

# LOCOMOTIVE BOILER

Tugas Akhir

Diajukan untuk memenuhi sebagian prasyarat

Mencapai derajat Sarjana S-1

Program Studi Teknik Mesin

Jurusan Teknik Mesin



Disusun oleh :

Bram Prasetyo

NIM : 995214049

Kepada

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS SANATA DHARMA

YOGYAKARTA

2005

## TUGAS AKHIR

### “LOCOMOTIF BOILER”

Yang dipersiapkan dan disusun oleh :

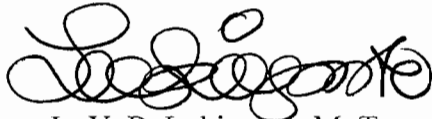
**Nama : Bram Prasetyo**

**NIM : 995214049**

Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji,  
pada tanggal 10 Januari 2005

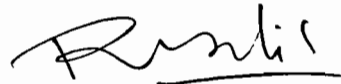
#### Susunan Dewan Penguji

Pembimbing Utama :



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

Dosen Penguji :



Ir. FA. Rusdi Sambada, M. T.

Pembimbing Kedua :



Ir. FX. Agus Unggul Santoso



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

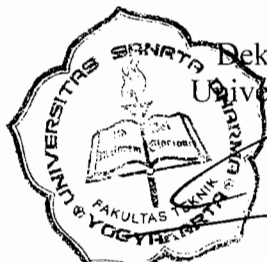


Ir. PK. Purwadi, M. T.

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

Yogyakarta,.....Januari 2005  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS SANATA DHARMA  
YOGYAKARTA

Mengetahui,  
Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Sanata Dharma



Ir. 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



Bram Prasetyo

## INTISARI

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 :

- Tekanan kerja = 17 Bar
- Daya yang dihasilkan = 100 PK
- Bahan bakar = batubara

Dengan spesifikasi di atas maka dihasilkan suhu pembakaran  $1031,60^{\circ}\text{C}$ , suhu uap keluar  $215^{\circ}\text{C}$ , jumlah uap yang dihasilkan 75, 509 Kg/Jam, Jumlah pipa api dirancang berjumlah 175 dengan panjang 6,05 m, uap panas yang dihasilkan akan masuk ke dalam superheater lalu menggerakkan piston, piston yang bergerak itu akan menggerakkan roda-roda kereta api.

## ABSTRACT

At his chance, the writer want to design one type of steam generator of pipes fire such Locomotive steam generator. This design is supposed to produce the size and the shape of the part of steam generator. In order to get strength, safety and efficiency in high rate. Efficiency could mean the effativity of heat using from burning process or the maximal using of the heat so that the rest will be decrease.

Steam generator that will be designed is The Locomotive Steam Generator which has specifications ;

- The pressure = 17 bar
- The Power = 60 PK
- The fuel = coal

With the specification above, The locomotive Steam Generator is expected to produce enough energy to run the slinder so the train could move and do the function as the 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 akhirnya Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Dan untuk itu, pada kesempatan kali ini penulis juga mengucapkan terima kasih kepada :

1. Rm. Ir., Greg Heliarko, S.J.,S.SS.,B.S.T.,M.Sc, Selaku Dekan Fakultas Teknik
2. Bapak Yosef Agung Cahyanta.,ST.MT selaku ketua jurusan Teknik Mesin
3. Bapak Ir.YB. Lukiyanto.,MT selaku dosen pembimbing I
4. Bapak Ir. Agus Unggul Santoso sebagai dosen pembimbing II tugas akhir
5. Bapak Budi Sugiharta.,ST.,MT. Selaku dosen pembimbing akademik

6. Semua Dosen di Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin 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,.....Oktober 2004

Penyusun

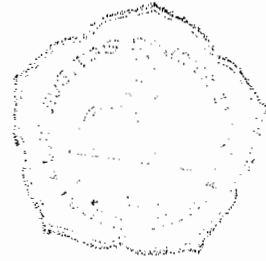
## ***MOTTO DAN PERSEMBAHAN***

- Suatu keberhasilan membutuhkan usaha dan pengorbanan.
- Hanya didalam kegelapan orang akan melihat terang
- Hiduplah disaat sekarang, belajarlh dari masa lalu dan rencanakanlah masa depanmu.
- Hari ini harus lebih baik daripada kemarin, besok harus lebih baik daripada hari ini.
- Angan, Impian, Cita-cita tanpa usaha adalah Sampah
- Jangan persoalkan orang yang mencoba dan gagal tapi persoalkan orang yang gagal mencoba
- Berusahalah dan jangan pernah ada kata menyerah.
- Bagi Tuhan segala sesuatu mungkin

### **Tugas Akhir ini kupersembahkan buat :**

- 1. Bapa di Surga**
- 2. Bapak dan Ibu yang tercinta**
- 3. Kakak dan Adik-adikku tersayang**
- 4. Sahabat dan teman-temanku**
- 5. Diriku sendiri**
- 6. Dosen-dosen Teknik Mesin Sanata Dharma**
- 7. Semua Pihak yang membutuhkannya**





## DAFTAR ISI

|                                              |      |
|----------------------------------------------|------|
| HALAMAN JUDUL.....                           | i    |
| HALAMAN PENGESAHAN.....                      | ii   |
| PERNYATAAN.....                              | iii  |
| INTI SARI.....                               | iv   |
| ABSTRACT.....                                | v    |
| KATA PENGANTAR.....                          | vi   |
| MOTTO DAN PERSEMBAHAN.....                   | viii |
| DAFTAR ISI.....                              | ix   |
| DAFTAR GAMBAR DAN TABEL.....                 | xiv  |
| BAB I. PENDAHULUAN                           |      |
| I.1. Pengantar.....                          | 1    |
| I.2. Batasan Masalah.....                    | 3    |
| BAB II. KLASIFIKASI KETEL UAP                |      |
| 2.1. Ketel Uap Lorong Api.....               | 5    |
| 2.2. Ketel Uap Pipa Api.....                 | 7    |
| 2.3 Ketel Uap Pipa-Pipa Air.....             | 9    |
| BAB III. PERANCANGAN KETEL UAP               |      |
| 3.1 Dasar Perancangan.....                   | 17   |
| 3.2 Proses Terbentuknya Uap.....             | 17   |
| 3.3 Sirkulasi Air Ketel.....                 | 18   |
| 3.5 Spesifikasi Generator Uap Lokomotif..... | 19   |
| 3.6 Kebutuhan Kalor Ketel Uap.....           | 20   |

## BAB IV. PEMBAKARAN BAHAN BAKAR

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| 4.1 Klasifikasi Bahan Bakar .....                   | 22 |
| 4.2 Syarat Terjadinya Pembakaran Yang Sempurna..... | 26 |
| 4.3 Dapur Pembakaran Batubara.....                  | 29 |
| 4.4 Nilai Pembakaran.....                           | 29 |
| 4.5 Kebutuhan Bahan Bakar.....                      | 32 |
| 4.6 Kebutuhan Udara Untuk Pembakaran.....           | 34 |
| 4.7 Gas Hasil Pembakaran.....                       | 35 |

## BAB V DIMENSI KETEL

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1. Pengertian Perpindahan Panas .....                           | 39 |
| 5.2. Perhitungan Perpindahan Panas Pada Bagian Ruang Bakar .....  | 41 |
| 5.3 Perhitungan Temperatur Gas Asap Meninggalkan Ruang Bakar..... | 43 |
| 5.4 Perancangan Pipa Api .....                                    | 45 |
| 5.5 Perpindahan Panas Pada Superheater.....                       | 55 |

## BAB VI PERANCANGAN SILINDER KETEL

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| 6.1 Perhitungan Silinder Ketel Pada Ruang Bakar ..... | 61 |
| 6.2 Silinder Ketel Pada Pipa-pipa Api .....           | 63 |
| 6.3 Pipa-pipa Api.....                                | 64 |
| 6.4 Perhitungan Jarak Antar Pipa-pipa Api.....        | 65 |
| 6.5 Perhitungan Rangka Pendukung .....                | 66 |
| 6.6 Perhitungan Sambungan Las .....                   | 68 |

## BAB VII ISOLASI KETEL

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| 7.1 Perancangan Isolasi pada Silinder Ketel .....             | 72 |
| 7.2 Perhitungan Kerugian Panas Melalui Dinding Silinder ..... | 74 |
| 7.3 Perencanaan Isolasi Tutup Belakang Silinder Ketel .....   | 75 |

## BAB VIII CEROBONG

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| 8.1 Perencanaan Cerobong.....                              | 80 |
| 8.2 Kerugian Tekanan Aliran Gas Asap di Cerobong.....      | 84 |
| 8.3 Perhitungan Kerugian Aliran Gas Asap Dalam Ketel ..... | 86 |

## BAB IX AIR ISIAN KETEL

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| 9.1 Sistem Pengolahan Air .....         | 92 |
| 9.2 Kسادahan Air .....                  | 93 |
| 9.4 Pencegahan Terbentuknya Kerak ..... | 94 |
| 9.5 Pencegahan Buih dan Gelombang.....  | 96 |

