velocity gas = 27228,868 lb / jam ft²

T₁ = Temperatur gas asap masuk pipa-pipa api = 2340,33 ° F

T₂ = Temperatur gas asap keluar pipa-pipa api = 800 ° F

D_e = diameter dalam ekivalen pipa-pipa api = 2,067 x 140 = 280,38 in

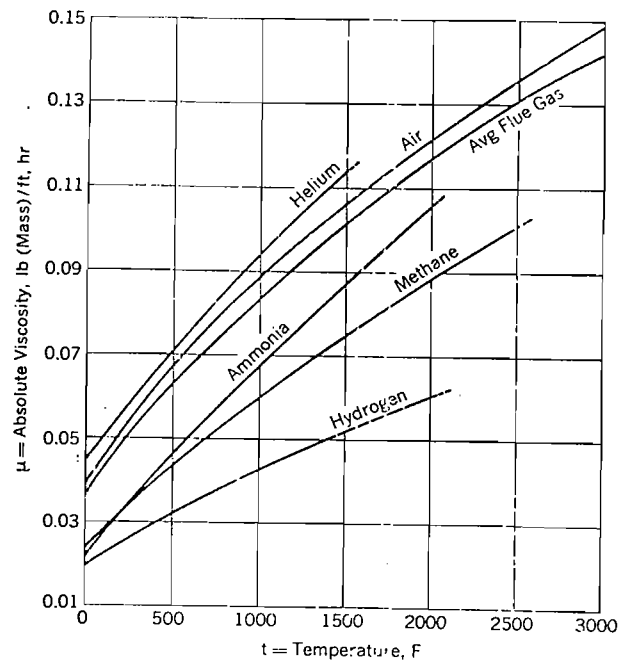
Besarnya bilangan reynold :⁵⁹⁾

$$N_{re} = \frac{G_g \times D_i}{12 \times \mu} \dots\dots\dots(8.3)$$

Temperatur rata-rata gas asap di dalam pipa-pipa api :

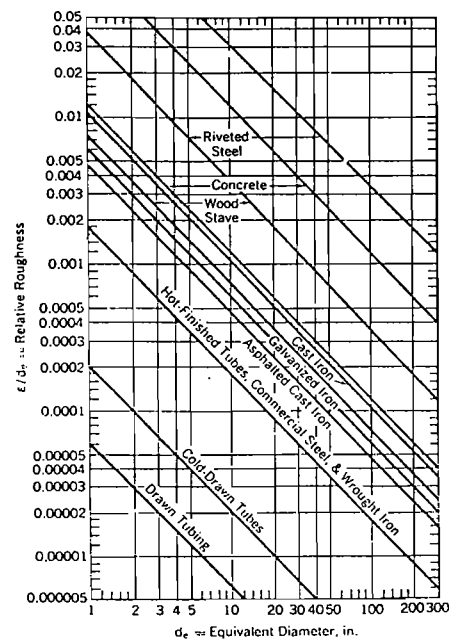
$$T_{par} = \frac{2340,33 + 800}{2} = 1570,165^\circ \text{ F}$$

⁵⁹⁾ Ibid, hal 17-11



Gambar 8.5. Kekerasan relatif dari berbagai permukaan

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 3-6)



Gambar 8.6. Viskositas absolut untuk beberapa gas ideal pada tekanan atmosfer

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 3-7)

Untuk $D_i = 2,067$ dan diasumsikan untuk *finished tubes*, maka dari gambar 8.6 didapat *raughes* (ε / D) = 0,00056.

Dan untuk $N_{re} = 42637,932$ dari gambar 8.4 didapat koefisien gesek (F) = 0,024.

Sehingga :

$$\Delta P_1 = \frac{0,024 \left(\frac{14,7645}{280,38} \right) \left(460 + \frac{2340,33 + 2 \times 800}{3} \right) \left[\left(\frac{29323,397}{10^3} \right)^2 \right]}{14400}$$

$$= 0,129 \text{ in H}_2\text{O}$$

- Hambatan aliran gas asap pada saat melewati *superheater* :

Hambatan aliran gas asap pada *superheater* dapat dihitung dengan rumus :⁶⁰⁾

$$\Delta P_2 = (f \times N \times F_d) \left(\frac{30}{B} \right) \left(\frac{T_g + 460}{1,73 \times 10^5} \right) \left(\frac{W_{vg}}{10^3} \right)^2 \quad \dots\dots\dots(8.4)$$

Dengan :

f = faktor gesekan

N = banyaknya pipa *superheater* = 81 pipa

$F_d = 1,20$

W_{vg} = massa *velocity* gas = 13237,045 lb / jam

B = tekanan barometer (terukur) = 30 in Hg

T_g = temperatur gas asap panas

$$= 0,95 (t_{g1} + t_{g2} / 2)$$

⁶⁰⁾ Ibid, hal 14-4

t_{g1} = temperatur gas asap masuk *superheater*

$$= 800^{\circ} \text{F}$$

t_{g2} = temperatur gas asap keluar *superheater*

$$= 522,257^{\circ} \text{F}$$

maka :

$$T_g = 0,95 (800 + 522,257 / 2) = 628,072^{\circ} \text{F}$$

Dari gambar 8.5, didapat $\mu = 0,11$, maka :

$$\begin{aligned} N_{RE} &= \frac{G_g \times D_i}{12 \times \mu} \\ &= \frac{11061,092 \times 2,375}{12 \times 0,11} \\ &= 19901,58 \end{aligned}$$

Dengan $D_i = 2,375$ in dan $N_{re} = 19901,58$, dari gambar 8.4 didapat besarnya

faktor gesekan = 0,018.

Sehingga :

$$\begin{aligned} \Delta P_2 &= (0,018 \times 81 \times 1,20) \left(\frac{30}{30} \right) \left(\frac{628,072 + 460}{1,73 \times 10^5} \right) \left(\frac{13237,045}{10^3} \right)^2 \\ &= 1,928 \text{ in H}_2\text{O} \end{aligned}$$

Dengan demikian besarnya hambatan aliran gas asap dalam generator uap lokomotif ini adalah sebesar :

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_1 + \Delta P_2 \\ &= 0,129 + 1,928 \end{aligned}$$

$$= 2,057 \text{ in H}_2\text{O}$$

Dari hasil perhitungan di atas, maka persentase perbandingan antara *SFL* dengan tarikan teoritis cerobong terhadap gas asap adalah sebesar :

$$\frac{0,0217}{0,1} \times 100\% = 21,7 \%$$

Karena persentase perbandingan *SFL* dengan tarikan teoritis cerobong $> 5 \%$, maka cerobong yang direncanakan tidak memenuhi syarat untuk dijadikan tarikan alam. Sebab untuk dapat menimbulkan tarikan alam, persentase perbandingannya harus $\leq 5 \%$. (*Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 17-4*).

VIII. 3. *Nozzle* Penghembus

Berdasarkan perhitungan di atas, ternyata persentase perbandingan antara *SFL* dengan tarikan teoritis cerobong ternyata lebih besar dari 5% sehingga perancangan cerobong pada generator uap ini tidak dapat menimbulkan aliran gas asap secara tarikan alam. Sehingga aliran pada generator uap Lokomotif ini harus dihasilkan dengan tarikan paksa atau dengan kata lain membutuhkan sebuah alat bantu yang dapat menciptakan sebuah aliran gas asap dalam generator. Oleh karena itu, untuk menghasilkan aliran pada cerobong yang dapat menghisap keluar gas asap maka dapat dibantu dengan *nozzle* penghembus yang berfungsi untuk menghembuskan sebagian uap air keluar menuju cerobong.

Dengan bantuan *nozzle* ini, dapat ditimbulkan aliran dalam generator karena adanya perbedaan tekanan. Uap yang telah dihasilkan dari dom uap akan diteruskan menuju ke *superheater* untuk dipanaskan lanjut. Uap air ini sebagian

dikeluarkan ke cerobong melalui *nozzle* penghembus untuk menghasilkan aliran dalam generator. Uap yang keluar dari *nozzle* penghembus ini memiliki kecepatan yang tinggi sedangkan tekanannya rendah. Karena tekanan uap yang rendah tersebut maka tekanan di dalam cerobong juga akan rendah dan menyebabkan adanya tarikan terhadap gas asap yang memiliki tekanan lebih tinggi.

Dan untuk mengatur kecepatan aliran gas asap dalam generator maka *nozzle* penghembus dilengkapi dengan keran pengatur yang dapat diatur dengan sebuah tuas engkol. Tuas engkol harus dipasang di dekat operator agar kecepatan uap air yang keluar dapat selalu dikontrol sehingga aliran gas asap dapat berlangsung secara stabil.

VIII.4. Waktu Pengisian Air Isian

Dengan diketahuinya laju uap = 25 ton / jam, maka laju air yang menguap ($\dot{m}_{air}$) :

$$\dot{m}_{air} = \dot{m}_{uap} = 25000 \text{ kg / jam}$$

Kemudian massa air yang menguap (m_u) :

$$m_u = V_u \times \rho_{air}$$

Dengan : $\rho_{air} = 859,4 \text{ kg / m}^3$ (pada temperatur $204,3^\circ \text{C}$)

Sehingga :

$$\begin{aligned} m_u &= 5,983 \times 859,4 \\ &= 5141,79 \text{ kg} \end{aligned}$$

Sehingga waktu pengisian air (t_{isi}) :

$$t_{isi} = \frac{m_u}{m_{uap}} = \frac{5141,79}{25000} = 0,206 \text{ jam} = 12,36 \text{ menit}$$

BAB IX

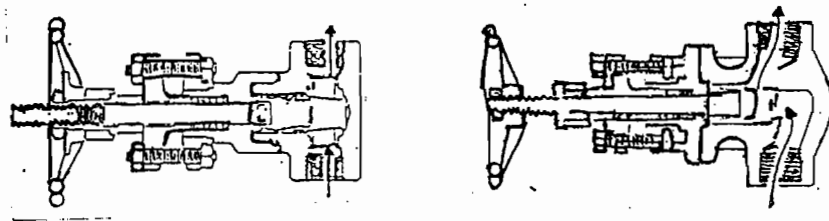
ALAT-ALAT PERTOLONGAN

DAN

PERLENGKAPAN GENERATOR

IX. 1. Keran Pembuang (*Blowdown*)

Keran *Blowdown* adalah keran untuk aparat pembuang yang fungsinya adalah untuk mengeluarkan sebagian atau seluruh air isian dari dalam generator. Keran ini dipasang pada bagian yang menjadi tempat mengendapnya lumpur, supaya lumpur dapat ikut keluar pada waktu mengeluarkan air isian. Pada generator uap pipa-pipa api biasanya hanya memakai satu buah keran buang. Untuk *blow off* dari generator biasanya dipakai keran sumbat atau keran buka cepat (*quick opening*), karena keran ini tidak mudah tersumbat lumpur seperti pada keran bola. Air dan kotoran yang dikeluarkan ditampung lebih dahulu pada drum penampung *blow off*. Drum ini biasanya selalu terisi air hingga hampir penuh sehingga pada waktu *bolw off*, air yang keluar ke selokan pembuang dari drum *blow off* berupa air yang tidak terlalu panas.

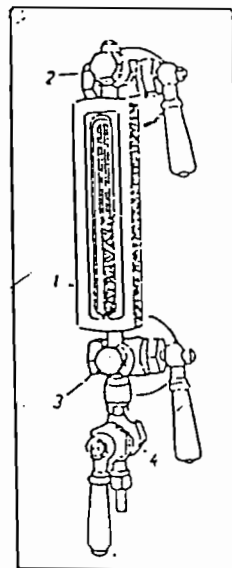


Gambar 9.1. Keran Pembuang

(Sumber : Ir. Syamsir A. Muin, Pesawat-Pesawat Konversi Energi I, Rajawali, Jakarta,
hal 300)

IX. 2. Gelas Penduga

Gelas penduga adalah alat yang berfungsi untuk menunjukkan ketinggian air di dalam generator. 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 generator. Alat penduga ini terdiri dari tiga bagian, yaitu : gagang atas yang terdapat keran uap, gagang bawah yang terdapat keran air dan keran cerat. Alat penduga ini dapat dipergunakan sampai tekanan kurang lebih 20 kg / cm^2 . Diameter luar tabung gelas kurang lebih 20 mm dan memiliki panjang 30 cm, serta tebal dinding 2,5 – 3 mm. Gagang atas dihubungkan dengan ruang air. Bila air di dalam gelas sama tingginya dengan air di dalam drum generator, maka pengisian air isian harus dihentikan.



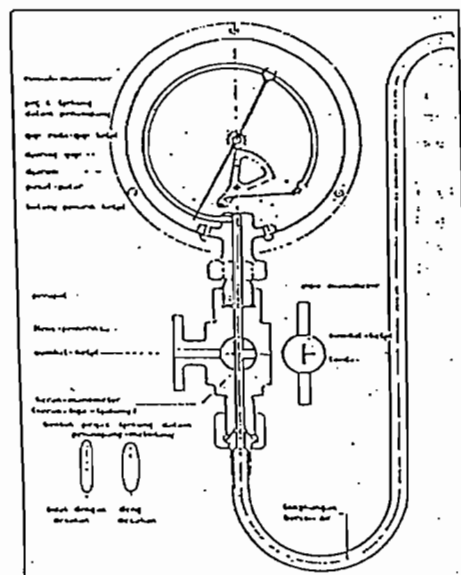
Gambar 9.2. Gambar gelas penduga

(Sumber : Ir. Syamsir A. Muin, Pesawat-Pesawat Konversi Energi I, Rajawali, Jakarta, hal 300)

IX. 3. Manometer

Manometer adalah alat yang berfungsi sebagai penunjuk tekanan. Tekanan yang diukur oleh manometer ini adalah tekanan uap dalam silinder generator. Manometer dipasang pada daerah dimana uap tidak mengalir yaitu pada tangki atau silinder generator pada bagian atas. Agar tekanan uap dapat selalu dipantau, manometer harus selalu kelihatan oleh operator.