## BAB X ALAT-ALAT KEAMANAN KETEL

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 10.1. Katub Keamanan.....          | 97  |
| 10.2 Manometer .....               | 98  |
| 10.3 Peluit Keamanan .....         | 99  |
| 10.4 Gelas Penduga .....           | 100 |
| 10.5 Thermometer.....              | 100 |
| 10.6 Garis Api .....               | 101 |
| 10.7 Katub Air Isian .....         | 102 |
| 10.8 Katub Penutup Uap Induk ..... | 102 |
| 10.9 Katub Penguras.....           | 103 |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 10.10 Katub Udara .....             | 104 |
| 10.11 Pengaturan Otomatis .....     | 104 |
| BAB XI PENUTUP DAN KESIMPULAN ..... | 108 |

## DAFTAR GAMBAR

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gambar 1.1 Siklus termodinamika.....                                   | 18  |
| Gambar 4.1 Monogram panas Jenis .....                                  | 44  |
| Tabel 5.1 Emisivitas bahan .....                                       | 47  |
| Tabel 5.2 Grafik beda suhu .....                                       | 49  |
| Grafik 5.3 Air Film temperature diference.....                         | 51  |
| Grafik 5.4 Grafik Bulk temperature .....                               | 51  |
| Grafik 5.5 Mass Velocity of Air.....                                   | 52  |
| Grafik 5.6 Grafik Log Mean Radiating .....                             | 59  |
| Grafik 8.1 Grafik diameter cerobong .....                              | 81  |
| Grafik 8.2 Hubungan antara temperatur gas asap .....                   | 82  |
| Gambar 8.3 Grafik hubungan antara tarikan cerobong dengan tinggi ..... | 84  |
| Gambar 8.4 Grafik hubungan koef gesek dengan diameter cerobong .....   | 85  |
| Gambar 8.5 Grafik Viskositas absolute.....                             | 87  |
| Gambar 8.6 Grafik Kekerasan relative dari berbagai permukaan.....      | 88  |
| Gambar 8.7 Grafik faktor gesekan .....                                 | 89  |
| Gambar 10.1 Katub keamanan dengan pemberat .....                       | 97  |
| Gambar 10.2 Manometer.....                                             | 98  |
| Gambar 10.3 Peluit Kemanan .....                                       | 99  |
| Gambar 10.4 Gelas Penduga .....                                        | 100 |
| Gambar 10.5 Kran Penutup Uap .....                                     | 103 |

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Pengantar**

Ketel uap merupakan suatu pembangkit tenaga uap, uap tersebut berasal dari air yang dididihkan. Untuk mendidihkan air tersebut diperlukan energi panas. Energi panas ini diperoleh dari proses pembakaran bahan bakar yang berupa bahan bakar cair, padat atau gas yang dilakukan didalam ruang bakar.

Bagian-bagian pokok ketel uap yakni terdiri dari bejana tertutup atau drum yang tertutup pada ujung pangkalnya, di dalamnya di isi air dan dipanaskan dari luar. Uap yang dihasilkan oleh ketel uap dapat dipergunakan untuk berbagai keperluan antar lain sebagai penggerak mula, maupun sebagai pemanas.

Ketel uap yang tenaga uapnya dipergunakan sebagai penggerak mula umumnya 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) dipanas lanjutkan sehingga suhunya lebih besar dari titik didih airnya. Sedang untuk keperluan pemanasan biasanya hanya mempergunakan uap jenuh sebagai contoh penggerak mula, antara lain, turbin uap dan mesin uap.

Ketentuan-ketentuan ketel uap yang ideal yang uapnya dapat digunakan sesuai dengan tujuannya dapat diuraikan sebagai berikut :

## Generator Uap Lokomotif

1. Kontruksi sederhana sehingga pelayanan dan perawatan mudah
2. Kapasitas uap yang dihasilkan, air yang dimasukkan dan kapasitas bahan bakar harus selalu seimbang agar permukaan air dan tekanan kerja perubahannya tidak begitu besar, 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 ketel.
5. Kemungkinan terjadinya tegangan akibat adanya ekspansi harus dihindarkan karena itu sambungan paku keling didaerah pemanas harus dihindari.
6. Kontruksi dapur harus memungkinkan bahan bakar terbakar sempurna di dalam
7. Bagian-bagian ketel harus diperhitungkan terhadap kemungkinan pembersihan dan perbaikan
8. Perpindahan panas harus diperhitungkan terhadap kemungkinan pembersihan dan perbaikan.
9. Diperlengkapi dengan alat ukur dan pengamanan yang baik.

Sedangkan faktor-faktor pemilihan atau perencanaan ketel uap dapat diuraikan sebagai berikut :

1. Kapasitas ketel uap harus disesuaikan dengan pemakaian uap
2. Tekanan dan temperatur uap disesuaikan dengan keinginan pemakaian.
3. Jenis bahan bakar
4. Kualitas air ketel

## Generator Uap Lokomotif

5. Biaya pembelian, operasi dan perawatannya
6. Tipe/ konstruksi ketel

### **1.2 Batasan Masalah**

Untuk menghindari adanya kesalah pahaman, maka dalam perencanaan ketel uap ini dibatasi hal-hal sebagai berikut :

1. Sesuai dengan tujuan dari perencanaan di sini maka perencanaan ini menitik beratkan pada masalah perencanaan dari ketel uap pipa api jenis lokomotif.
2. Bahan bakar yang di pergunakan adalah batu bara
3. Uap yang dihasilkan adalah uap panas lanjut.
4. Air umpan yang dipakai untuk ketel adalah air sumur



## BAB II

### KLASIFIKASI KETEL UAP

Pembagian ketel uap dapat dibagi atas bermacam-macam bentuk berdasarkan tekanan kapasitas kerja, posisi dan pemakaian. Pembagian ketel uap dapat dituliskan sebagai berikut :

1. Berdasarkan tekanan kerja
  - a. Ketel uap tekanan rendah, tekanan 8 – 20 atm
  - b. Ketel uap tekanan sedang, tekanan 20 – 50 atm
  - c. Ketel uap tekanan tinggi, tekanan 50 – 140 atm
  - d. Ketel uap tekanan sangat tinggi , tekanan 140 atm keatas
2. Berdasarkan kapasitas uap
  - a. Ketel uap kapasitas kecil, kapasitas 4 – 10 ton / jam
  - b. Ketel uap kapasitas sedang, kapasitas 10 -100 ton /jam
  - c. Ketel uap kapasitas tinggi, kapasitas 100 – 500 ton / jam
  - d. Ketel uap kapasitas sangat tinggi, kapasitas 500 ton/ jam
3. Berdasarkan posisi ketel
  - a. Ketel datar/ horizontal
  - b. Ketel tegak / vertical
4. Berdasarkan pemakaian
  - a. Ketel datar
  - b. Ketel kapal

5. Berdasarkan konstruksi

- a. Ketel uap lorong api (Shell type boiler)
- b. Ketel uap pipa-pipa api ( fire type boiler)
- c. Ketel uap pipa-pipa air ( water tube boiler)

Dari pembagian ketel uap di atas pada umumnya pembagian ketel uap berdasarkan atas konstruksinya.

2.1. Ketel Uap Lorong Api

Suatu ketel uap yang pada dasarnya terdiri dari suatu tanki bentuk silinder berisi air, di dalam tanki terdapat silinder yang lebih kecil dan berfungsi untuk saluran gas asap dan ruang baker. Silinder- silinder ini dipasang terendam air dengan tujuan agar panas yang diterima dari prosis pembakaran dapat di serap oleh air yang ada disekitarnya.

Keuntungan dari ketel uap ini dibandingkan dengan jenis yang lainnya, yaitu :

1. Kontruksi sederhana karena itu perawatan mudah dilaksanakan.
2. Ketel ini tidak memerlukan air isian dengan kwalitas tinggi atau tidak peka terhadap air kotor.
3. Volume air yang besar di dalam ketel dapat melayani perubahan kapasitas yang agak besar atau dengan kata lain perubahan kapasitas tidak mengganggu perubahan air.

## Generator Uap Lokomotif

Disamping mempunyai keuntungan- keuntungan tersebut di atas ketel ini juga mempunyai kerugian- kerugian , antara lain :

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

Yang termasuk dalam ketel uap lorong api yaitu :

- a. Ketel uap Cornwall
- b. Ketel uap Lanchashire
- a. Ketel Uap Cornwall

Pada ketel uap ini, api dan gas asap yang terbentuk dari hasil pembakaran bahan dan udara diatas rangka bakar akan mengalir sepanjang lorong api dari belakang ke depan dan memanasi air disekeliling lorong api secara pancaran (radiasi) suhu lorong api lebih panas dibandingkan dengan drum ketel, sehingga akan memuai lebih banyak dibandingkan drum ketel. Untuk mengimbangi pemuaian tersebut maka lorong api dibuat bergelombang sehingga mudah menjadi gas bila memuai, disamping itu diperoleh kekuatan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan yang datar, ini dimaksudkan untuk melawan tekanan uap/ air disekelilingnya.

## Generator Uap Lokomotif

Ketel ini mempunyai satu lorong api yang dipasang pada bagian bawah tangki atau yang terendam air, hal ini dimaksudkan agar seluruh air didalam ketel dapat bersirkulasi dengan demikian diharapkan seluruh suhu pada bagian ketel dapat seimbang.

### b. Ketel Uap Lanchashire

Bentuk ketel uap ini sama dengan ketel uap Cornwall, hanya berbeda dalam jumlah lorong apinya. Pada ketel uap Lanchashire ini mempunyai dua atau tiga buah lorong api. Penggunaan dua atau tiga buah lorong api dimaksudkan agar diperoleh panas yang besar pada kapasitas yang sama.

## 2.2 Ketel Uap Pipa Api

Ketel ini merupakan perkembangan dari ketel uap lorong api. Luas permukaan yang dipanaskan oleh gas panas lebih besar dan volume air lebih kecil sehingga ketel pipa api ini mempunyai efisiensi, kapasitas serta pemanasan awal yang lebih baik dibandingkan ketel lorong api.

Konstruksi ketel ini terdiri dari silinder tangki yang berisi air, di mana dalam tangki tersebut terdapat susunan pipa-pipa yang dialiri oleh gas asap dan pipa ini disebut pipa-pipa api. Ruang bakar (lorong api) dan saluran gas panas pembakaran (pipa-pipa api) terletak di dalam ketel dan tercelup di dalam air. Pemanasan terjadi pada dinding ruang bakar dan pipa-pipa api tercelup air yaitu gas panas akan lewat ruang bakar ke pipa-pipa api terus ke cerobong.

Dari uraian diatas jelas bahwa dengan pipa-pipa yang banyak jumlahnya maka luas bidang pemanas pada ketel pipa api menjadi lebih besar dan

## Generator Uap Lokomotif

effisiensinya tinggi, tetapi ketel ini mempunyai keterbatasan yaitu untuk memproduksi uap dalam jumlah besar akan diperlukan tangki yang besar dan bila tekannannya tinggi maka akan diperlukan bahan tangki yang tebal.

Yang termasuk dalam ketel uap pipa api yaitu :

- a. Ketel Uap Schots
- b. Ketel Uap Cochran
- c. Ketel Uap Lokomotif

### a. Ketel Uap Schots

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

### b. Ketel Uap Cochran

Ketel uap ini dipergunakan untuk kapasitas produksi yang kecil sekitar  $0,2-1,8 \text{ ton/ jam}$  penggunaan ketel ini pada mesin-mesin pengangkat atau mesin-mesin pemancang tiang dapat dipindah-pindahkan Efisiensi ketel ini rendah sehingga harganya murah, tekannan didalam tangki ketel tidak lebih dari  $8 \text{ kg/cm}^2$

## Generator Uap Lokomotif

### c. Ketel Uap Lokomotif

Ketel uap jenis ini merupakan penyesuaian dan modifikasi dari ketel uap yang digunakan di dalam lokomotif kereta api, ketel uap ini dapat dipindah-pindahkan, pada bagian bawah terdapat rangka bakar yang digunakan untuk membakar bahan bakar padat, berupa kayu, batu bara atau bahan bakar padat lainnya. Jika menggunakan bahan bakar cair maka akan digunakan pembakar atau burner. Uap hasil pemanasan lanjut yang dihasilkan ketel ini kan melakukan ekspansi ke dalam mesin uap torak atau turbin uap yang selanjutnya menggerakkan roda-roda lokomotif.

### 2.3 Ketel Uap Pipa-pipa Air

Ketel uap ini bagian pendidihnya terdiri dari dua buah susunan pipa-pipa yang didalamnya berisi air yang harus dididihkan, sedangkan asap akan mengalir di luar pipa tersebut dibandingkan dengan ketel uap lainnya, ketel uap pipa-pipa air mempunyai keuntungan sebagai berikut :

- a. Efisiensi dapat lebih tinggi
- b. Dapat digunakan pada ketel uap dengan kapasitas besar
- c. Dapat digunakan untuk ketel uap dengan volume air isian kecil sehingga pemanasan awal relative cepat.

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

- a. Kontruksinya tidak lagi sederhana sehingga perawatan dan perbaikannya lebih sulit

## Generator Uap Lokomotif

- b. Memerlukan air isian dengan kualitas yang lebih baik dibandingkan dengan ketel uap jenis lainnya.

Berdasarkan atas Sirkulasi air didalam ketel maka ketel uap pipa-pipa air dapat dibedakan atas :

- a. Ketel Uap pipa-pipa air sirkulasi alam ( Natural Circulation Water Tubes Boiler)
- b. Ketel Uap pipa- pipa air sirkulais paksa ( Forced Circulation Boiler)

### 2.3.1. Ketel Uap Pipa-pipa Air Sirkulasi Alam

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

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

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

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

## Generator Uap Lokomotif

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

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

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

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

Sehubungan dengan alasan tersebut diatas maka ketika bersirkulasi kecepatan aliran air di dalam pipa-pipa didih harus diusahakan pada kecepatan yang optimum yang harganya tergantung pada tekanan kerjanya ataupun sedikit lebih



## Generator Uap Lokomotif

cepat . Kecepatan aliran yang terlalu besar akan menyebabkan penyerapan kalor menjadi rendah/kurang baik. Sedangkan untuk kecepatan aliran yang terlalu lambat selama masih berbentuk air, penyerapan panasnya baik. Akan tetapi, sebentar saja kadar uapnya dapat meningkat dengan cepat sehingga kadar uap didalam pipa-pipa didih telalu banyak, sehingga kemungkinan dapat mengakibatkan uap terpisah dari air lalu melapisi permukaan dalam pipa-pipa didih. Akibatnya, dinding pipa-pipa didih ada yang tidak dibasahi air. Tidak terbasahnya dinding dalam pipa-pipa didih ada yang tidak dibasahi air :

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

Oleh karena itu, kecepatan alir didalam pipa-pipa didih harus diperhitungkan dengan teliti terutama jangan terlalu lambat.

### 2.3.2. Ketel Uap Pipa-pipa Air Sirkulasi Paksa

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

## Generator Uap Lokomotif

Maka sirkulasi di dalamnya terpaksa dilakukan dengan bantuan pompa. Pada dasarnya ketel uap pipa-pipa air sirkulasi paksa dapat dibagi menjadi

### 1. Ketel Uap Pipa-pipa Air Berpompa langsung

Ketel uap berpompa langsung tidak menggunakan tangki ketel tempat memisahkan uap dan air sehingga air yang dipompakan langsung masuk ke dalam pipa-pipa didih dan seluruhnya berubah menjadi uap. Di dalam hal ini kapasitas air yang dipompakan sama dengan uap yang dihasilkan ketel uap tersebut. Pompa air isian berfungsi juga sebagai pompa sirkulasi. Kontruksi ketel menjadi lebih ringan dan dalam ketel menjadi lebih ringan dan dalam ketel menjadi lebih kecil, laju air isian dan udara masuk ketel maka ketel ini harus dilengkapi dengan alat control otomatis yang peka dan tanggap terhadap kondisi ketel. Karena dalam ketel ini batas pipa-pipa yang masih dibasahi dan yang tidak dibasahi aliran air kurang jelas maka dalam perencanaan diperlukan kualitas bahan pipa yang lebih baik.

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

## 2. Ketel Uap pipa-pipa air berpompa keliling

Ketel uap jenis ini mempunyai tangki tempat untuk memisahkan air dan uap. Air yang mengalir dalam pipa-pipa dididih hanya berubah menjadi uap di dalam tangki ketel airnya disirkulasikan kembali.

Dibandingkan dengan ketel uap pipa-pipa berpompa langsung, ketel ini membutuhkan waktu yang lebih lama untuk pemanasan awal karena volume air lebih besar maka ketel ini tidak mengharuskan pengaturan laju pembakaran, laju air isian dan udara masuk ketel secara otomatis seperti pada ketel berpompa langsung. Pengaturannya bias dilakukan dengan system manual atau otomatis.

Karena tidak semua air menguap maka seluruh pipa-pipa dididih masih dibasahi air sehingga dalam perencanaan ketel ini dapat menggunakan pipa-pipa dididih dari bahan yang lebih murah namun dengan adanya tanki pemisah uap dan air, konstruksi ketel lebih berat. Kelemahan lainnya adalah masih menggunakan pompa untuk sirkulasi air dalam pipa-pipa.

### 2.3.3 Beberapa macam ketel uap pipa-pipa air

#### a. Ketel uap seksi ( Section Boiler) dan variannya

Dari gambar di bawah ini terlihat adanya sebuah drum ketel yang berdiameter sekitar 120-160 cm. Dari dasar drum ketel ini terdapat pipa-pipa turun (down comers pipes) yang berdiameter sekitar 10 cm.

Pipa-pipa turun tersebut berakhir dibawah pada kotak-kotak seksi yaitu berupa kotak air yang dibuat berkelok-kelok dan pada setiap lekukan tersebut terdapat pipa-pipa penguap air atau daerah konveksi. Api atau gas asap mengalir diantara pipa-pipa dan menyerahkan panasnya.

## Generator Uap Lokomotif

Satu perangkat ketel uap seksi terdiri dari :

- Sebuah pipa air turun (down corners pipes)
- Sepasang kotak seksi air dan kotak seksi uap
- Sejumlah pipa-pipa penguap air
- Sejumlah pipa – pipa uap naik

Sehingga dengan demikian satu set seksi tersebut merupakan sebuah ketel mini yang masing-masing terpisah antara yang satu dengan yang lain, sehingga ketel ini disebut dengan ketel seksi

### b. Ketel Uap Yarrow

Ketel ini banyak digunakan dikapal-kapal laut namaun ada juga yang didarat sebagai pembangkit uap untuk etekanan kerja maksimal ketel yarrow tidak melebihi 80 kgf/cm<sup>2</sup> kapasitasnya antara 30 – 80 ton/ jam Pada ketel ini terdapat sebuth drum ketel yang dipasang diatas. Dari drum dengan dua buah drum bawah, dengan sudut kemiringan pipa-pipa penguap air lebih dari 20°

Dua baris pipa-pipa penguap air yang paling bawah yang menghubungkan drum-drum bawah dengan drum utama diatas menerima panas dari api selain secara konveksi juga secara radiasi. Makin keatas pipa-pipa penguap air tersebut makin kurang menerima panas sehingga baris-baris pipa sebelah atas kurang memuai dibandingkan dengan yang ada dibagian bawah.