Manometer yang umum dipakai adalah manometer jenis *bourdon*, yang terdiri dari pipa kecil yang berbentuk lingkaran dengan penampang bulat panjang yang pada salah satu ujungnya tertutup. Ujung yang terbuka terhubung dengan ruang uap generator melalui saluran. Oleh karena tekanan uap yang tinggi, maka pipa yang berbentuk lingkaran akan berubah bentuk. Perubahan bentuk ini yang akan menyebabkan terjadinya perubahan pada jarum manometer.



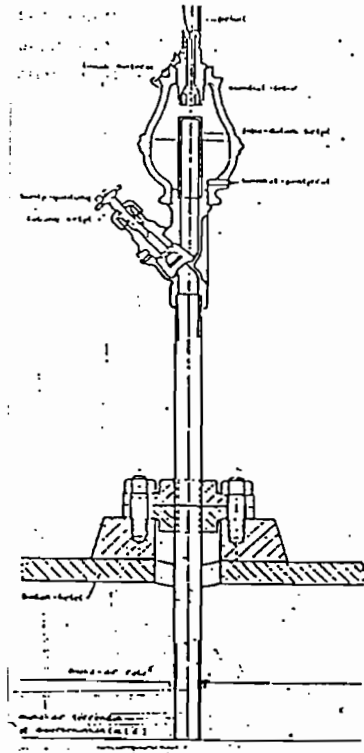
Gambar 9.3. Gambar Manometer

(Sumber : Ir. Syamsir A. Muin, Pesawat-Pesawat Konversi Energi I, Rajawali, Jakarta, hal 300)

IX. 4. Peluit Bahaya

Peluit bahaya adalah peluit yang berfungsi sebagai tanda apabila dalam pengoperasian generator terjadi suatu kondisi yang berbahaya. Peluit ini terdiri dari sebuah badan yang berbentuk waluh, yang di atasnya diberi sebuah peluit. Lubang peluit ini ditutup oleh sebuah sumbat yang dapat diganti dan terbuat dari suatu bahan semacam paduan logam yang dapat mudah mencair. Titik lebur dari paduan bahan sumbat tersebut harus sedemikian rendah hingga dapat mencair bila terkena uap dari dalam silinder generator.

Pipa dari badan yang berbentuk waluh itu ditutup dari atas dan diberi beberapa buah pada sekelilingnya. Hal itu dimaksudkan agar dapat mencegah air panas pada generator yang menyembrot ke atas dapat berhubungan dengan prop timah dan mencairkan prop timah tersebut pada waktunya. Badan berbentuk buah waluh tersebut diletakkan di atas sebuah keran penutup yang terhubung dengan bagian dalam silinder generator oleh sepotong pipa baja.



Gambar 9.4. Gambar Peluit Bahaya

(Sumber : Ir. Syamsir A. Muin, Pesawat-Pesawat Konversi Energi I, Rajawali, Jakarta, hal 301)

IX. 5. Garis Api

Garis api adalah alat yang berupa lempengan logam bergaris yang diletakkan pada dinding luar generator uap. Alat ini berfungsi sebagai penunjuk batas tertinggi permukaan silinder generator yang dipanasi oleh gas panas. Garis api ini sangat perlu dalam pemakaian generator untuk mempertimbangkan kondisi permukaan air di dalam generator. Garis logam tersebut menunjukkan dengan tepat batas tertinggi permukaan silinder generator yang dipanasi oleh gas panas.

IX. 6. Keran Pengisi / Penutup Air Isian Generator

Keran pengisi air isian generator ini adalah keran yang berfungsi untuk mengatur pengisian air isian. Keran pengisi ini dipasang di antara pompa pengisi dan generator. Keran pengisi ini berupa keran penutup yang dipasang sedekat mungkin dengan dinding drum untuk menutup atau membuka sistem pengisian. Selain itu, keran pengisi juga dapat dilengkapi dengan keran otomatis (*modulating valve*). Keran yang dapat dipakai untuk keran pengisi ini ada dua macam, yaitu keran putar dan keran tutup. Penutupan pada keran putar lebih baik tetapi pemutaran dapat menyebabkan lebih cepat aus. Oleh karena itu tipe keran tutup lebih banyak dipakai karena proses membuka dan menutup pada keran ini berlangsung lebih ringan. Selain itu pada keran tutup terjadinya keausan sangat kecil kemungkinannya dan perbaikan lebih mudah dilakukan. Akan tetapi pada keran tutup, kebocoran pada bagian penutup aliran lebih mudah terjadi sehingga penutupannya menjadi kurang rapat. Untuk mengatasi masalah itu, biasanya keran pengisi ini juga dilengkapi dengan keran coba. Keran coba adalah keran yang berfungsi untuk mengetahui apakah penutupan telah sempurna atau belum. Bila keran coba dibuka dan air masih mengalir maka berarti bahwa penutupan kurang rapat.

IX. 7. Keran Uap Induk

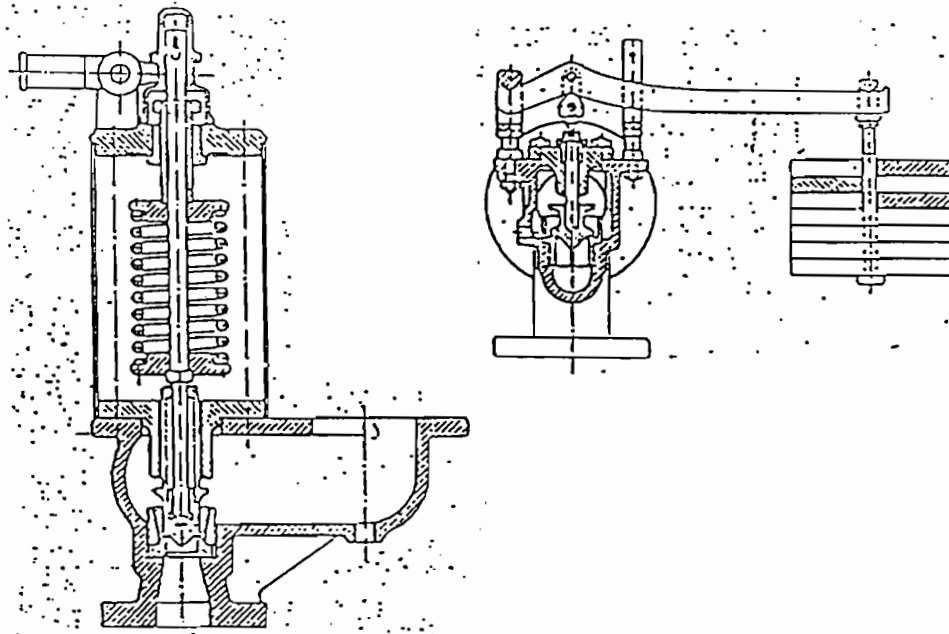
Keran uap induk adalah keran pengatur masuknya uap yang telah diambil dari doom uap yang menuju ke bagian transmisi dari lokomotif.

IX. 8. Pompa Air Isian

Pompa air isian adalah pompa yang dipakai sebagai perlengkapan dari generator untuk memberi tekanan pada air isian sehingga dapat masuk ke silinder generator dengan lebih cepat. Pompa air isian sebaiknya dipasang dua buah secara paralel agar dapat dipergunakan secara bergantian.

IX. 9. Katup Keamanan

Katup keamanan adalah katup yang berfungsi untuk menjaga agar tekanan tetap berada pada tekanan yang normal sehingga tidak terjadi tekanan yang berlebihan dan tidak menimbulkan hal-hal yang berbahaya.



Gambar 9.5. Katup keamanan

(Sumber : Ir. Syamsir A. Muin, Pesawat-Pesawat Konversi Energi I, Rajawali, Jakarta, hal 301)

IX. 10. Dom Uap (Steam Doom)

Dom uap pada umumnya disusun dari dua atau lebih banyak gelang-gelang, bulatan-bulatan atau silinder-silinder plat logam. Dom uap berfungsi

sebagai tempat pemisah antara uap dan air yang telah dipanasi dengan cara mengumpulkan uap yang terbentuk dan mengalirkannya ke *superheater*. Tiap bulatan dibuat dari satu plat logam yang datar yang dilengkungkan dengan jalan dirol (dicanai). Ujung tiap bulatan itu disambung satu sama lain dengan memakai cara kelingan atau las.

Sedangkan pembuatan tutup dom uap yaitu dengan menggunakan alat penumbuk plat dimana sebuah plat dibentuk sesuai dengan bentuk dom uap yang dirancang. Dan pemasangan dom uap adalah dengan jalan pengelasan yang ditempelkan langsung pada bagian luar atas pada silinder generator.

BAB X

AIR ISIAN GENERATOR

X. 1. Pengantar

Air isian generator adalah fluida kerja yang digunakan pada generator uap, yang pada akhirnya akan berubah menjadi uap yang bertekanan. Air isian harus bersih atau tidak mengandung garam, senyawa-senyawa organik dan zat-zat yang mudah mengendap seminimal mungkin agar tidak dapat menimbulkan gangguan dalam operasional generator.

Air ketel yang kurang bersih dapat menimbulkan akibat sebagai berikut :

- Pembentukan kerak yang dapat mengurangi daya hantar panas pada dinding pipa-pipa pada generator dan juga kemungkinan dapat menimbulkan *overheating* pada pipa-pipa generator.
- Timbulnya korosi yang akan menyebabkan berkurangnya kekuatan dari bagian-bagian generator.
- Timbulnya buih yang akan menyebabkan gangguan operasional generator.

Dalam hal ini, maka air isian generator harus dibersihkan dari kotoran-kotoran atau setidaknya dikurangi sampai batas minimum yang disyaratkan hingga kesulitan masalah pada generator dapat dikurangi.

X. 2. Pembentukan Kerak dan Lumpur

Terbentuknya kerak pada dasarnya disebabkan karena pengendapan garam yang terlarut dalam air isian pada waktu air menguap. Jenis garam yang dapat membentuk kerak lumpur terdiri dari dua golongan yaitu yang mengandung karbonat dan yang tidak mengandung karbonat. Contoh senyawa-senyawa yang



dapat membentuk kerak adalah : CaCO_3 , CaSO_4 , Mg(OH)_2 , MgCO_3 , Ca silikat, Mg silikat, dan lain-lain. Senyawa-senyawa itu dalam prakteknya akan dijumpai dalam keadaan campuran dari dua atau lebih persenyawaan. Sifat umum dari kerak yang terbentuk adalah akan melapisi permukaan dalam silinder generator dan permukaan luar pipa-pipa generator. Sifat dari pada kerak itu sendiri tergantung pada jenis senyawanya.

Maka dengan adanya kerak pada pipa-pipa generator akan menyebabkan daya hantar panas dari pipa-pipa tersebut berkurang. Hal ini menyebabkan panas yang dibutuhkan lebih besar dan menyebabkan suhu dinding luar akan lebih tinggi serta konsumsi bahan bakar menjadi lebih besar. Selain itu dapat terjadi *overheating* pada pipa-pipa api.

Kadar lumpur dalam air isian dapat dikontrol dari derajat kekeruhan dengan jalan mengukur volume lumpur yang diendapkan atau membuang endapan lumpur setelah dilakukan pengeringan.

X. 3. Pencegahan Pembentukan Kerak dan Lumpur

Untuk mengurangi atau mencegah timbulnya kerak dan lumpur adalah mengusahakan agar air isian generator mengandung garam-garaman sedikit mungkin. Untuk itu diusahakan agar air isian hanya sedikit mengandung Ca, Mg, dan Silikat. Cara untuk mencegah timbulnya kerak dan lumpur dapat diklasifikasikan menjadi tiga golongan :

- A. Membuang zat-zat yang mudah membentuk kerak dengan jalan membersihkan air isian sebelum masuk generator.

Cara ini dapat dilakukan dengan berbagai proses, yaitu :

a. Proses Thermis

Proses ini dilakukan bila sebagian besar garam yang terkandung di dalam air isian terdiri dari garam bikarbonat. Dengan pemanasan maka garam $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ bikarbonat terurai menjadi CO_2 dan karbonat mengendap berbentuk CaCO_3 .

b. Proses Kalk-Soda

Dengan proses kalk-soda, ion-ion Ca^{++} akan diendapkan sebagai CaCO_3 dan Mg^{++} menjadi $\text{Mg}(\text{OH})_2$, yaitu dengan jalan penambahan zat kimia ke dalam air yang akan dilunakkan tersebut.

Zat kimia yang dipakai adalah : Kalk ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dan Soda (Na_2CO_3)

Dengan cara ini, kebutuhan kalk dan soda tergantung pada garam yang tergantung dalam air isian generator tersebut.

c. Proses Phosphat

Garam-garam phosphat (misal : calcium phosphat dan magnesium phosphat) sangat sukar larut dalam air, sehingga memungkinkan dilakukan pelunakan air dengan memberikan alkali phosphat. Dengan proses phosphat ini, hasil pelunakan air lebih baik dan juga lebih cepat, sedang zat kimia yang dipakai hanya satu macam. Akan tetapi apabila pemakaian phosphat terlalu banyak dapat menimbulkan batu kerak dan korosi serta harganya pun cukup mahal. Jika air mengandung banyak bikarbonat, pemberian phosphat akan

mempertinggi sifat alkali air tersebut. Pada umumnya proses ini digunakan untuk penyempurnaan pelunakan sisa kesadahan (lanjutan). Jenis phosphat yang banyak dipakai adalah $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (padat).

d. Proses Pertukaran Ion

Dalam pelunakan air pada proses-proses terdahulu sering masih terdapat sisa kesadahan. Untuk menghilangkan atau penyempurnaan proses tersebut masih bisa dilanjutkan dengan alat penukar ion. Sebagai bahan penukar ion dipakai Zeolith (Ze) atau media sintetis lainnya. Dalam prakteknya, cara yang sering dipakai adalah kombinasi antara proses kalk – soda dan diikuti proses penukar ion.

e. Proses Pembersihan Silikat

Senyawa silikat dengan Ca dan Mg akan membentuk kerak yang keras yang akan membahayakan dalam pemanasan generator. Silikat ini sukar dibersihkan karena terlarut dalam air berupa ion silikat. Batu-batu kerak ini banyak ditimbulkan dari bahan-bahan silikat SiO_2 dan SiO_3 . Batu kerak dapat juga berupa suatu senyawa komplek yang berupa suatu koloid yaitu bahan yang mudah mengendap. Apabila hal ini terjadi, akan sangat berbahaya bagi generator. Silikat ini belum bisa dihilangkan dengan Ze saja. Cara lain yang dapat dilakukan untuk melenyapkan silikat adalah dengan absorpsi, misalnya dengan senyawa Mg, Al, atau Fe. Absorpsi dapat dilakukan dalam bentuk jonjot atau koloid seperti $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

B. Mengendapkan bahan-bahan pembentuk kerak atau lumpur.

1. Penambahan soda

Bila di dalam air mengandung kerak CaSO_4 yang berupa batu, dengan penambahan soda akan menyebabkan terlarutnya batu tersebut sehingga terbentuklah lumpur.

Pemakaian soda hanya untuk generator yang mempunyai tekanan kerja rendah, karena pada tekanan tinggi, soda akan terurai. Terurainya soda dapat menimbulkan buih dan akan menimbulkan korosi. Jadi selain menghasilkan pencegahan pembentukan batu gips (CaSO_4) juga dapat mencegah pembentukan batu silikat.

2. Penambahan phosphat

Untuk tekanan lebih tinggi dari 15 atm, pemakaian soda tidak menguntungkan lagi. Maka untuk tekanan tinggi dan suhu tinggi dapat dilakukan dengan penambahan phosphat terutama sebagai pencegah pembentukan batu gips maka dipakai natrium phosphat NaPO_4 .

3. Penambahan senyawa organik

Senyawa organik yang sering digunakan untuk batu kerak adalah tepung (tapioka), *tanine* (gula / bahan penyamak kulit), grafit dan melase.

C. Menambahkan zat-zat tertentu dalam feed water yang menyebabkan garam-garaman tertentu membentuk koloid (jonjotan) :

1. Penambahan bahan-bahan organis koloid.
2. Penambahan soda
3. Penambahan zat-zat lain (preparat).

X. 4. Proses Korosi

Proses korosi pada generator uap terjadi karena disebabkan logam (Fe) yang berhubungan dengan air selalu mengalami tekanan elektro kimia dari ion-ion yang ada dalam air. Korosi itu merupakan suatu proses oksidasi. Dan air sendiri cenderung untuk bereaksi dengan Fe (besi), karena air mengandung :

- Senyawa-senyawa organik
- Kadar garam terlalu tinggi
- Zat yang mudah menguap

Hal ini akan menyebabkan terjadi buih dan percikan-percikan air pada waktu pemanasan, yang akan menghambat proses dan menyebabkan terjadi penurunan entalpi uap air (penyebab korosi).

Korosi tidak mungkin dapat dihilangkan, tetapi dapat dicegah dengan cara menghambat terjadinya korosi atas reaksi-reaksi kimia pembentukan korosi. Dalam hal ini, pencegahan korosi dapat dilakukan dengan 4 cara :

1. Perlindungan secara katodis

Perlindungan dilakukan dengan memasang metal elektroda pada dinding generator. Dinding generator dibuat menjadi katoda sedang elektroda menjadi anoda sehingga dinding mempunyai banyak elektron dan reaksi bergerak ke kiri. Disekitar dinding terdapat banyak elektron sehingga penguraian e^- bisa dihindarkan. Syarat utama dari proses ini

adalah bahwa beda potensial antara dinding generator dengan air paling sedikit harus sama dengan potensial penguraian besi, maka dalam air tidak akan terdapat ion besi yang berarti proses korosi tidak terjadi.

2. Alkalisasi air generator

Korosi juga dapat dihindari dengan jalan merendahkan konsentrasi ion-ion air. Pencegahan korosi dengan alkalisasi air isian dapat dilakukan dengan menambah Na_2CO_3 (soda kue) dan NaOH (soda api), sehingga pH naik antara 10,55 – 11,00. Bila pH lebih tinggi lagi (> 11) maka korosi akan dapat bereaksi lagi.

3. Pengusiran oksigen

Proses korosi pada lingkungan yang netral dapat ditentukan oleh adanya oksigen. Maka pencegahan korosi dapat dilakukan dengan pengusiran oksigen. Oksigen dapat diusir dari air dengan cara *physis* atau *chemis* atau dengan cara kimia-fisika (metode *deaerasi*). Dengan metode *deaerasi* dapat menurunkan kadar oksigen sampai 0,05 mg oksigen / liter air. Air yang sudah bebas dari oksigen harus diusahakan agar sekecil mungkin berhubungan dengan udara.

4. Pembentukan lapisan pelindung

Korosi dapat dicegah dengan jalan membentuk lapisan permukaan metal, misalnya dengan pemberian besi phosphat yang berlebihan ke dalam air isian. Phosphat selain dapat mempertinggi sifat alkalis air dan mencegah pembentukan kerak-kerak sulfat, dapat juga dipakai untuk menghindari proses korosi di atas permukaan metal.

X. 5. Syarat-Syarat Air Umpan

Air Umpan yang baik adalah air umpan yang memenuhi syarat-syarat berikut :

PH	: 8,5 – 9
Kesadahan	: nihil
Alkalinity total	: max 100 ppm
Kadar Phosphat	: 20 – 40 ppm
Kadar Chlorine	: 75 ppm
Kadar Sulphat	: 200 ppm
Kadar Silica	: sekecil mungkin (< 5 ppm)
Kadar Oksigen	: sekecil mungkin (< 0,005 cc / liter)

X. 6. Syarat-Syarat Air Isian

Adapun syarat-syarat umum air isian yang baik adalah sebagai berikut :

PH	: 8,5 – 9
Total Hardness	: sekecil mungkin
Alkalinity total	: 100 - 800 ppm
Kadar Phosphat	: 20 – 40 ppm
Kadar Chlorine	: max 500 ppm

X. 7. Proses-proses Air Sebelum Masuk Generator

Untuk mencegah atau setidaknya mengurangi proses korosi yang dapat terjadi, sebelum masuk ke dalam generator, air isian harus melalui proses-proses berikut ini :

A. Proses *Softening*

Proses ini adalah proses menghilangkan kesadahan yaitu menghilangkan Ca dan Mg. Proses softening dilakukan dalam tangki *softener* yang berisi natrium resin yang pada bagian bawahnya terdapat batu-batu penyangga yang berfungsi juga sebagai filter. Proses *softening* akan berjalan baik bila kesadahan air yang keluar berharga 0,26, dan jika melebihi angka tersebut maka resin perlu diregenerasi dengan menggunakan regeneran NaCl. Adapun langkah-langkahnya adalah :

- *Back Wash*

Back 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 ke atas sehingga kotoran akan terikat dengan aliran air.

- Pemberian garam NaCl

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

Pencucian bertujuan untuk menghilangkan garam-garam yang terbentuk yaitu CaCl_2 dengan menggunakan air yang dialirkan pada bagian atas.

B. Degasing

Degasing adalah proses menghilangkan gas-gas yang terkandung dalam air dengan maksud mencegah korosi dalam boiler. *Degasing* atau daerasi ini terjadi di dalam daerator. Air yang keluar dari *softener* ditampung di dalam tangki penampung air lunak sebelum dialirkan ke dalam daerator. Kemudian daerator diinjeksikan uap sehingga gas CO_2 dan O_2 akan keluar.

C. Dasing

Dasing adalah penambahan bahan-bahan kimia ke dalam air sebelum masuk ke dalam generator. Bahan yang ditambahkan adalah NaOH , Na_3PO_4 dan Na SO_3 . Jika air terlalu asam maka akan dapat menyebabkan korosi, sedangkan apabila terlalu basa akan menyebabkan terjadinya kerak.

D. Elektromagnetik Softener

Proses ini bertujuan untuk membuat ion Ca dan Mg yang tidak mengendap lagi dengan jalan melewati air dielektromagnetik sehingga terjadi pengacauan ion karena pengaruh dua magnet yang berbeda.

BAB XI

PENGOPERASIAN DAN PERAWATAN

Perancangan sebuah generator uap tidak hanya merancang dimensi dan kekuatan dari komponen-komponen generator uap saja, tetapi juga sebaiknya dilengkapi dengan bagaimana cara mengoperasikan dan merawat generator uap yang baik. Hal ini dimaksudkan agar generator uap dapat berlangsung sebagaimana mestinya dan ketahanan generator dapat terjaga.

Dengan pengoperasian dan perawatan yang baik, diharapkan generator dapat bekerja dengan baik sehingga hasil yang diperoleh juga sesuai dengan perancangan dan semua hal-hal yang tidak diinginkan dapat dihindari. Dengan demikian kerusakan-kerusakan yang dapat terjadi pada komponen-komponen generator dapat dicegah. Oleh karena kerusakan komponen dapat dikurangi atau pun dihindari maka secara otomatis biaya yang dikeluarkan pun dapat diminimalkan.

Jadi pengoperasian dan perawatan yang baik dimaksudkan untuk mempertahankan kualitas hasil dengan cara meminimumkan biaya dan juga untuk meningkatkan efisiensi kerja dari generator serta mengurangi pengaruh pencemaran yang besar terhadap lingkungan.

XI.1. Pengoperasian Generator

Sebelum mengaktifkan atau mengoperasikan generator uap, data-data spesifik dari generator uap seperti : tekanan kerja, suhu yang diinginkan dan jumlah uap yang dihasilkan harus diperdalam terlebih dahulu.

Untuk dapat mengoperasikan generator uap pada perancangan ini, ada beberapa langkah yang harus dilakukan, yaitu :

1. Pengisian Generator dengan air isian yang kualitasnya baik yaitu telah dibersihkan dan dipersiapkan berdasarkan syarat-syarat tertentu dengan menyalakan pompa air isian yang telah tersedia sampai batas tertentu yang telah ditetapkan.
2. Menghidupkan api dengan bantuan LPG untuk membakar bahan bakar batubara sehingga pemanasan segera dapat berlangsung. Pada generator ini udara yang digunakan untuk pembakaran tidak dipanasi terlebih dahulu karena pemanasan dengan menggunakan bahan bakar batubara sudah cukup cepat.
3. Apabila diatas rangka bakar telah terdapat lapisan batubara yang membara, maka burner dapat dimatikan dan pembakaran harus terus dijaga dengan menaburkan batubara baru diatasnya.
4. Setelah semua proses dalam generator berlangsung, yang perlu diamati dan diperhatikan adalah tekanan uap di dalam generator sebaiknya tidak sampai melampaui tekanan kerja. Apabila tekanan udara hendak melampaui tekanan kerja, maka uap dapat dikurangi dengan membuangnya melalui keran yang merupakan alat pertolongan ataupun melalui katup keamanan.
5. Ketinggian air isian juga harus diperhatikan, dengan memperhatikan garis api yang telah tersedia sebagai indicator ketinggian permukaan air isian di dalam generator.

Tujuan syarat pengoperasian adalah untuk mengetahui seberapa jauh sebuah generator akan digunakan agar efisiensi tertinggi dapat tercapai.

XI.2. Perawatan Generator

Sebelum terbentuk sebuah program perawatan yang handal, maka langkah-langkah *komprehensif maintenance* harus dilakukan terlebih dahulu. Generator uap terdiri dari berbagai komponen yang harus dapat bekerja sama. Karena itu, kerusakan salah satu komponen dapat berakibat kecil atau besar terhadap komponen-komponen lain yang pada akhirnya akan mengganggu kerja generator secara keseluruhan.

Pada dasarnya, dalam teori perawatan ada 3 hal pokok yang penting , yaitu :

1. *Preventive Maintenance* (pencegahan)
2. *Repressive Maintenance* (mengatasi gangguan)
3. *Prediktive Maintenance* (perkiraan terhadap kerusakan)

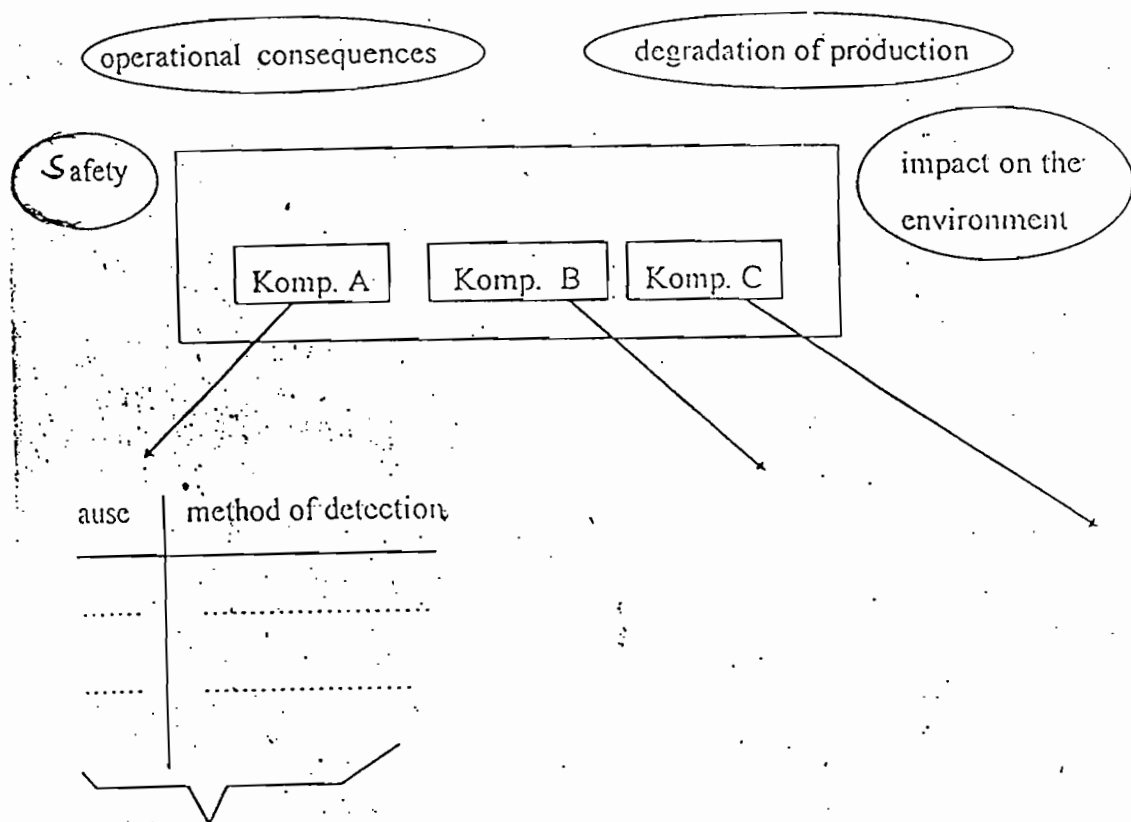
Oleh karena itu, langkah pertama yang harus dilakukan adalah mengerti dan memahami permasalahan dari komponen-komponen generator sehingga dapat memperhitungkan dan mengembangkan respon atau tindakan yang semestinya dilakukan.