Karena berkas pipa-pipa penguap air bagian atas kurang mendapatkan panas maka air yang agak dingin akan turun dari drum atas kebawah melalui berkas pipa-pipa penguap air bagian atas.

## Generator Uap Lokomotif

### c. Ketel Uap Pancaran

Pipa-pipa penguap ketel pancaran ini, keseluruhannya menerima panas secara pancaran dari api didalam tungku sehingga pipa-pipa penguap ketel pancaran ini merupakan dinding tungku keseluruhannya. Dengan demikian, dinding tungku disebelah dalam akan dilapisi dengan pipa-pipa penguap tersebut dari besarnya fraksi pendinginan yang disesuaikan dengan bahan bakar yang digunakan didalam tungku.

## **BAB III**

### **PERANCANGAN KETEL UAP**

#### **3.1 Dasar Perancangan**

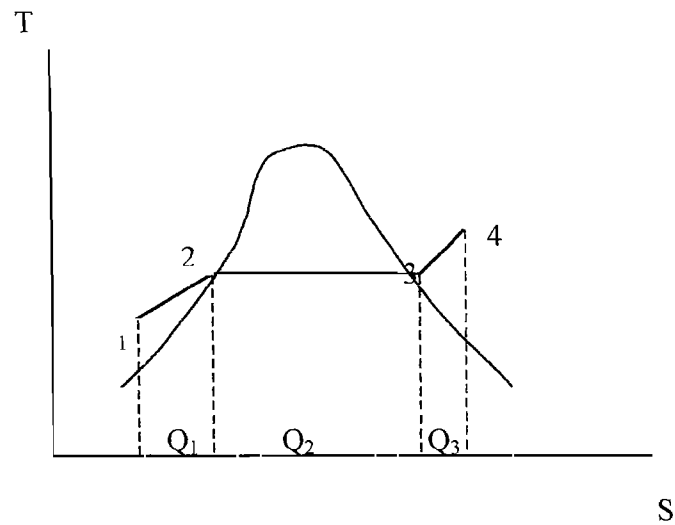
Dalam perancangan ketel ini akan direncanakan sebuah ketel uap dengan data-data sebagai berikut :

1. Daya yang dihasilkan : 60 PK
2. Tekanan kerja : 17 Bar ( 17.34 Kg/cm<sup>2</sup>)
3. Bahan Bakar : Batubara

#### **3.2 Proses Terbentuknya Uap**

Proses pembentukan uap yang terjadi pada ketel ini dapat diuraikan sebagai berikut :

Mula-mula tangki diisi dengan air pada temperatur  $T_1$ , kemudian tangki dipanasi sehingga temperatur dalam tangki akan naik mencapai titik didih pada temperatur  $T_2$  sehingga air akan mendidih dan terbentuk uap. Uap yang terbentuk pada temperatur didih ini disebut sebagai uap jenuh (saturated steam) . Selama tekanan tangki tetap maka setiap pemberian panasnya hanya akan berakibat menguapnya air tanpa menaikkan temperatur didihnya. Setelah uap pada temperatur didih dialirkan pada pipa lorong api lalu dialirkan ke pipa panas lanjut uap jenuh tersebut akan menjadi uap panas lanjut dengan menaikkan suhu  $T_4$  dan tekanan pada pipa panas lanjut.



Gambar 1.1 Siklus termodinamika

### 3.4 Sirkulasi Air Ketel

Pada ketel uap lokomotif sirkulasi air terjadi karena adanya perbedaan berat jenis yang diakibatkan perbedaan suhu karena pembakaran air yang bersuhu tinggi terjadi pada air yang paling dekat dengan kelling permukaan lorong api dan pipa – pipa api, air tersebut bergerak keatas menuju permukaan air didalam silinder ketel tersebut, sedangkan air bersuhu lebih rendah akan bergerak turun kedua bagian samping dekat permukaan dalam silinder ketel di sepanjang silinder tersebut. Hal ini dapat disimpulkan bahwa air yang bersuhu tinggi berat jenisnya lebih kecil dibandingkan dengan air yang bersuhu rendah. Proses ini berlangsung terus selama pemanasan tetap dilaksanakan.

### 3.5. Spesifikasi Generator Uap Lokomotif

Berdasarkan data yang diperoleh bahwa sebuah generator uap lokomotif (locomotiv boiler) agar dapat berfungsi sebagai alat transportasi dan mampu menarik sejumlah gerbong maka harus memiliki daya yang cukup besar. Maka berdasarkan survei daya yang telah dilakukan didapat bahwa generator uap memiliki daya sebesar 60 PK ( 60,8 HP) sehingga dari data-data yang didapat dapat diketahui daya dari generator uap itu sendiri yang kemudian dapat diterjemahkan dalam kapasitas uap yang dihasilkan tiap jamnya dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

dengan :

$$P_{out} = 60,8 \text{ HP}$$

Efisiensi ( $\eta$ ) untuk ketel ini adalah 80 %

Maka

$$P_{in} = 60,8 / 0,8$$

$$= 76,01 \text{ HP ( 56680,657 W)}$$

Sehingga kalau daya ini dikonversi ke KJ menjadi

56,680 kJ/s dikonversi menjadi 204048kJ kJ/ Jam

Maka dari rumus :

$$\dot{Q} = \dot{m}_a (h_4 - h_1)$$

dengan :

$h_1$  = entalpi uap pada saat air masuk ketel 125,79 kJ/Kg Sumber dari



tabel lampiran 1

$h_4$  = entalpi uap panas lanjut 2828.067 kJ/kg Sumber diambil dari tabel lampiran 3

$Q$  = Kalor yang dihasilkan dari daya ketel 96.008 kJ/s maka :

$$204048 \text{ kJ/jam} = m_a (2828.067 - 125.79) \text{ kJ / kg}$$

$$m_a = 75.509 \text{ kg /jam}$$

### 3.5 Kebutuhan Kalor Ketel Uap

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

$$Q = m_a (h_2 - h_1)$$

Dengan

$Q$  = Kalor yang dibutuhkan tiap jam

$m_a$  = Keluaran uap tiap jam

$h_1$  = Entalpi pada awal proses

$h_2$  = Entalpi pada akhir proses

maka kalor yang dibutuhkan setiap jam pada ketel uap untuk suhu awal ( $t_1$ ) = 30°

C pada tekanan 1 atm dari tabel lampiran1 entalphi didapatkan

$h_1 = 125.79 \text{ kJ / Kg}$ ,  $t_{\text{sat}} 205^\circ \text{ C}$  pada tekanan 1,7 Mpa entalpi  $h_2 = 875.04 \text{ kJ/kg}$

adalah :

$$Q_1 = m_a (h_2 - h_1)$$

$$= 75.059 ( 875.04 - 125.79 )$$

$$= 56575,118 \text{ kJ/ jam}$$

## Generator Uap Lokomotif

Kalor yang dibutuhkan untuk mengubah air menjadi uap jenuh dengan harga  $h_2 = 875.04$  kJ/Kg dan  $h_3 = 2796$  kJ/Kg harga  $h_3$  diambil dari tabel lampiran 2, di dapatkan nilai kalor yang dibutuhkan

$$\begin{aligned} Q_2 &= m_a ( h_3 - h_2 ) \\ &= 75.509 (2796 - 875.04) \\ &= 145049.76 \text{ Kj/Jam} \end{aligned}$$

sedangkan kalor yang dibutuhkan untuk superheater pada tekanan 1,7 Mpa didapatkan dan dipanaskan lanjut pada suhu  $215^\circ \text{C}$  entalpi  $h_4 = 2828.063$  kJ/Kg

$$\begin{aligned} Q_3 &= m_a (h_4 - h_3) \\ &= 75.509 (2828.062 - 875.04) \\ &= 147470.738 \text{ kJ/Jam} \end{aligned}$$

## BAB IV

### PEMBAKARAN BAHAN BAKAR

#### 4.1 Klasifikasi Bahan Bakar

Pembakaran (oksidasi) ialah proses yang berlangsung pada temperature tertentu dengan kecepatan reaksi yang tinggi dan menghasilkan panas. Proses pembakaran bahan bakar pada ketel uap dilakukan diruang bakar. Hasil pembakaran bahan bakar di ruang bakar akan digunakan sebagai pemanas air dalam ketel. Berdasarkan jenis bahan bakar digolongkan menjadi 3 jenis bahan bakar yaitu :

##### 1. Bahan Bakar Cair

Bahan bakar cair didapat dari minyak bumi. Minyak bumi (crude oil) yang berwarna coklat tua sampai kehitaman terdiri dari campuran berbagai macam persenyawaan zat cair, arang ( C dan H) yang terbagi menjadi jenis- jenis :

- a. Yang bersifat Parafinis (Parafinic base) ialah persenyawaan zat air arang yang membentuk rantai yang panjang atau sering disebut sebagai persenyawaan Alifatis, yang terdiri dari Alkan  $C_nH_{2n+2}$  atau Alkin  $C_nH_{2n}$  .
- b. Yang bersifat Naphtenis (Naptenic base) ialah persenyawaan zat air arang yang membentuk Siklis atau Aromat  $C_nH_{2n+6}$  atau Cyclan  $C_nH_{2n}$

Minyak bumi ( crude oil) hanya digunakan sebagai minyak bakar langsung didalam ketel-ketel uap bial sedikit sekali mempunyai kandungan- kandungan persenyawaan zat air arang dengan titik atau temperature mendidih rendah.