Secara sistematis, hal itu dapat dilakukan dengan membuat *Failure Mode Evaluation Chart* (FMEC) yang berisi mode kerusakan atau degradasi untuk masing-masing komponen berdasarkan efeknya terhadap :

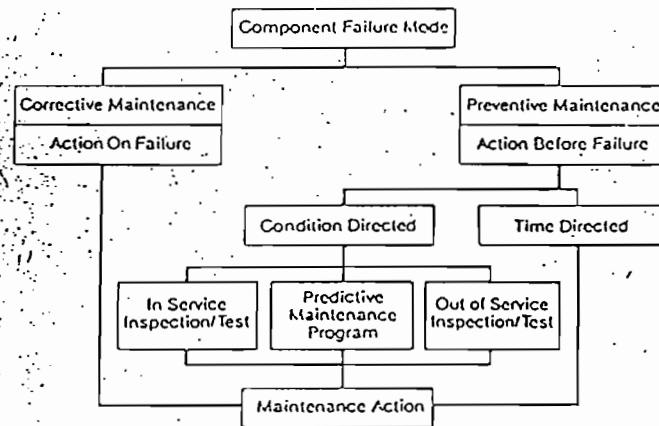
- a. Kemanan (*Safety*)
- b. Konsekuensi dari perawatan (*Operational Consequence*)
- c. Penurunan hasil produksi (*Degradation of Production*) dan

d. Akibatnya terhadap lingkungan (*Impact on The Environment*)

Uraian tersebut dibuat sejalan dengan kemungkinan penyebabnya serta cara mendeteksinya. Bila unit / sistem tersebut terkait dengan keseluruhan rencana, maka dibuat juga daftar efek kerusakan terhadap sistem serta keseluruhan rencana.



Gambar 11.1. Failure Mode Evaluation Chart (FMEC)

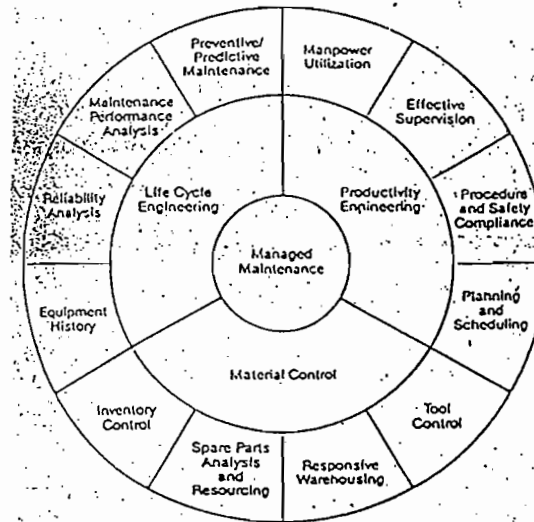


Gambar 11.2. *Component Failure Mode (CFM)*.

Dari uraian yang telah terbentuk, maka dapat disusun kegiatan-kegiatan apa yang dapat dilakukan untuk mengantisipasi maupun mengatasinya, dan ini disebut tabel sistematis yaitu *Potential Maintenance Action Tables (PMAT)*. Tindakan / kegiatan tersebut dapat bersifat *pro – active* dan dapat pula bersifat *reactive response*. Hal ini disebut *Component Failure Mode (CFM)*.

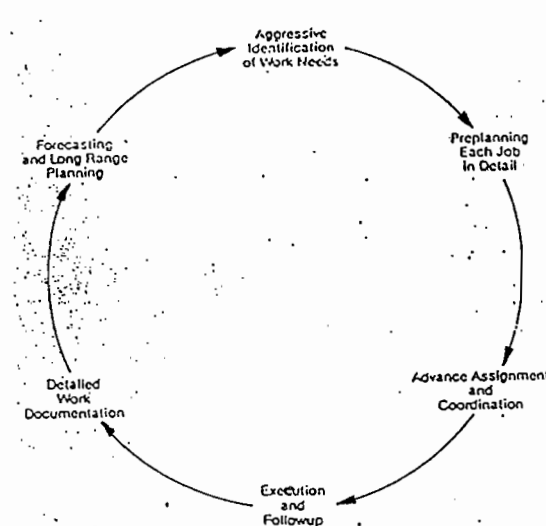
Setelah langkah-langkah awal di atas, maka perawatan dapat dilanjutkan ke *preventive maintenance procedures*, yaitu kegiatan yang dilakukan untuk menghindari atau meminimumkan kemungkinan kerusakan (*failure*). Tindakan pencegahan dapat mengacu pada *Time – Directed* atau *Condition – Directed*. *Time – Directed* adalah tindakan perawatan yang dilakukan terhadap suatu komponen atau sistem dengan dasar karena 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 pergantian (*replacement*).



Gambar 11.3. Managed Maintenance

Untuk dapat mempertahankan segala sesuatu yang sudah lancar setiap saat dan memperbaiki hal-hal yang sekiranya perlu diperbaiki / diperlancar, maka aturan aliran proses dalam proses perawatan dapat digunakan sebagai berikut :



Gambar 11.4. Aliran Proses Perawatan

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* (rencana atau saat generator uap 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 terlihat dari analisa *vibrasi*. Jadi semuanya itu berdasarkan *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 pengaturan program terlibat pada pengontrolan dan pengukuran efektivitas, karena tindakan tersebut melibatkan tiga elemen, yakni : material, personel maupun teknologi yang juga melibatkan biaya. Suatu organisasi perawatan harus mampu untuk mengidentifikasi, merencanakan, mengorganisasi, memilih serta mengontrol kombinasi yang tepat dari ketiga elemen tersebut. Dapat digambarkan disini, suatu perawatan 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 (generator uap lokomotif).
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 and Wilcox*, yaitu :

Area of implementation	Range of Improvement
- Availability	0,5 – 5 %
- Produktivitas kerja	25 – 100 %
- Overtime	Reduced to < 5 %
- Cost of maintenance	Reduced by 10 – 40 %

Bila MMP ini selalu dilaksanakan, maka jadilah *Routine Maintenance*.

Secara garis besar, perawatan rutin 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 diperhatikan seperti dibawah ini :

1. Perawatan pada saat generator uap lokomotif beroperasi :

Bidang Keamanan (*Safety*) :

- Furnace and Setting, untuk mencegah explosion furnace :

- a. Prosedur pengoperasian terbaru dan pelatihan pengoperasian
 - 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 berlebihan (*overheating*):
 - a. Pengecekan relief katup tekanan
 - b. Pengecekan alat penunjuk batas air.
 - c. Pengawasan dan perawatan *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. Tekanan air dan uap
 - b. *Differential pressure furnace*
- *Maintaining for efficiency*, dengan memperhatikan *losses* yang terjadi :

- * Observasi *dry gas losses* dengan dua parameter temperatur dan berat gas keluar dari cerobong.
- 2. Perawatan pada saat generator uap lokomotif tidak beroperasi :
 - Pembersihan dan inspeksi internal untuk unit tekanan rendah :
 - a. Inspeksi kebocoran drum
 - b. Inspeksi keretakan
 - Pembersihan dan inspeksi internal untuk unit tekanan tinggi :
 - a. Inspeksi dan pembersihan deposit
 - b. Keretakan dan kebocoran
 - Pembersihan luar, dapat dilakukan dengan :
 - a. Pembersihan akumulasi abu
 - b. Skala pada bagian luar
 - Inspeksi luar dilakukan terutama pada :
 - a. Pipa terhadap *overheating*
 - b. Pipa terhadap erosi dan korosi
 - c. Pipa terhadap *misalignment*
 - d. Pipa terhadap *slagging* atau *fouling deposit*
 - e. Preparasi bahan bakar dan peralatan pembakaran
 - f. *Refractory*
 - g. *Flues, ducts, dampers* serta *windboxes*
 - h. Isolasi dan *casing*
 - i. Alat perlengkapan dan alat kontrol
 - Perbaikan (*repair*) untuk *pressure parts* :

- a. Perbaikan dengan pengelasan
- b. Pergantian bagian pipa
- c. Bagian yang dilas
- Perbaikan (*repair*) untuk *non pressure parts* :
 - a. *Pulverizer maintenance*
 - b. *Air heater maintenance*
 - c. *Sootblowers*
 - d. *Rotating machinery*

Semua harus dilakukan dengan prosedur keamanan dan mengutamakan keselamatan kerja.

BAB XII

KESIMPULAN DAN PENUTUP

XII. 1. Kesimpulan

Setelah melakukan perhitungan pada bab-bab sebelumnya, didapat dimensi dari generator uap hasil perancangan adalah sebagai berikut :

- Silinder Generator :

Bahan	: SA 515 70
Diameter dalam	: 78,732 in = 1999,79 mm
Diameter luar	: 81,468 in = 2069,29 mm
Panjang	: 246,063 in = 6250 mm
Tebal Silinder	: 1,368 in = 34,75 mm
Tebal Isolasi	: 3 in = 76,2 mm
Tebal Plat Penutup	: 0,1 in = 2,54 mm

- Kotak Api :

Bahan	: SA 515 70 (Baja anti korosi)
Sisi kotak api	: 59,06 in = 1500 mm

- Pipa-pipa Api :

Bahan	: SA 210 C
Diameter dalam	: 2,067 in = 52,502 mm
Diameter luar	: 2,375 in = 60,325 mm
Jumlah pipa	: 140 pipa
Panjang	: 177,165 in = 4500 mm
Tebal	: 0,154 in = 3,9116 mm

- Superheater :

Bahan : SA 210 C

Diameter dalam : 2,067 in = 52,502 mm

Diameter luar : 2,375 in = 60,325 mm

Panjang pipa : 8605,6 mm

Tebal : 0,154 in

- Pipa uap jenuh :

Diameter dalam : 4,026 in = 102,26 mm

Diameter luar : 4,5 in = 114,3 mm

- Cerobong asap :

Tinggi : 6 ft = 1828,8 mm

Diameter : 3 ft = 914,4 mm

Bahan : SA 515 70

- Penahan (*Stay*) :

Diameter : 2 in = 50,8 mm

- Data teknis lain :

Kapasitas Generator : 25 ton / jam

Tekanan kerja : 16 Barg = 246,59 Psia

Bahan bakar : batubara

Temperatur air masuk : 180 °F

Temperatur uap panas lanjut : 572 °F = 300 °C

Efisiensi : 77 %

XII. 2. Penutup

Dalam perancangan generator uap lokomotif ini, efisiensi generator sangat tergantung pada pemanfaatan panas yang terbawa oleh gas asap sebelum keluar dari cerobong asap. Efisiensi akan tinggi apabila temperatur gas asap keluar cerobong cukup rendah, dalam arti bahwa panas yang dibawa gas asap sebagian besar terpakai pada proses pembentukan uap sehingga tidak banyak terbuang.

Pada perancangan ini, efisiensi cukup rendah karena tekanan kerja cukup tinggi sehingga berpengaruh pada tingginya temperatur titik didih air. Karena temperatur titik didih air yang tinggi maka temperatur uap yang akan dipakai untuk menggerakkan torak harus lebih tinggi supaya uap tidak berubah wujud menjadi air kembali.

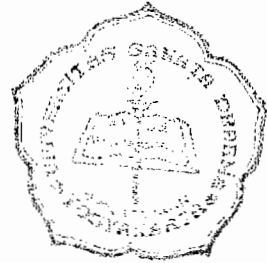
Selain itu, kesulitan yang dialami pada perancangan generator uap lokomotif ini dipengaruhi oleh perancangan cerobong asap. Perancangan cerobong asap pada generator uap lokomotif tidak dapat setinggi mungkin dan terbatas pada ketinggian kira-kira 2 m. Hal ini menyebabkan temperatur gas asap keluar cerobong yang diharapkan dapat serendah mungkin (mendekati suhu lingkungan) tidak dapat terealisasi, sebab uap yang telah dihasilkan pada dom uap harus dipanaskan lagi pada superheater untuk menjaga suhu uap di atas titik didih air.

DAFTAR PUSTAKA

- Ashton, M., 1961, *Boiler Efficiency and Safety*, The Mac Millan Press LTD, London and Basing Stroke.
- Babcock and Wilcox, 1972, *Steam / It's Generation and Use*, Babcock and Wilcox Company, New York.
- Djokosetyardjo, M. J., 1987, *Ketel Uap*, P. T Pradnya Paramita, Jakarta.
- Gaffet, G. A., ScD., 1952, *Steam Power Operation*, New York.
- Harjanto, G., 1980, *Pesawat Pendingin Pemanas*, Pusat Penerbitan, FT UGM, Yogyakarta.
- Holman, J. P., 1984, *Perpindahan Kalor*, Alih Bahasa E. Jasfi, Erlangga, Jakarta.
- King, R. C., *Piping Handbook*, Mc Grawhill Book Company, New York.
- Lorenzi, O. D., 1949, *Combustion Engineering*, Combustion Engineering Superheater Inc, New York.
- Nainggolan, W. S., 1987, *Teori dan Soal Penyelesaian Thermodinamika*, Amriko, Bandung.
- Nieman, G., *Elemen Mesin dan Kalkulasi*, Alih Bahasa Anton Budiman dan Bambang Priambodo, Jakarta.
- Pitts, D. R., 1987, *Teori dan Soal Perpindahan Kalor*, Alih Bahasa E. Jasfi, Erlangga, Jakarta.
- Shield, C. D., 1972, *Boiler Type Characteristic and Function*, Mc Grawhill Book
- Sontowiro, P. M., 1984, *Pembangkit Uap*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Subarky B. M., 1985, *Ketel Uap "Pesawat Tenaga Uap I"*, P.T. Mutiara, Solo.

Wakil, E., 1992, *Instalasi Pembangkit Daya I*, Jakarta.

Woodruff, E.B., Lammers, H. B., 1977, *Steam - Plant Operation*, Mc Grawhill
Book Company, New York.



LAMPIRAN

Tabel 3. Sifat-sifat uap panas lanjut (tekanan)

Abs press. lb/sq in. (sat. temp)		Temperature, F														
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
1 (101.74)	v	0.0161	392.5	452.3	511.9	571.5	631.1	690.7								
	h	68.00	1150.2	1195.7	1241.8	1288.6	1336.1	1384.5								
	s	0.1295	2.0509	2.1152	2.1722	2.2237	2.2708	2.3144								
5 (162.24)	v	0.0161	78.14	90.24	102.24	114.21	126.15	138.08	150.01	161.94	173.86	185.78	197.70	209.62	221.53	233.45
	h	68.01	1148.6	1194.8	1241.3	1288.2	1335.9	1384.3	1433.6	1483.7	1534.7	1586.7	1639.6	1693.3	1748.0	1803.5
	s	0.1295	1.8716	1.9369	1.9943	2.0460	2.0932	2.1369	2.1776	2.2159	2.2521	2.2866	2.3194	2.3509	2.3811	2.4101
10 (193.21)	v	0.0161	38.84	44.98	51.03	57.04	63.03	69.00	74.98	80.94	86.91	92.87	98.84	104.80	110.76	116.72
	h	68.02	1146.6	1193.7	1240.6	1287.8	1335.5	1384.0	1433.4	1483.5	1534.6	1586.6	1639.5	1693.3	1747.9	1803.4
	s	0.1295	1.7928	1.8593	1.9173	1.9692	2.0166	2.0603	2.1011	2.1394	2.1757	2.2101	2.2430	2.2744	2.3046	2.3337
15 (213.03)	v	0.0161	0.0166	29.899	33.963	37.985	41.986	45.978	49.964	53.946	57.926	61.905	65.882	69.858	73.833	77.807
	h	68.04	168.09	1192.5	1239.9	1287.3	1335.2	1383.8	1433.2	1483.4	1534.5	1586.5	1639.4	1693.2	1747.8	1803.4
	s	0.1295	0.2940	1.8134	1.8720	1.9242	1.9717	2.0155	2.0563	2.0946	2.1309	2.1653	2.1982	2.2297	2.2599	2.2890
20 (227.96)	v	0.0161	0.0166	22.356	25.428	28.457	31.466	34.465	37.458	40.447	43.435	46.420	49.405	52.388	55.370	58.352
	h	68.05	168.11	1191.4	1239.2	1286.9	1334.9	1383.5	1432.9	1483.2	1534.3	1586.3	1639.3	1693.1	1747.8	1803.3
	s	0.1295	0.2940	1.7805	1.8397	1.8921	1.9397	1.9836	2.0244	2.0628	2.0991	2.1336	2.1665	2.1979	2.2282	2.2572
40 (267.25)	v	0.0161	0.0166	11.036	12.624	14.165	15.685	17.195	18.699	20.199	21.697	23.194	24.689	26.183	27.676	29.168
	h	68.10	168.15	1186.6	1236.4	1285.0	1333.6	1382.5	1432.1	1482.5	1533.7	1585.8	1638.8	1692.7	1747.5	1803.0
	s	0.1295	0.2940	1.6992	1.7608	1.8143	1.8624	1.9065	1.9476	1.9860	2.0224	2.0569	2.0899	2.1224	2.1516	2.1807
60 (292.71)	v	0.0161	0.0166	7.257	8.354	9.400	10.425	11.438	12.446	13.450	14.452	15.452	16.450	17.448	18.445	19.441
	h	68.15	168.20	1181.6	1233.5	1283.2	1332.3	1381.5	1431.3	1481.8	1533.2	1585.3	1638.4	1692.4	1747.1	1802.8
	s	0.1295	0.2939	1.6492	1.7134	1.7681	1.8168	1.8612	1.9024	1.9410	1.9774	2.0120	2.0450	2.0765	2.1068	2.1359
80 (312.04)	v	0.0161	0.0166	0.0175	6.218	7.018	7.794	8.560	9.319	10.075	10.829	11.581	12.331	13.081	13.829	14.577
	h	68.21	168.24	269.74	1230.5	1281.3	1330.9	1380.5	1430.5	1481.1	1532.6	1584.9	1638.0	1692.0	1746.8	1802.5
	s	0.1295	0.2939	0.4371	1.6790	1.7349	1.7842	1.8289	1.8702	1.9089	1.9454	1.9800	2.0131	2.0446	2.0750	2.1041
100 (327.82)	v	0.0161	0.0166	0.0175	4.935	5.588	6.216	6.833	7.443	8.050	8.655	9.258	9.860	10.460	11.060	11.659
	h	68.26	168.29	269.77	1227.4	1279.3	1329.6	1379.5	1429.7	1480.4	1532.0	1584.4	1637.6	1691.6	1746.5	1802.2
	s	0.1295	0.2939	0.4371	1.6516	1.7088	1.7586	1.8036	1.8451	1.8839	1.9205	1.9552	1.9883	2.0199	2.0502	2.0794
120 (341.27)	v	0.0161	0.0166	0.0175	4.0786	4.6341	5.1637	5.6831	6.1928	6.7006	7.2060	7.7096	8.2119	8.7130	9.2134	9.7130
	h	68.31	168.33	269.81	1224.1	1277.4	1328.1	1378.4	1428.8	1479.8	1531.4	1583.9	1637.1	1691.3	1746.2	1802.0
	s	0.1295	0.2939	0.4371	1.6286	1.6872	1.7376	1.7829	1.8246	1.8635	1.9001	1.9349	1.9680	1.9996	2.0300	2.0592
140 (353.04)	v	0.0161	0.0166	0.0175	3.4661	3.9526	4.4119	4.8585	5.2995	5.7364	6.1709	6.6036	7.0349	7.4652	7.8946	8.3233
	h	68.37	168.38	269.85	1220.8	1275.3	1326.8	1377.4	1428.0	1479.1	1530.8	1583.4	1636.7	1690.9	1745.9	1801.7
	s	0.1295	0.2939	0.4370	1.6085	1.6686	1.7196	1.7652	1.8071	1.8461	1.8828	1.9176	1.9508	1.9825	2.0129	2.0421
160 (363.55)	v	0.0161	0.0166	0.0175	3.0060	3.4413	3.8480	4.2420	4.6295	5.0132	5.3945	5.7741	6.1522	6.5293	6.9055	7.2811
	h	68.42	168.42	269.89	1217.4	1273.3	1325.4	1376.4	1427.2	1478.4	1530.3	1582.9	1636.3	1690.5	1745.6	1801.4
	s	0.1294	0.2938	0.4370	1.5906	1.6522	1.7039	1.7499	1.7919	1.8310	1.8678	1.9027	1.9359	1.9676	1.9980	2.0273
180 (373.08)	v	0.0161	0.0166	0.0174	2.6474	3.0433	3.4093	3.7621	4.1084	4.4505	4.7907	5.1289	5.4657	5.8014	6.1363	6.4704
	h	68.47	168.47	269.92	1213.8	1271.2	1324.0	1375.3	1426.3	1477.7	1529.7	1582.4	1635.9	1690.2	1745.3	1801.2
	s	0.1294	0.2938	0.4370	1.5743	1.6376	1.6900	1.7362	1.7784	1.8176	1.8545	1.8894	1.9227	1.9545	1.9849	2.0142
200 (381.80)	v	0.0161	0.0166	0.0174	2.3598	2.7247	3.0583	3.3783	3.6915	4.0008	4.3077	4.6128	4.9165	5.2191	5.5209	5.8219
	h	68.52	168.51	269.96	1210.1	1269.0	1322.6	1374.3	1425.5	1477.0	1529.1	1581.9	1635.4	1689.8	1745.0	1800.9
	s	0.1294	0.2938	0.4369	1.5593	1.6242	1.6776	1.7239	1.7663	1.8057	1.8426	1.8776	1.9109	1.9427	1.9732	2.0025
250 (400.97)	v	0.0161	0.0166	0.0174	0.0186	2.1504	2.4662	2.6872	2.9410	3.1909	3.4382	3.6837	3.9278	4.1709	4.4131	4.6546
	h	68.66	168.63	270.05	375.10	1263.5	1319.0	1371.6	1423.4	1475.3	1527.6	1580.6	1634.4	1688.9	1744.2	1800.2
	s	0.1294	0.2937	0.4368	0.5667	1.5951	1.6502	1.6976	1.7405	1.7801	1.8173	1.8524	1.8858	1.9177	1.9482	1.9776
300 (417.35)	v	0.0161	0.0166	0.0174	0.0186	1.7665	2.0044	2.2263	2.4407	2.6509	2.8585	3.0643	3.2688	3.4721	3.6746	3.8764
	h	68.79	168.74	270.14	375.15	1257.7	1315.2	1368.9	1421.3	1473.6	1526.2	1579.4	1633.3	1688.0	1743.4	1799.6
	s	0.1294	0.2937	0.4307	0.5665	1.5703	1.6274	1.6758	1.7192	1.7591	1.7964	1.8317	1.8652	1.8972	1.9278	1.9572
350 (431.73)	v	0.0161	0.0166	0.0174	0.0186	1.4913	1.7028	1.8970	2.0832	2.2652	2.4445	2.6219	2.7980	2.9730	3.1471	3.3205
	h	68.92	168.85	270.24	375.21	1251.5	1311.4	1366.2	1419.2	1471.8	1524.7	1578.2	1632.3	1687.1	1742.6	1798.9
	s	0.1293	0.2936	0.4367	0.5664	1.5483	1.6077	1.6571	1.7009	1.7411	1.7787	1.8141	1.8477	1.8798	1.9105	1.9400
400 (444.60)	v	0.0161	0.0166	0.0174	0.0162	1.2841	1.4763	1.6499	1.8151	1.9759	2.1339	2.2901	2.4450	2.5987	2.7515	2.9037
	h	69.05	168.97	270.33	375.27	1245.1	1307.4	1363.4	1417.0	1470.1	1523.3	1576.9	1631.2	1686.2	1741.9	1798.2
	s	0.1293	0.2935	0.4366	0.5663	1.5282	1.5901	1.6406	1.6850	1.7255	1.7632	1.7988	1.8325	1.8647	1.8955	1.9250
500 (467.01)	v	0.0161	0.0166	0.0174	0.0186	0.9919	1.1584	1.3037	1.4397	1.5708	1.6992	1.8256	1.9507	2.0746	2.1977	2.3200
	h	69.32	169.19	270.51	375.38	1231.2	1299.1	1357.7	1412.7	1466.6	1520.3	1574.4	1629.1	1684.4	1740.3	1796.9
	s	0.1292	0.2934	0.4364	0.5660	1.4921	1.5595	1.6123	1.6578	1.6990	1.7371	1.7730	1.8069	1.8393	1.8702	1.8998

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 2-6)

Tabel 4. Sifat-sifat uap jenuh (temperatur)