## Generator Uap Lokomotif

Kandungan karbon tertinggi ( C ) dalam minyak bakar lebih dari 85% sedangkan kandungan Hidrogen ( H ) sekitar 11,1 %

### **2. Bahan Bakar Gas**

Di dalam tanah banyak terdapat kandungan gas bumi ( Petrol gas ) atau sering pula disebut dengan Gas alam, yang timbul pada saat proses pembentukan minyak bumi, gas tambang dan gas rawa ( CH<sub>4</sub> atau metan)

Keuntungan -- keuntungan dari penggunaan gas alam

- a. Penggunaan gas alam lebih murah dibandingkan dengan penggunaan bahan bakar padat dan bahan bakar cair
- b. Peralatan pembakar untuk gas alam jauh lebih sederhana karena tidak memerlukan pengabut ataupun pembakar dari minyak bakar lainnya.
- c. Pembakaran dengan gas akan berlangsung lebih sempurna dibandingkan dengan minyak bakar ataupun bahan bakar padat lainnya. Pembakaran dengan gas tidak menyebabkan polusi.
- d. Ketel uap dengan menggunakan bahan bakar gas lebih awet karena bahan bakar gas tidak mengandung belerang, Natrium dan Vanadium.
- e. Biaya oprasi dan biaya perawatan untuk ketel uap yang menggunakan bahan bakar gas alam jauh lebih murah.

Keterbatasan-keterbatasan dari ketel uap dengan bahan bakar gas:

- a. Lokasi ketel uap harus disekitar lokasi penambangan gas alam atau setidaknya dalam jangkauan ekonomis transmisi pipa-pipa gas alam.

## Generator Uap Lokomotif

- b. Untuk lokasi ketel jauh dari sumber gas alam ataupun jangkauan ekonomi pipa gas diperlukan pengolahan air isian ketel yang akan lebih menambah biaya pengolahan air.
- c. Diperlukan investasi yang lebih besar untuk peralatan pengaturan dan instalasi pengaman.

### 3. Bahan bakar padat ( solid fuel)

Bahan bakar padat digolongkan menjadi dua golongan yaitu :

- a. Bahan bakar padat alami yaitu bahan bakar yang didapat dari alam dan dapat dimanfaatkan secara langsung, antara lain : kayu, batubara
- b. Bahan bakar padat buatan bahan bakar yang dalam pemanfaatannya perlu diadakan pengolahan terlebih dahulu, antara lain : arang kayu, kokas

Untuk dapat melakukan pembakaran, diperlukan beberapa unsur antara lain :

- a. Bahan bakar
- b. Oksigen
- c. Temperatur lingkungan
- d. Waktu untuk proses pembakaran
- e. Kerapatan yang cukup untuk merambatkan nyala api

Bahan bakar padat yang terdapat di bumi kita ini berasal dari zat-zat organik. Unsur-unsur penyusun dari pembakaran antara lain : zat arang atau karbon (C) , Hidrogen (H) , zat asam atau Oksigen (O) , zat lemas atau Nitrogen(N) , Belerang (S) , abu dan Air yang semuanya terikat dalam satu unsure persenyawaan kimia .



Jika semua unsur diatas telah terpenuhi maka proses pembakaran dapat berlangsung. Dalam proses pembakaran ini bisa terjadi pembakaran sempurna dan pembakaran tidak sempurna

Pembakaran sempurna semua unsure penyusun bahan bakar bereaksi dengan oksigen, dan menghasilkan panas yang optimum. Unsur penyusun bahan bakar yang terpenting adalah unsur C (karbon). Dalam pembakaran sempurna ini seluruh unsure C yang bereaksi dengan  $O_2$  akan berubah menjadi  $CO_2$ , sedangkan pada pembakaran tak sempurna, senyawa hidrokarbon yang bereaksi dengan  $O_2$  berubah menjadi CO ( karbon monoksida) . Tanda-tanda lain pembakaran tak sempurna ialah munculnya jelaga yang terbawa oleh asap-asap.

Penyebab terjadinya proses pembakaran tak sempurna ini adalah karena kurangnya pasokan udara dalam hal ini  $O_2$  dan kurang baiknya kontak unsure-unsur penyusun bahan bakar dengan Oksigen. Untuk menghindari pembakaran tidak sempurna harus diusahakan agar tersedia udara yang mencukupi untuk proses pembakaran dan memaksimalkan kontak unsur- unsur penyusun bahan bakar dengan udara.

Bahan- bakar padat mempunyai nilai pembakaran tertinggi Q High dan nilai pembakaran bawah Q Low. Nilai pembakaran tertinggi ( highest heating Value ) yang dalam hal ini uap air yang terbentuk dari hasil pembakaran dicairkan dahulu, sehingga panas pengembunannya turut dihitung serta dinilai sebagai panas pembakaran yang terbentuk.

Sedangkan Q Low nilai pembakaran terendah (lowest heating value) uap air yang terbentuk dari hasil pembakaran tidak perlu dicairkan dahulu, sehingga panas

pengembunannya tidak ikut serta untuk diperhitungkan sebagai panas pembakaran bahan bakar tersebut.

#### **4.2 Yang perlu diperhatikan agar terjadi pembakaran yang sempurna**

1. Volatile matter (kandungan zat yang mudah menguap )

Didalam bahan bakar padat , terkandung sejumlah zat-zat yang mudah menguap yang antara lain terdiri dari Hidrogen dan zat-zat arang. Atau zat-zat yang mudah menguap yang akan terbakar setelah bercampur dengan udara pembakar pada temperature yang tinggi sekitar  $1200^{\circ}$  atau  $1473^{\circ}$  K Yang dimaksud dengan zat penguap didalam bahan bakar padat ialah prosentase atau beratdari zat-zat penguap, bila dilakukan distilasi kering terhadap bahan bakar tersebut, tanpa ada hubungan dengan udara pada temperature  $1223$  K dikurangi dengan prosentase berat dari uap air yang turut serta menguap sedangkan sisanya berupa kokas.

2. Temperatur Pencetusan (flashing temperature )

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

3. Temperatur penyalaan ( Ignition Temperatur)

Temperatur pada saat bahan bakar padat ataupun cair akan terbakar, setelah menguapkan zat-zat penguap.

4. Kecepatan Pembakaran

Merupakan kemampuan batubara untuk melakukan pembakaran, apabila batubara dipanasi pada  $723$  K maka akan menguap semua kandungan uap airnya disusul kemudian penguapan dari zat-zat penguap . Persentase

## Generator Uap Lokomotif

kandungan zat-zat penguap berturut-turut 10 – 14 % ; 20 – 30 % ; 40 – 50% maka kecepatan pembakaran batu bara berbanding 2 : 3 : 5

### 5. Ukuran Butiran batu bara

Ukuran butiran batu bara diklasifikasikan sebagai berikut

- a. Bongkahan batubara : lebih dari 80 mm
- b. Butiran I : antara 80 – 50 mm
- c. Butiran II : antara 30 – 50 mm
- d. Butiran III : antara 20 – 30 mm
- e. Butiran IV : antara 10 – 20 mm
- f. Butiran V : antara 5 – 10 mm
- g. Batubara pasir : lebih kecil dari 5 mm
- h. Serbuk batubara : lebih kecil dari 0,075 mm

Makin kecil butirnya, makin cepat pembakarannya.

### 6. 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 teringgal setelah berlangsungnya proses penguapan.

### 7. Kadar Abu

Kadar abu yang tinggi didalam batubara tidak mempengaruhi proses pembakaran batubara itu sendiri, namun dapat memperbesar kerugian-kerugian yang disebabkan terdapatnya sejumlah bahan bakar yang



terbuang bersama-sama dengan abu, dan juga dapat menimbulkan kerak-kerak pembakaran.

8. Kadar Air

Kadar air didalam batubara menjadi bertambah pada saat proses pencucian batubara sehabis penambangannya. Bertambahnya kadar air di dalam batubara juga dapat disebabkan karena penimbunan batubara di udara terbuka atau bila-butiran-butiran batubara makin halus. Semakin tinggi jumlah kadar air dan abu didalam batubara akan menurunkan Nilai Pembakaran (heating value) dari batubara tersebut.

9. Sifat Membara Sendiri dan Merusak Sendiri (Broeien)

Proses merusak sendiri berlangsung kerana batubara ditumpuk, ditimbun atau dionggokkan secara terbuka di udara bebas untuk jangka waktu yang cukup lama. Hal ini terjadi karena penimbunan batubara di udara terbuka atau bila butiran-butiran batubaranya makin halus.

Nilai pengakaran (heating value) batubara dengan demikian menjadi menurun dan pengaruhnya besar terhadap kemampuan menggumpalnya batubara.