Temp F	Press. psia	Volume, ft ³ /lb			Enthalpy, Btu/lb			Entropy, Btu/lb, F			Temp F
		Water v_f	Evap v_{fg}	Steam v_g	Water h_f	Evap h_{fg}	Steam h_g	Water s_f	Evap s_{fg}	Steam s_g	
32	0.08859	0.01602	3305	3305	-0.02	1075.5	1075.5	0.0000	2.1873	2.1873	32
35	0.09991	0.01602	2948	2948	3.00	1073.8	1076.8	0.0061	2.1706	2.1767	35
40	0.12163	0.01602	2446	2446	8.03	1071.0	1079.0	0.0162	2.1432	2.1594	40
45	0.14744	0.01602	2037.7	2037.3	13.04	1068.1	1081.2	0.0262	2.1164	2.1426	45
50	0.17796	0.01602	1704.8	1704.8	18.05	1065.3	1083.4	0.0361	2.0901	2.1262	50
60	0.2561	0.01603	1207.6	1207.6	28.06	1059.7	1087.7	0.0555	2.0391	2.0946	60
70	0.3629	0.01605	868.3	868.4	38.05	1054.0	1092.1	0.0745	1.9900	2.0645	70
80	0.5068	0.01607	633.3	633.3	48.04	1048.4	1096.4	0.0932	1.9426	2.0359	80
90	0.6981	0.01610	468.1	468.1	58.02	1042.7	1100.8	0.1115	1.8970	2.0086	90
100	0.9492	0.01613	350.4	350.4	68.00	1037.1	1105.1	0.1295	1.8530	1.9825	100
110	1.2750	0.01617	265.4	265.4	77.98	1031.4	1109.3	0.1472	1.8105	1.9577	110
120	1.6927	0.01620	203.25	203.26	87.97	1025.6	1113.6	0.1646	1.7693	1.9339	120
130	2.2230	0.01625	157.32	157.33	97.96	1019.8	1117.8	0.1817	1.7295	1.9112	130
140	2.8892	0.01629	122.98	123.00	107.95	1014.0	1122.0	0.1985	1.6910	1.8895	140
150	3.718	0.01634	97.05	97.07	117.95	1008.2	1126.1	0.2150	1.6536	1.8686	150
160	4.741	0.01640	77.27	77.29	127.96	1002.2	1130.2	0.2313	1.6174	1.8487	160
170	5.993	0.01645	62.04	62.06	137.97	996.2	1134.2	0.2473	1.5822	1.8295	170
180	7.511	0.01651	50.21	50.22	148.00	990.2	1138.2	0.2631	1.5480	1.8111	180
190	9.340	0.01657	40.94	40.96	158.04	984.1	1142.1	0.2787	1.5148	1.7934	190
200	11.526	0.01664	33.62	33.64	168.09	977.9	1146.0	0.2940	1.4824	1.7764	200
210	14.123	0.01671	27.80	27.82	178.15	971.6	1149.7	0.3091	1.4509	1.7600	210
212	14.696	0.01672	26.78	26.80	180.17	970.3	1150.5	0.3121	1.4447	1.7568	212
220	17.186	0.01678	23.13	23.15	188.23	965.2	1153.4	0.3241	1.4201	1.7442	220
230	20.779	0.01685	19.364	19.381	198.33	958.7	1157.1	0.3388	1.3902	1.7290	230
240	24.968	0.01695	16.304	16.321	208.45	952.1	1160.6	0.3533	1.3609	1.7142	240
250	29.825	0.01701	13.802	13.819	218.59	945.4	1164.0	0.3677	1.3323	1.7000	250
260	35.427	0.01709	11.745	11.762	228.76	938.6	1167.4	0.3819	1.3043	1.6862	260
270	41.856	0.01718	10.042	10.060	238.95	931.7	1170.6	0.3960	1.2769	1.6729	270
280	49.200	0.01726	8.627	8.644	249.17	924.6	1173.8	0.4098	1.2501	1.6599	280
290	57.550	0.01736	7.443	7.460	259.4	917.4	1176.8	0.4236	1.2238	1.6473	290
300	67.005	0.01745	6.448	6.466	269.7	910.0	1179.7	0.4372	1.1979	1.6351	300
310	77.67	0.01755	5.609	5.626	280.0	902.5	1182.5	0.4506	1.1726	1.6232	310
320	89.64	0.01766	4.896	4.914	290.4	894.8	1185.2	0.4640	1.1477	1.6116	320
340	117.99	0.01787	3.770	3.788	311.3	878.8	1190.1	0.4902	1.0990	1.5892	340
360	153.01	0.01811	2.939	2.957	332.3	862.1	1194.4	0.5161	1.0517	1.5678	360
380	195.73	0.01836	2.317	2.335	353.6	844.5	1198.0	0.5416	1.0057	1.5473	380
400	247.26	0.01864	1.8444	1.8630	375.1	825.9	1201.0	0.5667	0.9607	1.5274	400
420	308.78	0.01894	1.4808	1.4997	396.9	806.2	1203.1	0.5915	0.9165	1.5080	420
440	381.54	0.01926	1.1976	1.2169	419.0	785.4	1204.4	0.6161	0.8729	1.4890	440
460	466.9	0.0196	0.9746	0.9942	441.5	763.2	1204.8	0.6405	0.8299	1.4704	460
480	566.2	0.0200	0.7972	0.8172	464.5	739.6	1204.1	0.6648	0.7871	1.4518	480
500	680.9	0.0204	0.6545	0.6749	487.9	714.3	1202.2	0.6890	0.7443	1.4333	500
520	812.5	0.0209	0.5386	0.5596	512.0	687.0	1199.0	0.7133	0.7013	1.4146	520
540	962.8	0.0215	0.4437	0.4651	536.8	657.5	1194.3	0.7378	0.6577	1.3954	540
560	1133.4	0.0221	0.3651	0.3871	562.4	625.3	1187.7	0.7625	0.6132	1.3757	560
580	1326.2	0.0228	0.2994	0.3222	589.1	589.9	1179.0	0.7876	0.5673	1.3550	580
600	1543.2	0.0236	0.2438	0.2675	617.1	550.6	1167.7	0.8134	0.5196	1.3330	600
620	1786.9	0.0247	0.1962	0.2203	646.9	506.3	1153.2	0.8403	0.4689	1.3092	620
640	2059.9	0.0260	0.1543	0.1802	679.1	454.6	1133.7	0.8686	0.4134	1.2821	640
660	2365.7	0.0277	0.1166	0.1443	714.9	392.1	1107.0	0.8995	0.3502	1.2498	660
680	2708.6	0.0304	0.0803	0.1112	758.5	310.1	1068.5	0.9365	0.2720	1.2086	680
700	3094.3	0.0366	0.0386	0.0752	822.4	172.7	995.2	0.9901	0.1490	1.1390	700
705.5	3203.2	0.0508	0	0.0508	906.0	0	906.0	1.0612	0	1.0612	705.5

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 2-3)

Tabel 5. Entalpi Gas

T, R	CO		CO ₂		H ₂		H ₂ O		N ₂		T, R
	$\bar{h}$	$\bar{\phi}$	$\bar{h}$	$\bar{\phi}$	$\bar{h}$	$\bar{\phi}$	$\bar{h}$	$\bar{\phi}$	$\bar{h}$	$\bar{\phi}$	
300	2074.1	43.142	2110.7	46.404	2036.8	27.280	2372.3	40.470	2073.4	41.698	300
400	2775.5	45.160	2872.4	48.590	2706.2	29.205	3167.0	42.757	2774.8	43.716	400
500	3472.6	46.716	3704.5	50.444	3388.0	30.726	3964.3	44.535	3472.2	45.272	500
536.67	3727.9	47.209	4025.8	51.064	3640.2	31.212	4258.0	45.102	3727.4	45.765	536.67
600	4168.8	47.985	4599.5	52.074	4077.8	31.983	4767.4	45.999	4168.1	46.541	600
700	4866.9	49.061	5350.3	53.539	4772.5	33.054	5578.9	47.250	4864.8	47.615	700
800	5569.2	49.999	6051.1	54.874	5469.9	33.985	6401.1	48.348	5561.4	48.549	800
900	6277.5	50.833	6796.3	56.105	6168.8	34.808	7235.7	49.331	6268.4	49.378	900
1000	6993.3	51.587	7596.3	57.248	6868.4	35.545	8083.9	50.224	6978.3	50.126	1000
1100	7717.7	52.278	8401.7	58.315	7568.5	36.213	8946.8	51.047	7695.2	50.810	1100
1200	8451.4	52.916	9254.1	59.318	8269.6	36.823	9825.0	51.811	8420.2	51.440	1200
1300	9194.7	53.511	10135.2	60.263	8972.2	37.385	10719.0	52.526	9153.7	52.027	1300
1400	9947.9	54.069	11034.3	61.158	9677.0	37.907	11629.3	53.201	9896.2	52.578	1400
1600	11482.8	55.094	12824.6	62.814	11096.3	38.855	13499.2	54.449	11408.3	53.587	1600
1800	13052.4	56.018	14834.8	64.322	12531.1	39.700	15436.2	55.589	12954.5	54.497	1800
2000	14651.7	56.860	17007.9	65.703	13984.3	40.465	17441.0	56.645	14530.7	55.327	2000
2200	16276.9	57.635	19384.9	66.979	15458.4	41.168	19513.6	57.632	16134.4	56.092	2200
2400	17924.1	58.351	21906.7	68.163	16954.6	41.819	21649.5	58.561	17761.7	56.800	2400
2600	19590.3	59.018	24565.8	69.267	18473.6	42.426	23844.0	59.439	19409.2	57.459	2600
2800	21272.7	59.641	27355.9	70.301	20015.6	42.998	26093.0	60.273	21073.9	58.076	2800
3000	22968.9	60.226	30272.1	71.272	21580.3	43.537	28392.2	61.066	22753.4	58.655	3000
3200	24677.1	60.778	33310.3	72.188	23167.3	44.050	30737.7	61.823	24445.8	59.201	3200
3400	26395.5	61.298	36467.4	73.054	24775.6	44.537	33125.6	62.546	26149.3	59.717	3400
3600	28122.9	61.792	39741.0	73.875	26404.2	45.002	35552.3	63.240	27862.6	60.207	3600
3800	29858.2	62.261	43129.5	74.656	28051.8	45.448	38014.5	63.905	29584.7	60.673	3800
4000	31600.5	62.708	46731.4	75.400	29717.2	45.875	40509.0	64.545	31314.5	61.116	4000
4200	33349.1	63.135	50460.0	76.111	31399.1	46.285	43033.0	65.161	33051.5	61.540	4200
4400	35103.4	63.543	54322.2	76.792	33096.5	46.680	45583.6	65.754	34794.9	61.945	4400
4600	36862.9	63.934	57909.4	77.445	34808.3	47.060	48158.7	66.326	36544.2	62.334	4600
4800	38627.3	64.309	60856.5	78.072	36533.8	47.428	50756.0	66.879	38298.9	62.708	4800
5000	40396.0	64.670	63812.5	78.675	38272.6	47.783	53373.8	67.413	40058.3	63.067	5000

T, R	O ₂		H		N		O		NO		T, R
	$\bar{h}$	$\bar{\phi}$	$\bar{h}$	$\bar{\phi}$	$\bar{h}$	$\bar{\phi}$	$\bar{h}$	$\bar{\phi}$	$\bar{h}$	$\bar{\phi}$	
300	2080.9	44.939	1489.4	24.512	1489.4	33.728	1628.8	35.359	2253.3	46.160	300
400	2778.6	46.946	1985.8	25.940	1985.8	35.156	2168.8	36.914	2976.2	48.240	400
500	3476.2	48.503	2482.2	27.048	2482.2	36.264	2698.9	38.097	3690.7	49.835	500
536.67	3733.0	48.999	2664.2	27.399	2664.2	36.615	2891.2	38.468	3951.8	50.339	536.67
600	4178.8	49.784	2978.6	27.953	2978.6	37.169	3221.2	39.049	4402.7	51.133	600
700	4890.3	50.880	3475.1	28.719	3475.1	37.934	3737.7	39.846	5116.5	52.233	700
800	5613.1	51.845	3971.6	29.382	3971.6	38.597	4249.8	40.529	5835.4	53.193	800
900	6348.8	52.712	4468.1	29.966	4468.1	39.182	4758.7	41.129	6561.9	54.048	900
1000	7097.9	53.501	4964.5	30.489	4964.5	39.705	5265.3	41.663	7297.3	54.823	1000
1100	7860.4	54.227	5461.0	30.963	5461.0	40.178	5770.1	42.144	8042.4	55.533	1100
1200	8635.6	54.902	5957.5	31.395	5957.5	40.610	6273.8	42.582	8797.6	56.190	1200
1300	9422.4	55.532	6453.9	31.792	6453.9	41.008	6776.5	42.984	9562.7	56.803	1300
1400	10219.8	56.122	6950.4	32.160	6950.4	41.375	7278.4	43.356	10337.2	57.377	1400
1600	11841.3	57.205	7943.3	32.823	7943.3	42.038	8280.1	44.025	11912.6	58.428	1600
1800	13492.9	58.177	8936.3	33.408	8936.3	42.623	9279.9	44.614	13520.7	59.375	1800
2000	15170.2	59.061	9929.4	33.931	9929.4	43.146	10278.6	45.140	15157.0	60.237	2000
2200	16867.7	59.870	10922.2	34.404	10922.2	43.619	11276.0	45.615	16816.6	61.028	2200
2400	18583.0	60.616	11914.9	34.836	11914.9	44.051	12272.6	46.049	18495.9	61.758	2400
2600	20314.3	61.309	12907.5	35.233	12907.5	44.449	13268.5	46.448	20191.6	62.437	2600
2800	22060.2	61.956	13900.3	35.601	13901.2	44.817	14264.0	46.816	21901.1	63.070	2800
3000	23819.7	62.563	14893.1	35.943	14894.1	45.159	15259.4	47.160	23622.3	63.664	3000
3200	25592.0	63.134	15886.1	36.264	15887.1	45.480	16254.6	47.481	25353.3	64.223	3200
3400	27376.7	63.675	16879.1	36.565	16880.0	45.781	17249.9	47.783	27092.8	64.750	3400
3600	29173.5	64.189	17872.3	36.849	17873.0	46.064	18245.2	48.067	28839.6	65.249	3600
3800	30982.2	64.678	18865.4	37.117	18866.1	46.333	19240.5	48.336	30593.0	65.723	3800
4000	32802.7	65.145	19858.5	37.372	19859.4	46.588	20235.9	48.592	32352.3	66.174	4000
4200	34635.1	65.592	20851.5	37.614	20853.1	46.830	21231.5	48.834	34117.0	66.605	4200
4400	36479.4	66.021	21844.4	37.845	21847.3	47.061	22227.3	49.066	35886.7	67.016	4400
4600	38335.4	66.433	22837.2	38.066	22842.2	47.283	23223.5	49.287	37661.0	67.411	4600
4800	40203.0	66.831	23829.9	38.277	23838.0	47.494	24220.2	49.500	39439.6	67.789	4800
5000	42081.8	67.214	24822.6	38.479	24835.1	47.698	25217.7	49.703	41222.0	68.153	5000

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 3-7)