10. Kemungkinan Penggerusan Batubara atau Grindability

Untuk pembakaran batubara serbuk diperlukan waktu hanya beberapa detik, untuk itu butiran-butiran batubara harus mempunyai bidang singgung yang cukup luas dengan udara pembakar, sehingga pada saat disemburkan ke dalam tungku harus dalam keadaan halus.

### 4.3 Dapur pembakaran batubara

Ada empat macam system pembakaran batu bara

#### 1. Dapur Kisi (Stoker Furnace)

Cara pembakaran tertua untuk membakar bongkahan batu bara diatas kisi untuk mendapatkan pembakaran sempurna dibuat system udara primer dan skunder.

#### 2. Dapur Bubuk Batu Bara

Dapur siklon adalah suatu system yang melayani sejumlah ruang bakar independent (independent Combustion Chambers) Untuk station pembangkit yang besar (large power plant) meliputi 10 ruang bakar dan semuanya mensuplai gas panas untuk ketel. Batu bara yang sudah dipecah-pecah beserta udara primer masuk kedalam combustion chamber yang kecil dan udara skunder dimasukkan pula kedalam ruang silinder yang besar dan diisolasi. Sejumlah udara kecil (tercier air) dimasukkan dalam pusaran cyclone untuk mengatasi kevakumman.

#### 3. Dapur Bantalan Udara ( Fluidized -- bed Combustion System)

Dapur bantalan udara adalah system pembakaran batubara bongkah, abu dan dolomite (batu kapur bongkah) yang dicampur dalam satu bantalan yang diambangkan oleh udara pembakaran bertekanan tinggi yang masuk dari bawah.

#### 4. Dapur Siklon (Cyclone Furnace)

Dapur siklon adalah suatu sistem yang melayani sejumlah ruang bakar independent ( Independent Combustion Chambers), untuk station pembangkit yang besar (large power plant) meliputi 10 ruang bakar dan semuanya mensuplai gas panas untuk ketel. Batu bara yang sudah dipecah-pecah beserta udara primer masuk secara tangensial ke dalam combustion chamber yang kecil dan udara sekunder dimasukkan tangensial pula ke dalam ruang silinder besar yang diisolasi. Sejumlah udara kecil ( tertiary air) dimasukkan dalam pusaran cyclone untuk mengatasi kevakuman.

#### 4.4 Nilai Pembakaran

Nilai pembakaran adalah energi panas yang dilepaskan persatuan massa atau volum pada waktu terjadi oksidasi unsure-unsur kimia dalam bahan bakar. Nilai pembakaran ditentukan oleh kapasitas kandungan unsure didalam bahan bakar padat seperti terdapat dalam uraian di atas .

Dalam perancangan ketel uap ini bahan bakar yang digunakan adalah bahan bakar padat jenis batubara Anthracite dengan pertimbangan bunga api pendek , berwarna biru dan kokas seperti bubuk.

Untuk menentukan banyaknya energi yang diperlukan untuk mengubah air menjadi uap didalam generator uap, maka terlebih dahulu komposisi bahan bakar yang digunakan untuk generator uap lokomotif yang telah direncanakan, yaitu :

Persentase komposisi batubara bukit asam yang diambil dari buku Ketel Uap P.T. Pradnya Paramita, hal 42 dengan komposisi :

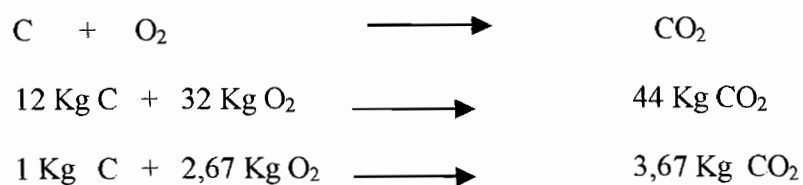
Tabel 4.1 Komposisi kandungan dalam batubara bukit asam.

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

Proses pembakaran adalah suatu reaksi kimia antara bahan bakar dengan oksigen yang diperoleh dari udara bebas dan menghasilkan unsur bahan bakar yaitu proses pembakaran sempurna tiap 1 kg oksigen yang dibutuhkan untuk pembakaran C dan H dalam 1 kg bahan bakar.

Reaksi yang terjadi dalam pembakaran tersebut adalah sebagai berikut :

Karbon ( C ) terbakar sempurna menjadi CO<sub>2</sub> menurut persamaan :

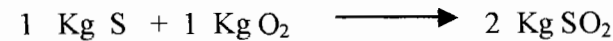


Jadi setiap 1 Kg karbon pembakaran 1 Kg Karbon ( C ) dibutuhkan Oksigen( O<sub>2</sub> ) sebesar 2,67

Hydrogen ( H ) terbakar sempurna menjadi H<sub>2</sub>O menurut persamaan :



Belerang ( S ) terbakar sempurna menjadi SO<sub>2</sub> menurut persamaan :



Maka dari komposisi diatas dapat dihitung nilai pembakaran atas ( $Q_{High}$  )

$$\begin{aligned} Q_{High} &= 33915 \text{ C} + 144033 (\text{H} - \text{O}/8) + 10468 \text{ S} \quad 2 \\ &= 33915 (0,053) + 144033 (0,058 - 0,02/8) + 10468 (0,005) \\ &= 27205,625 \text{ kJ/kg} \\ Q_{Low} &= 33915 \text{ C} + 121423 (\text{H} - \text{O}/8) + 10468 \text{ S} - 2512 (9 \times \text{O} / 8) \\ &= 33915 (0,635) + 121423 (0,058 - 0,02/8) + 10468 (0,005) - \\ &\quad 2512 (9 \times 0,02/8) \\ &= 11035,49 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

#### 4.5 Kebutuhan Bahan Bakar

Sebagai syarat utama pembakaran adalah terseciannya bahan bakar. Pada perancangan ini jumlah bahan bakar yang dibutuhkan per jam adalah

$$M_b = \frac{M_u (h_4 - h_1)}{\eta_k (Q_{low})}$$

dengan

## Generator Uap Lokomotif

$M_b$  = Massa bahan bakar tiap jam (kg/jam)

$M_u$  = Massa uap air yang direncanakan ( kg/jam)

$h_1$  = Harga entalpi air masuk ketel (kJ/kg)

$h_4$  = Harga entalpi uap panas lanjut (kJ/kg)

$\eta_k$  = Efisiensi ketel

= 75 % - 80 % untuk ketel uap lokomotif ( Carl D. Shield 1961 hal 25 )

maka :

$$\begin{aligned} M_b &= \frac{75.509(2828.062 - 125.79)}{0.8(1035.49)} \\ &= \frac{204045.856}{828.39} \\ &= 246.32 \text{ kg/jam} \end{aligned}$$

### 4.6 Kebutuhan Udara Untuk Pembakaran

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

Pada dasarnya bahan bakar terdiri 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 dari 21 % O<sub>2</sub> dan 79 % N<sub>2</sub> sedangkan persentase dalam beratnya, udara tersusun dari 23 % O<sub>2</sub> dan 77 % N<sub>2</sub>.

## Generator Uap Lokomotif

Sehingga secara umum kebutuhan oksigen secara teoritis untuk pembakaran dapat dihitung dengan menggunakan rumus ( Ir. MJ. Djokosetyarjo, Ketel Uap. PT. Pradnya Paramita, hal 72)

$$W_{o_2} = 2,6C + 7,94H_2 + 0,998S$$

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

$$\begin{aligned} W_{o_2} &= 2,67(0,635) + 7,94(0,058) + 0,998(0,005) \\ &= 2,16 \text{ kg / kg bahan bakar} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} M_{ut} &= \frac{W_{o_2}}{23,15\%} \\ &= \frac{2,16}{23,15\%} \\ &= 9,334 \text{ kg udara/kg bahan bakar} \end{aligned}$$

Untuk menjamin pembakaran bahan bakar dengan sempurna maka perlu digunakan udara tambahan sebesar 40 % ( dari total excess air ), jadi kebutuhan udara untuk pembakaran adalah ( Ir.MJ. Djokosetyarjo, ketel Uap, PT. Pradnya Paramita, hal 72 )

$$\begin{aligned} M_u &= M_{ut} \times M \\ &= 9,334 \times 1.4 \\ &= 13.06 \text{ kg udara/kg bahan bakar} \end{aligned}$$

sehingga kebutuhan udara untuk pembakaran bahan bakar yang digunakan ( $W_u$ ) adalah (Ir.MJ. Djokosetyarjo, ketel Uap, PT. Pradnya Paramita, hal 75)

$$\begin{aligned}W_u &= M_b \times M_u \\ &= 246.32 \text{ kg/jam} \times 13.06 \text{ kg udara/kg bahan bakar} \\ &= 3216.88 \text{ kg udara/ jam}\end{aligned}$$

#### 4.7 Gas Hasil Pembakaran

Dari hasil pembakaran maka dapat dihitung masa gas asap yang terbentuk tiap jamnya. Komposisi unsur bahan dengan persamaan sebagai berikut (Babcock and Wilcox , steam its Generation and use, hal 6 )

$$\begin{aligned}\text{CO}_2 &= 3,67 \text{ C} \\ &= 3,67 \times 0,635 \\ &= 2.330 \text{ Kg udara/ Kg Bahan bakar}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{H}_2\text{O} &= 8,94 \times \text{H}_2\text{O} \\ &= 8,94 \times 0,09 \\ &= 0.6085 \text{ kg/kg bahan bakar}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{SO}_2 &= 8,86 \text{ C} + 26,41 \left(\text{H} - \frac{\text{O}_2}{8}\right) + 3,2 \text{ S} + \text{N}_2 \\ &= 8.86 (0,635) + 26,41(0,058 - (0,152/8)) + 3,2 \times 0,05 + 0,1 \\ &= 9,5741 \text{ kg/kg bahan bakar}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{O}_2 &= 0,15 \times \text{kebutuhan udara teoritis} \\ &= 0,15 \times 9,334 \\ &= 1,4 \text{ kg/kg bahan bakar}\end{aligned}$$



## Generator Uap Lokomotif

Abu = 0,05 kg/kg bahan bakar

Maka jumlah keseluruhan ( $W_g$ ) adalah 13,96 kg/kg bahan bakar. Jika dikomposisi tersebut dinyatakan dalam kg mol / kg bahan bakar maka :

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &= \frac{2.3305}{44} \\ &= 0,05297 \text{ kg mol/kg bahan bakar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{O} &= \frac{0.608}{18} \\ &= 0.003 \text{ kg mol / kg bahan bakar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{N}_2 &= \frac{9.334}{28} \\ &= 0.3338 \text{ kg mol / kg bahan bakar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{O}_2 &= \frac{1,4002}{32} \\ &= 0.04376 \text{ kg mol/kg bahan bakar} \end{aligned}$$

maka jumlah komposisi bahan bakar adalah 0.465 kg mol /kg bahan bakar.