Tabel 6. Emisivitas Bahan

Surface	t, deg F*	Emissivity	Reference number
Oxidized surfaces			
Iron plate, pickled, then rusted red	68	0.61	25
Iron plate, completely rusted.....	67	0.60	25
Iron, dark gray surface.....	212	0.31	1
Rolled sheet steel.....	70	0.66	25
Oxidized iron.....	212	0.74	28
Cast iron, oxidized at 1100°F.....	390-1110	0.64-0.78	23
Steel, oxidized at 1100°F.....	390-1110	0.79	23
Smooth oxidized electrolytic iron.....	260-980	0.78-0.82	26
Iron oxide.....	930-2190	0.85-0.89	6
Rough ingot iron.....	1700-2040	0.87-0.95	22
Sheet steel			
Strong, rough oxide layer.....	75	0.80	25
Dense, shiny oxide layer.....	75	0.82	25
Cast plate, smooth.....	73	0.80	25
Cast plate, rough.....	73	0.82	25
Cast iron, rough, strongly oxidized.....	100-480	0.95	32
Wrought iron, dull oxidized.....	70-680	0.94	32
Steel plate, rough.....	100-700	0.94-0.97	15
Molten surfaces			
Cast iron.....	2370-2550	0.29	31
Mild steel.....	2910-3270	0.28	31
Steel, several different kinds with 0.25-1.2 % C (slightly oxidized surface).....	2840-3110	0.27-0.39	3
Steel.....	2730-3000	0.42-0.63	14
Steel.....	2770-3000	0.43-0.40	18
Pure iron.....	2760-3220	0.42-0.46	8
Armco iron.....	2770-3070	0.40-0.41	18
Lead:			
Pure (99.96 %), unoxidized.....	260-440	0.057-0.076	26
Gray oxidized.....	76	0.28	25
Oxidized at 300°F.....	390	0.63	23
Magnesium:			
Magnesium oxide.....	530-1520	0.65-0.20	21
Magnesium oxide.....	1650-3100	0.20	10
Mercury.....	32-212	0.09-0.12	11
Molybdenum:			
Filament.....	1340-4700	0.096-0.202	37
Massive, polished.....	212	0.071	1
Monel metal:			
Oxidized at 1110°F.....	390-1110	0.41-0.46	23
K Monel 8700; A, B, C.....	75	0.23, 0.17, 0.14	36
K Monel 8700; A'.....	450-1610	0.46-0.65	36
K Monel 8700; B'.....	460-1760	0.64-0.77	36
K Monel 8700; C'.....	450-1785	0.35-0.63	36

(Sumber :J. P. Holman, Heat Transfer, edisi 8, hal 651)

Tabel 7. Dimensi Pipa-pipa Baja

<i>Ukuran Nominal pipa</i>	<i>Diameter luar</i>	<i>Skedul</i>	<i>Tebal dinding</i>	<i>Diameter dalam</i>	<i>Luas penampang logam</i>	<i>Luas penampang dalam</i>
in	in	no.	in	in	in ²	ft ²
1/8	0.405	40	0.068	0.269	0.072	0.00040
		80	0.095	0.215	0.093	0.00025
1/4	0.540	40	0.088	0.364	0.125	0.00072
		80	0.119	0.302	0.157	0.00050
3/8	0.675	40	0.091	0.493	0.167	0.00133
		80	0.126	0.423	0.217	0.00098
1/2	0.840	40	0.109	0.622	0.250	0.00211
		80	0.147	0.546	0.320	0.00163
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
1 1/2	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	0.075	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, Heat Transfer, edisi 8, hal 653)

Tabel 8. Harga Q / A

Configuration	h_c , Btu/hr-ft ² -°F	q/A , Btu/hr-ft ²
Horizontal surface (in wide vessel)	$h_c = 151(\Delta T)^{1/4}$ $h_c = (0.168)(\Delta T)^{1/4}$	$q/A < 5000$ $5000 < q/A < 75,000$
Vertical surface (in wide vessel)	$h_c = 87(\Delta T)^{1/4}$ $h_c = (0.24)(\Delta T)^{1/4}$	$q/A < 1000$ $1000 < q/A < 20,000$
Vertical tube (interior)	$h_c = 189(\Delta T)^{1/4}$ $h_c = (0.21)(\Delta T)^{1/4}$	$q/A < 5000$ $5000 < q/A < 75,000$

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 14-2)

Tabel 9. Konduktivitas Bahan

Thermal conductivity, k , of selected materials
(Btu/sq ft, hr, F/in. thickness)

Material	k^*
Silver	2380
Copper	2640
Carbon steel	350
Alloy steel, 18% Cr-8% Ni	108
First-quality firebrick	4.5
Insulating firebrick	0.8
85% Magnesia block	0.5

* Approximate values at room temperature.

(Sumber : Ir. Syamsir A. Muin, Pesawat-pesawat Konversi Energi I, Rajawali, Jakarta, hal 160)

Tabel 10. Sifat-sifat Fisik Uap air dan Gas

T, K	ρ kg/m^3	c_p , $kJ/kg \cdot ^\circ C$	μ , $kg/m \cdot s$	ν , m^2/s	k , $W/m \cdot ^\circ C$	α , m^2/s	Pr
Carbon dioxide							
220	2.4733	0.783	11.105×10^{-6}	4.490×10^{-6}	0.010805	0.05920×10^{-4}	0.818
250	2.1657	0.804	12.590	5.813	0.012884	0.07401	0.793
300	1.7973	0.871	14.958	8.321	0.016572	0.10588	0.770
350	1.5362	0.900	17.205	11.19	0.02047	0.14808	0.755
400	1.3424	0.942	19.32	14.39	0.02461	0.19463	0.738
450	1.1918	0.980	21.34	17.90	0.02897	0.24813	0.721
500	1.0732	1.013	23.26	21.67	0.03352	0.3084	0.702
550	0.9739	1.047	25.08	25.74	0.03821	0.3750	0.685
600	0.8938	1.076	26.83	30.02	0.04311	0.4483	0.668
Water vapor							
380	0.5863	2.060	12.71×10^{-6}	2.16×10^{-5}	0.0246	0.2036×10^{-4}	1.060
400	0.5542	2.014	13.44	2.42	0.0261	0.2338	1.040
450	0.4902	1.980	15.25	3.11	0.0299	0.307	1.010
500	0.4405	1.985	17.04	3.86	0.0339	0.387	0.996
550	0.4005	1.997	18.84	4.70	0.0379	0.475	0.991
600	0.3652	2.026	20.67	5.66	0.0422	0.573	0.986
650	0.3380	2.056	22.47	6.64	0.0464	0.666	0.995
700	0.3140	2.085	24.26	7.72	0.0505	0.772	1.000
750	0.2931	2.119	26.04	8.88	0.0549	0.883	1.005
800	0.2739	2.152	27.86	10.20	0.0592	1.001	1.010
850	0.2579	2.186	29.69	11.52	0.0637	1.130	1.019

(Sumber :J. P. Holman, Heat Transfer, edisi 8, hal 648)

Tabel 11. Material Pipa

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	14,550	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 / It's Generation and Use, hal 29-12)

Tabel 12. Material Plat Silinder

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.												

(Sumber : Babcock and Wilcox, Steam / It's Generation and Use, hal 29-14)

Tabel 13. Koefisien Friksi terhadap Temperatur

	Temperature, deg F					
	900 and below	950	1000	1050	1100	1150 and above
Ferritic steels.....	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7
Austenitic steels.....	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7

(Sumber : Reno C. King, Piping Handbook, hal 3-19)

Tabel 14. Nilai koefisien pipa

Table 11. Values of C¹

Type of pipe	Value of C, in.
Threaded pipe:	
$\frac{3}{8}$ in. and smaller.....	0.05
$\frac{1}{2}$ in. and larger.....	Depth of thread
Plain-end pipe or tubes for 1 in. size and smaller.....	0.05
Plain-end pipe or tubes for sizes above 1 in.....	0.065

¹ The values of C stipulated above are such that the actual stress due to internal pressure in the wall of the pipe is less than the values of S given in Tables 8 and 9 as applicable in the formulas.

(Sumber : Reno C. King, Piping Handbook, hal 3-19)

Tabel 15. Konduktivitas Panas Logam dan Paduan

BAHAN	k (Btu/hr ft F)				c (Btu/lb _m F)	ρ (lb _m /ft ³)	a (ft ² /h)
	32 F	212 F	572 F	932 F	32 F	32 F	32 F
Logam							
Aluminium	117	119	133	155	0,208	169	3,33
Bismut	4,9	3,9	....	....	0,029	612	0,28
Tembaga murni	224	218	212	207	0,091	558	4,42
Emas	169	170	....	....	0,030	1203	4,68
Besi murni	35,8	36,6	....	....	0,104	491	0,70
Timbal	20,1	19	18	....	0,030	705	0,95
Magnesium	91	92	....	....	0,232	109	3,60
Air raksa	4,8	....	....	....	0,033	849	0,17
Nikel	34,5	34	32	....	0,103	555	0,60
Perak	242	238	....	....	0,056	655	6,6
Timah	36	34	....	....	0,054	456	1,46
Seng	65	64	59	....	0,091	446	1,60
Paduan							
Logam admiralti	65	64	....	....	....	....	....
Kuningan 70% Cu, 30% Zn	56	60	66	....	0,092	532	1,14
Perunggu 75% Cu, 25% Sn	15	....	....	....	0,082	540	0,34
Besi tuang							
Biasa	33	31,8	27,7	24,8	0,11	474	0,63
Paduan	30	28,3	27	....	0,10	455	0,66
Konstantan, 60% Cu, 40% Ni	12,4	12,8	....	....	0,10	557	0,22
Baja tahan karat 18-8							
Tipe 304	8,0	9,4	10,9	12,4	0,11	488	0,15
Tipe 347	8,0	9,3	11,0	12,8	0,11	488	0,15
Baja lunak 1% C	26,5	26	25	22	0,11	490	0,49

(Sumber :J. P. Holman, Heat Transfer, edisi 8, hal 641)

Tabel 16. Konduktivitas panas Bahan Isolasi

BAHAN	Suhu Rata-rata (F)	k (Btu/hr ft F)	c (Btu/lb _m F)	ρ (lb _m /ft ³)	α (ft ² /h)
Bahan isolasi					
Asbes	32	0,087	0,25	36	~ 0,01
	392	0,12	....	36	~ 0,01
Gabus	86	0,025	0,04	10	~ 0,006
Kapas, kain (katun)	200	0,046	....	....	....
Tanah diatome, serbuk	100	0,030	0,21	14	~ 0,01
	300	0,036	....	....	....
	600	0,046	....	....	....
Penutup pipa-cetakan	400	0,051	....	26	....
	1600	0,083	....	....	....
Wol kaca					
Halus	20	0,022	....	....	....
	100	0,031	....	1,5	....
	200	0,043	....	....	....
Dipak	20	0,016	....	....	....
	100	0,022	....	6,0	....
	200	0,029	....	....	....
Bulu kempa (vilt)	100	0,027	....	8,2	....
Isolasi kaolin					
bata	932	0,15	....	27	....
	2102	0,26	....	....	....
Isolasi kaolin					
bata tahan api	392	0,05	....	19	....
	1400	0,11	....	....	....
Magnesia 85%	32	0,032	....	17	....
	200	0,037	....	17	....
Wol batu	20	0,017	....	8	....
	200	0,030	....	....	....
Karet	32	0,087	0,48	75	0,0024
Bahan bangunan					
Bata					
Tanah liat bakar	392	0,58	0,20	144	0,02
	1832	0,95	....	....	....
Semen "masonry"	70	0,38	0,20	106	0,018
Zirconia	392	0,84	....	304	....
	1832	1,13	....	....	....
Bata khrom	392	0,82	....	246	....
	1832	0,96	....	....	....
Beton					
Batu	~ 70	0,54	0,20	144	0,019
Kelembaban 10%	~ 70	0,70	....	140	~ 0,025
Kaca jendela	~ 70	~ 0,45	0,2	170	0,013
Kapur, kering	70	0,40	0,22	105	0,017
Pasir					
Kering	68	0,20	....	95	....
10% H ₂ O	68	0,60	....	100	....
Tanah					
Kering	70	~ 0,20	0,44	....	~ 0,01
Basah	70	~ 1,5	....	....	~ 0,03
Kayu					
Oak 1 serat	70	0,12	0,57	51	0,0041
11 serat	70	0,20	0,57	51	0,0069
Pinus 1 serat	70	0,06	0,37	31	0,0029
11 serat	70	0,14	0,67	31	0,0067
Es	32	1,28	0,46	57	0,048

(Sumber :J. P. Holman, Heat Transfer, edisi 8, hal 640)



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

DAFTAR KIRI : 1. SITUASI

Nomor : 555 / T / S / 15 / September 2003

Diketahui oleh

Agusadus Hartono

Nomor

Fakultas

TEKNIK

Jenis / Subjek

dan pada saat ini sedang berlangsung di Universitas 21 dan akan Perancangan
disertai gambar yang lengkap. Dalam hal ini akan ada beberapa bagian : 1. Baga

Pembimbing Utama

Ir. YB. Lukyanto M.T.

Agusadus Hartono

Agusadus Hartono

O	TAHUN	URUTAN	KETERANGAN	TANDA TANGAN
28/10/03	revisi : satuan ?	lanjutan perhitungan P. P. radiasi	<u>Andi</u>	
31/10/03		lanjutan : pipa ? api	<u>Andi</u>	
19/11/03	revisi : lihat masalah	lanjutan : superheater	<u>Andi</u>	
09/02/04		lanjutan : tinggi cerobong	<u>Andi</u>	



UJIAN PENDADARAN TUGAS AKHIR / SKRIPSI
TANGGAL : 2 Oktober 2004

NAMA Mhs. : AGUSTINUS HARYANTO

NIM : 995214016

JUDUL :
Locomotive Boiler

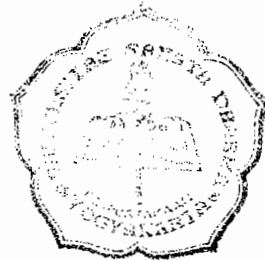
Pembimbing Utama : Ir. YB. Lukiyanto, M.T.

Pembimbing Kedua : Budi Sugiharto, S.T., M.T.