Sehingga untuk pemakaian bahan bakar sebesar ( $M_b$ ) = 417,22 kg/jam akan menghasilkan gas sebesar ( Ir. MJ. Djokosetyardjo, Ketel Uap P.T. Pradnya Paramita, hal 75)

$$\begin{aligned} M_g &= M_b \times W_g \\ &= 246.32 \times 13,96 \\ &= 3438.515 \text{ kg/jam} \end{aligned}$$

Pembakaran berlangsung dengan tekanan konstan, sehingga panas yang ditimbulkan dapat dihitung dengan mengalikan volume gas asap dengan harga

## Generator Uap Lokomotif

entalpi dengan unsur-unsurnya dengan menggunakan rumus ( MM.EL. Wakil, Instalasi Pembangkit Daya I, Jakarta 1992, hal 119 )

$$H_{tc} = \text{Mol CO}_2 \times H(\text{CO}_2) + \text{Mol H}_2\text{O} \times H(\text{H}_2\text{O}) + \text{Mol N}_2 \times H(\text{N}_2) + \text{Mol O}_2 \times H(\text{O}_2)$$

Direncanakan temperatur pembakaran bahan bakar  $H_{ts} = 300 \text{ K}$  dengan menggunakan persamaan diatas dan dengan menggunakan tabel entalpi :

$$\begin{aligned} H_{tc} &= 0,05296 \times 69 + 0,0388 \times 62 + 0,3338 \times 54 + 0,04376 \times 54 \\ &= 24.23 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

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

$$H_{ts} - H_{tc} = Q_{low}$$

$H_{ts}$  merupakan harga temperatur pembakaran bahan bakar pada suhu 1000 K

Maka didapatkan entalpi pembakaran untuk masing-masing atom

$H_{ts}$  untuk :

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &= 0,05297 \times 33397 \\ &= 1692.7040 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{O} &= 0,03381 \times 26000 \\ &= 879.06 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{N}_2 &= 0,3338 \times 56137 \\ &= 18738.53 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{O}_2 &= 0,04376 \times 22703 \\ &= 993.48 \text{ kJ/Kg} \end{aligned}$$

$$H_{ts} = 10004.87 \text{ kJ/kg}$$

## Generator Uap Lokomotif

Pembakaran pada suhu 1100 K maka dapat dihitung entalpi pembakaran dengan cara

$$\begin{aligned}\text{CO}_2 &= 0,05297 \times 38884 \\ &= 2059.68 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{H}_2\text{O} &= 0,03381 \times 30191 \\ &= 1020.76 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{N}_2 &= 0,3338 \times 24760 \\ &= 1897.43 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{O}_2 &= 0,04376 \times 26212 \\ &= 8264.88 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$H_{ts} = 11562.82 \text{ KJ/Kg}$$

$$H_{ts} - H_{tc} < Q_{low}$$

$$10004.87 - 24.23 = 9980.64 < Q_{low}$$

karena lebih kecil dari  $Q_{low}$  maka dengan cara interpolasi dapat dihitung temperatur pembakaran :

$$\begin{aligned}T_c &= 1000 + \frac{1100 - 1000}{11562.82 - 10014.87} \times [Q_{low} - 10014.87] \\ &= 1031.60 \text{ K}\end{aligned}$$

Temperatur gas asap yang terbentuk di dalam tungku jika panas yang terbentuk seluruhnya diberikan kepada gas asap

$$\begin{aligned}T_g &= 11035.49 \text{ kJ/kg K} : 13.96 \text{ kJ/kg} \\ &= 790.47 \text{ K}\end{aligned}$$

## **BAB V**

### **DIMENSI KETEL**

#### **5.1 Pengertian perpindahan panas**

Panas yang dihasilkan karena pembakaran bahan bakar dan udara, yang berupa api dan gas asap dipindahkan kepada air, uap ataupun udara, melalui bidang yang dipanaskan atau Heating Surface, pada suatu instalasi ketel uap dengan 3 cara :

Dengan cara pancaran (radiasi )

Dengan cara aliran (konveksi )

Dengan cara perambatan ( konduksi)

#### **Perpindahan Panas Pancaran (Radiasi)**

Perpindahan panas antara satu benda ke benda yang lain dengan jalan melalui gelombang-gelombang elektromagnetik Perpindahan panas secara radiasi dipancarkan secara lurus, apabila lintasan terhalang oleh bidang atau sesuatu benda maka bidang/ benda tersebut tidak akan memperoleh panas secara pancaran. Sebagian panas yang dihasilkan dari pembakaran tersebut, diserahkan kepada Aether, dan yang akan menyerahkan lebih lanjut melalui gelombang-gelombang Elektromagnetik kepada benda ataupun bidang yang akan dipanasi, semua zat-zat yang memancarkan panasnya (molekul-molekul api atau gas asap ) intensitas radiasi thermisnya atau bidang, sebagian dari panas pancaran yang diterima benda tersebut akan dipancarkan kembali atau diapntulkan dan sebagian

yang lain dari panas pancaran tersebut akan diserap.

Konstanta pancaran yang diterima benda ditentukan oleh :

Keadaan permukaan bidang yang dipanasi, kasar , halus

Bahan benda yang dipanasi : besi, tembaga, aluminium

Warna bidang benda yang dipanasi : hitam, abu-abu, putih ; dll

### **Perpindahan Panas Konveksi**

Perpindahan panas konveksi terjadi karena adanya perbedaan suhu dan dialirkan melalui penghantar yang bergerak baik itu oleh molekul fluida cair ataupun gas.

Molekul- molekul fluida tersebut dalam gerakkannya melayang kesana kemari membawa sejumlah panas masing-masing. Pada saat molekul fluida menyentuh dinding ketel maka panasnya dibagikan sebagian, yaitu  $q_1$  joule kepada dinding ketel, selebihnya yaitu  $q_2 = q - q_1$  joule dibawa pergi.

Perpindahan panas konveksi berdasarkan terjadinya dibagi menjadi 2 yaitu :

a. Perpindahan panas konveksi bebas

Perpindahan panas yang terjadi karena adanya perbedaan suhu / temperature fluida

b. Perpindahan panas konveksi paksa

Perpindahan panas yang terjadi karena adanya kekuatan mekanis ( karena dihembus fan atau karena dipompa)

Dalam gerakkannya molekul-molekul api tersebut tidak perlu melalui lintasan yang lurus untuk mencapai dinding ketel atau bidang yang dipanasi.

Jumlah panas yang berpindah secara konveksi ( $Q_k$ ) (Perpindahan panas Frank Kreith halaman 11)

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

Dengan :

$\alpha$  = Konstanta perpindahan panas konveksi ( Watt /m<sup>2</sup> K)

A = Luas bidang yang diapanasi ( m<sup>2</sup> )

T = Temperatur ( K)

### 5.1.3 Perpindahan Panas Konduksi

Perpindahan panas secara perambatan atau konduksi adalah perpindahan panas dari satu bagian benda padat ke bagian benda padat yang lain dari bagian dari benda padat yang sama karena adanya persinggungan fisik tanpa terjadinya perpindahan molekul-molekul dari benda padat itu sendiri.

Didalam dinding ketel tersebut panas akan dirambatkan oleh molekul-molekul didinding ketel sebelah luar yang berbatasan dengan api, menuju ke molekul-molekul dinding ketel sebelah dalam yang berbatasan dengan air, uap ataupun udara. Perambatan panas melalui benda padat menempuh jarak yang terpendek.

### 5.2 Perhitungan Perpindahan Panas pada bagian Ruang Bakar

Pada bagian ruang bakar/lorong api perpindahan panas terjadi dalam beberapa cara antara lain radiasi, konveksi dan konduksi . Tetapi yang paling dominan perpindahan panas secara radiasi dan perpindahan panas yang lain dapat diabaikan.