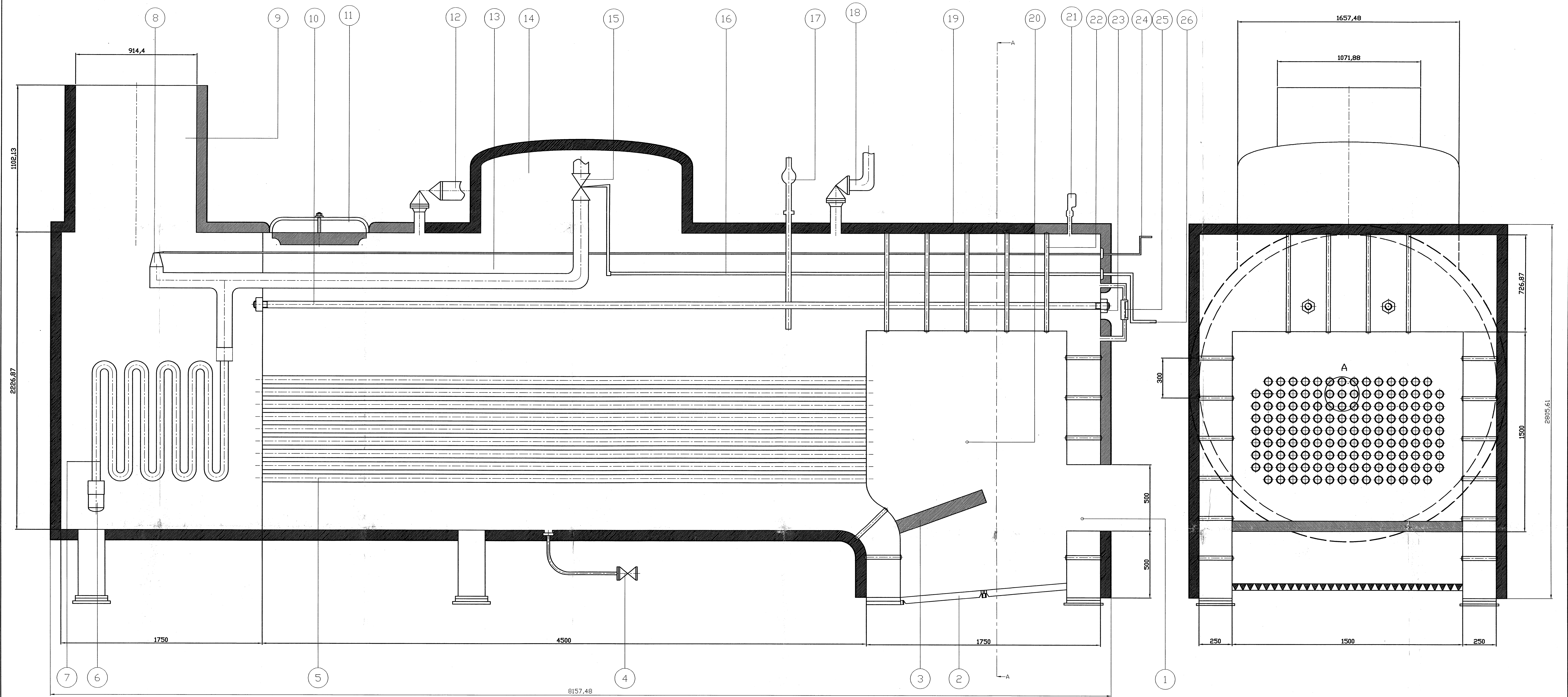
USULAN REVISI DARI DOSEN PENGUJI

1. 1 lembar untuk mahasiswa
2. 1 lembar untuk dosen pembimbing

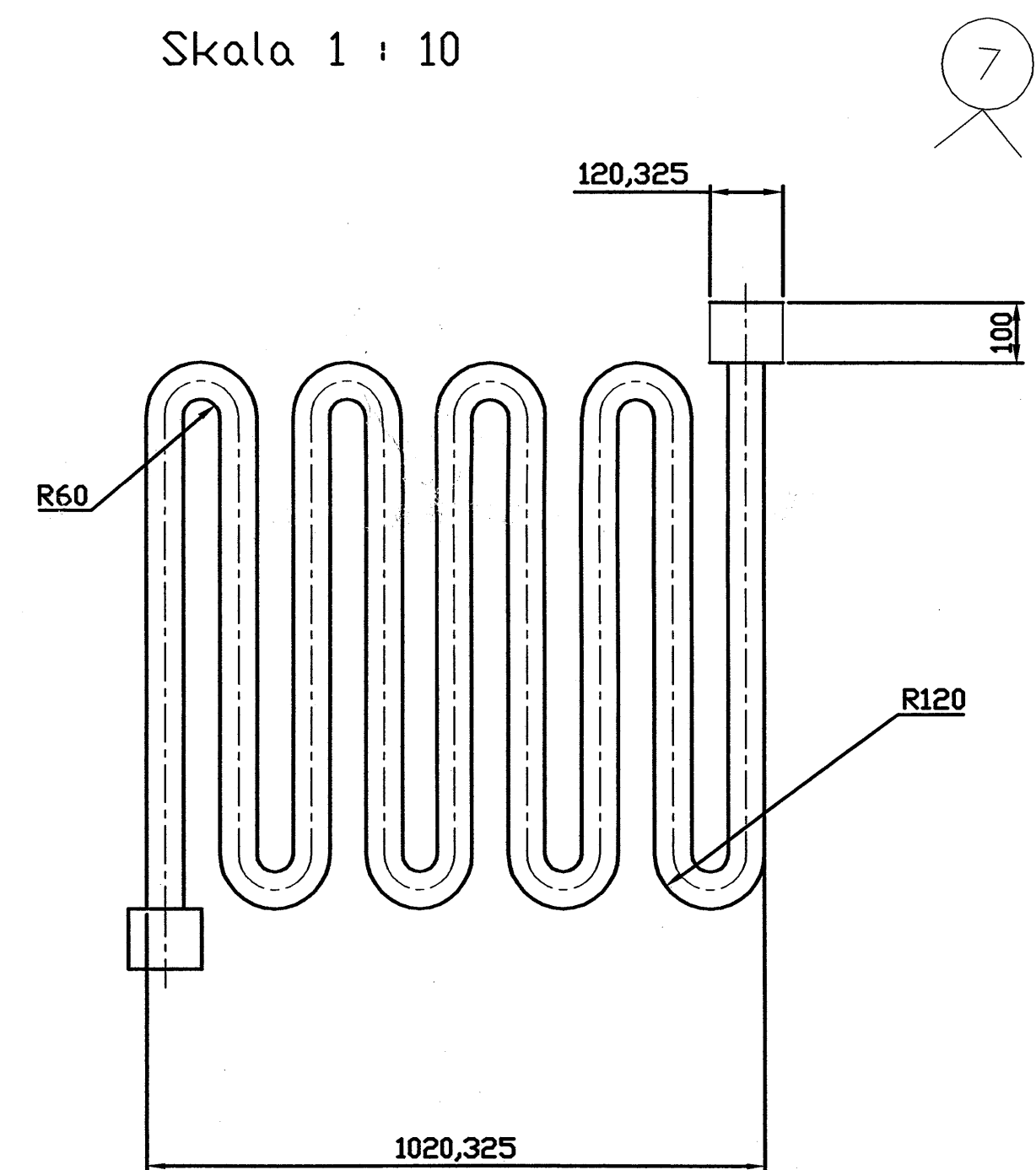
- . Hal 23 → Q dihitung berdasar superheated.
- . Hal 49 → Q yang diterima oleh air & Q kebutuhan hal 23
- . Daftar Pustaka.
- . Judul tabel diatas tabelnya → hal 28, 32
- . Intisari, Abstrak.
- . Satuan -satuan → hal 40, 41
- . Gambar main hole.
- . T-S diagram
- . Halaman pengesahan lihat papan pengumuman.



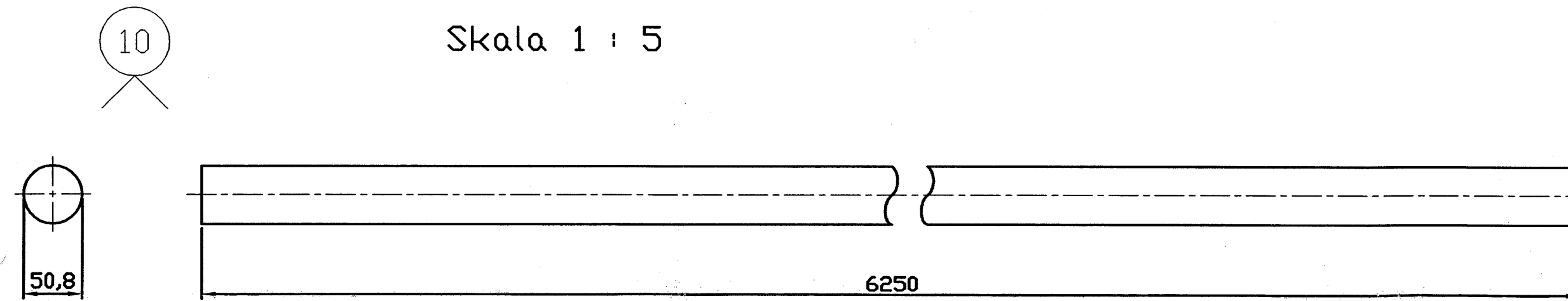
Alc. 25/10/04
AS



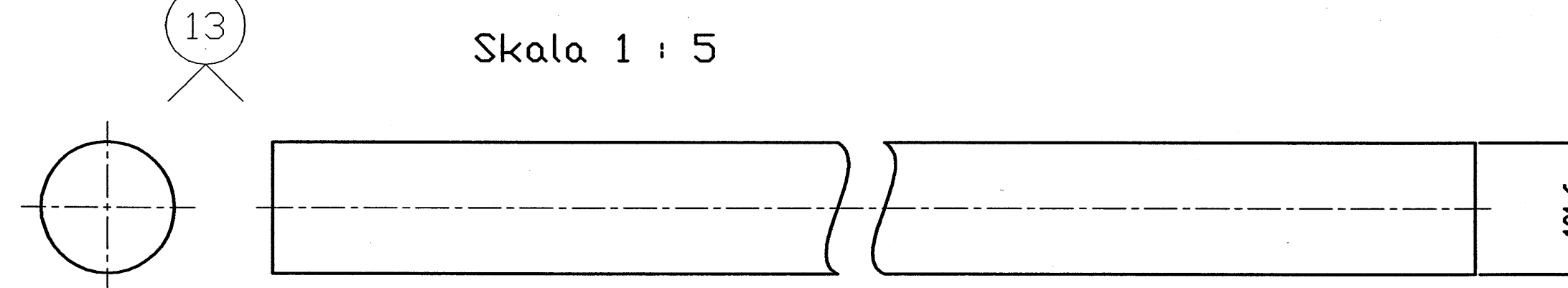
Skala 1 : 10



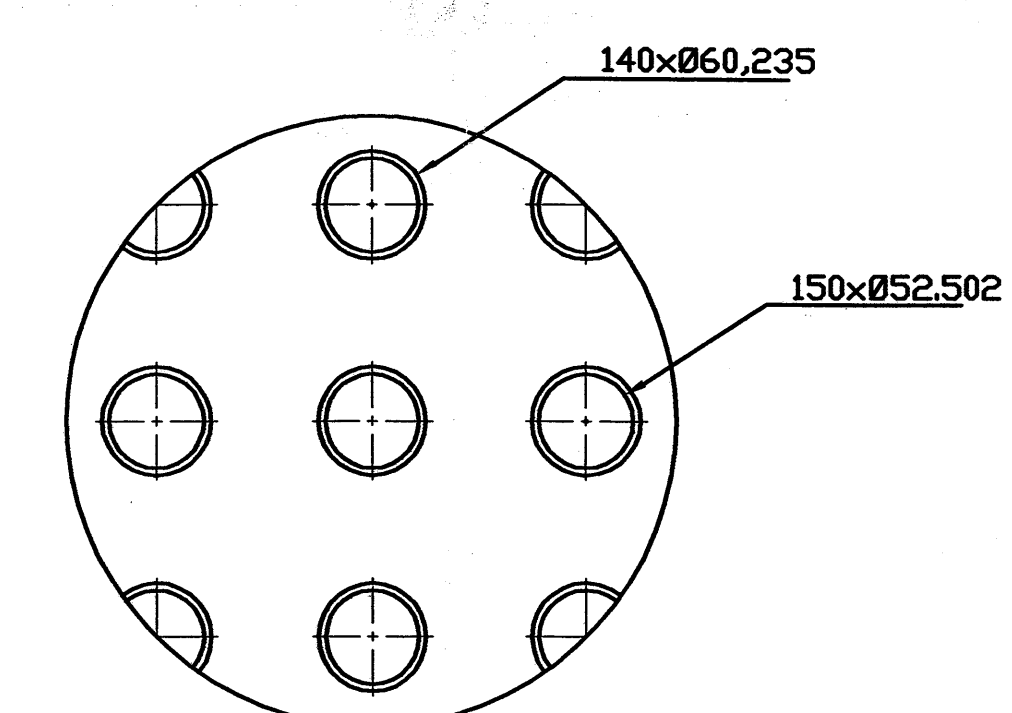
Skala 1 : 5



Skala 1 : 5



Detail A
Skala 1 : 5



25	1	Tuas Pengatur Uap	Besi Cor		Dibuat
25	1	Gelas Pengukur			Dibeli
24	1	Tuas Pengtr Nozzle	Besi Cor		Dibuat
23	2	Baut M52	SCr 5		Dibuat
22	104	Keling Penguat	SA 210 C		Dibuat
21	1	Manometer			Dibeli
20	1	Kotak apl	SA 515 70		Dibuat
19	1	Silinder Generator	SA 515 70		Dibeli
18	1	Katub keamanan	SA 210 C		Dibeli
17	1	Peluit Bahaya			Dibeli
16	1	Btg Pengatur Uap	SA 210 C		Dibuat
15	1	Kran Uap Utama	SA 210 C		Dibeli
14	1	Don Uap	SA 515 70		Dibuat
13	2	Pipa Uap Jenuh	SA 210 C		Dibeli
12	1	Keran pengisi	SA 210 C		Dibeli
11	1	Man Hole	SA 210 C		Dibuat
10	1	Batang Penahan	SA 210 C		Dibuat
9	1	Cerobong Asap	SA 515 70		Dibuat
8	1	Nozzle Penghenbus	SA 210 C		Dibeli
7	81	Pipa Superheater	SA 210 C		Dibeli
6	2	Kotak Sprheater	SA 515 70		Dibuat
5	140	Pipa Api	SA 210 C		Dibeli
4	1	Kran Blow Down	SA 210 C		Dibeli
3	1	Jembatan Api			Dibuat
2	1	Btg Rangka Bakar	SA 210 C		Dibuat
1	1	Pintu bahan bakar	SA 515 70		Dibuat
No	JML	NAMA	BAHAN	NORMALISASI	KETERANGAN