## Generator Uap Lokomotif

Besarnya panas yang diterima secara radiasi dapat dihitung dengan menggunakan rumus Stefan – Boltzman, sebagai berikut :

$$Q_r = C_z \times \epsilon \times A \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

dengan :

$Q_r$  = Panas yang diterima secara radiasi

$C_z$  = Konstanta Boltzman  $4.5 \text{ kJ/m}^2 \text{ jam K}^4$

$\epsilon$  = Emisivitas bahan dapat dilihat pada tabel 5.1 tabel emisivitas  
0,79

$A$  = Luas bidang yang di panasi (  $\text{m}^2$  )  
 $= (S \times S).5$

$S$  = Sisi kotak api ( direncanakan berbentuk kubus )  
 $= (1,5 \times 1,5)5$   
 $= 11.25 \text{ m}^2$

$T_1$  = Temperatur rata-rata ( K )  
 $= \frac{T_{\text{pembakaran}} + T_{\text{gas asap meninggalkan ruang bakar}}}{2}$

$$= \frac{1031.60 + 790.47}{2}$$

$$= 911.035 \text{ K}$$

$e$  = Emisivitas bahan yang menerima panas radiasi untuk bahan  
silinder 0,79 dari tabel emisivitas bahan tabel 5.1

$T_2$  = Temperatur permukaan yang menerima radiasi panas  
( $T_{\text{didih}} + T_p$ )

$T_p$  = Temperatur permukaan dan titik didih air  $< 50^\circ \text{F}$

$T_2$  =  $478 + 300$

=  $778 \text{ K}$

Maka panas yang diterima secara radiasi pada ruang bakar adalah :

$$Q_r = 4.5 \times 0.79 \times 11.25 \left[ \left( \frac{911.35}{100} \right)^4 - \left( \frac{778}{100} \right)^4 \right]$$

$$= 129\,363.38 \text{ kJ}$$

### 5.3 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

Dari buku Syamsir A Muin pesawat-pesawat konversi energi I hal 48 didapatkan rumus :

$$Q_r = M_b [ Q_{low} \times \eta - ( M_g \times C_{p_g} \times T_g ) ]$$

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

$$= 129\,363,38 \text{ kJ/jam}$$

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

$$= 417,22 \text{ kg/jam}$$

$Q_{low}$  = Nilai pembakaran bawah

$$= 11035.49 \text{ kJ/kg}$$

$\eta_f$  = efisiensi dapur = 0,9 ( asumsi )

$M_g$  = Berat gas asap yang dihasilkan per kg bahan bakar



# Generator Uap Lokomotif

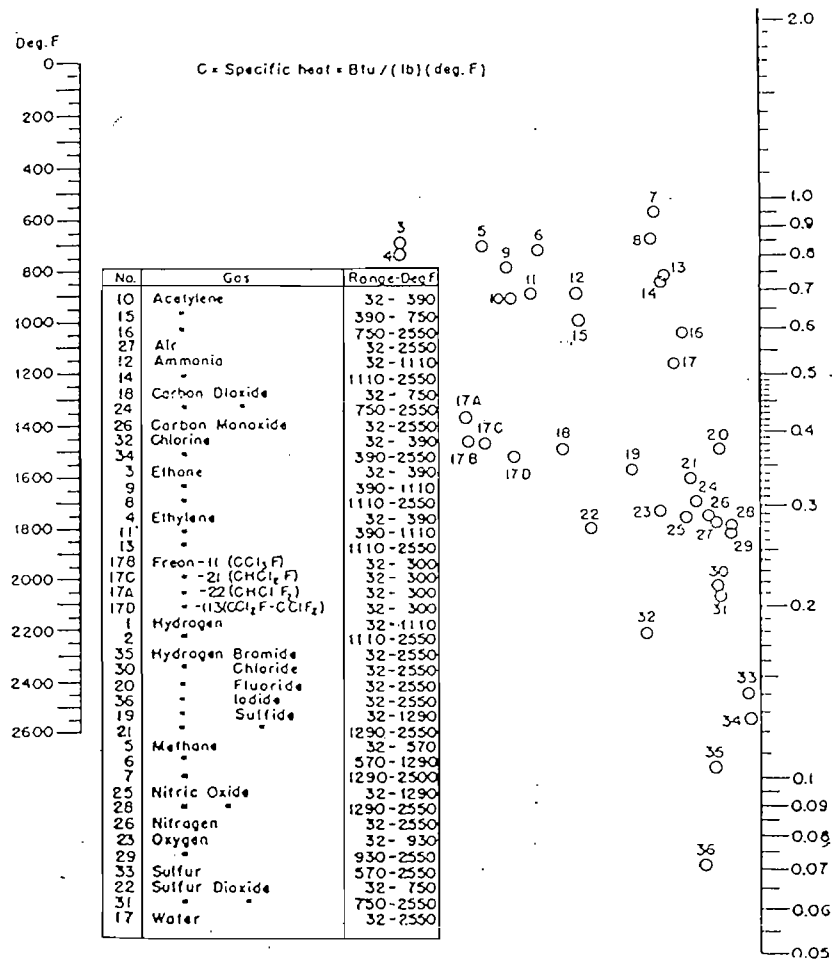
$$= 30.779 \text{ kg/kg bb}$$

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

$$T_g = \text{Temperatur gas asap meninggalkan ruang bakar}$$

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

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



Gambar 4.1. Monogram panas jenis.

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

## Generator Uap Lokomotif

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 Btu / lb<sup>o</sup> F ( 0,737 kJ/kg K)

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

$$129\,363,38 \text{ kJ} = 417,22 \times [ 11035,49 \times 0,9 - ( 13,9733 \times 0,737 \times T_g ) ]$$

$$T_g = 935,07 \text{ K} = 661,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sehingga harga temperatur gas asap meninggalkan ruang bakar diperoleh dengan

$$\begin{aligned} \text{ralat sebesar} &= \frac{934,32 - 790,47}{934,32} \times 100 \% \\ &= 1,53 \% \end{aligned}$$

Karena perbedaannya cukup kecil maka temperatur gas asap meninggalkan ruang bakar sebesar = 790,47 K

### 5.3 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

## Generator Uap Lokomotif

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 :

$$\begin{aligned} Q_{cerobong} &= M_g \times C_{p_{gas}} \times (T_{masuk\ cerobong} - T_{udara\ luar}) \\ &= 30,776 \times 0,31691 \times (533 - 80) \\ &= 405.66 \text{ Btu / jam} \\ &= 407.69 \text{ kJ / jam} \end{aligned}$$

Dan panas yang diterima oleh air melalui dinding pipa api :<sup>17)</sup>

$$\begin{aligned} Q_{pa} &= Q_{kebutuhan} - (Q_r + Q_{superheater} + Q_{cerobong}) \quad \dots\dots\dots(4.6) \\ &= 349095.652 - (129\ 363.38 + 147470.7382 + 407.69) \\ &= 71854.192 \text{ kJ / jam} \end{aligned}$$

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

$$\text{Diameter dalam} = 2,067 \text{ inchi (0,052m)}$$

$$\text{Diameter luar} = 2,375 \text{ inchi (0,060m)}$$

$$\text{Panjang pipa} = 6.05 \text{ m}$$

**Table 3**  
**Normal emissivities,  $\epsilon$ , for various surfaces\***

| Material          | Emissivity, $\epsilon$ | Temp, F   | Description                 |
|-------------------|------------------------|-----------|-----------------------------|
| Aluminum          | 0.09                   | 212       | Commercial sheet            |
| Aluminum oxide    | 0.63-0.42              | 530-930   |                             |
| Aluminum paint    | 0.27-0.67              | 212       | Varying age and Al content  |
| Brass             | 0.12                   | 120-660   | Drill plate                 |
| Copper            | 0.16-0.13              | 1970-2330 | Molten                      |
| Copper            | 0.023                  | 242       | Polished                    |
| Carbonous oxide   | 0.66-0.74              | 1470-2010 |                             |
| Iron              | 0.21                   | 592       | Polished, cast              |
| Iron              | 0.55-0.60              | 1650-1900 | Smooth sheet                |
| Iron              | 0.21                   | 68        | Freshly emersed             |
| Iron oxide        | 0.85-0.89              | 930-2130  |                             |
| Steel             | 0.79                   | 390-1110  | Oxidized at 1100F           |
| Steel             | 0.60                   | 70        | Rollled sheet               |
| Steel             | 0.28                   | 2910-3270 | Molten                      |
| Steel (Cr-Ni)     | 0.11-0.36              | 420-914   | "18-8" rough, after heating |
| Steel (Cr-Ni)     | 0.90-0.97              | 120-680   | "25-20" oxidized in service |
| Brick, red        | 0.93                   | 70        | Rough                       |
| Brick, fireclay   | 0.75                   | 1832      |                             |
| Carbon, lampblack | 0.945                  | 100-700   | 0.0037 or thicker           |
| Water             | 0.95-0.983             | 32-212    |                             |

\* From Hottel

Tabel 5.1 Emisivitas bahan  
( Sumber its generation and use, babcook and wilcox hal 46 )

Perpindahan panas dari gas asap ke air melalui dinding pipa-pipa dapat dijelaskan sebagai berikut :

Pipa-pipa api menerima panas dari gas asap yang mengalir kedalamnya secara konveksi selanjutnya panas tersebut merambat dari permukaan bagian luar pipa yang berbatasan dengan air secara konduksi. Panas dari permukaan dinding bagian luar tersebut dipindahkan ke air secara konveksi.

Laju perpindahan panas yang terjadi dari gas ke air adalah konveksi dan konduksi dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Q = U.A.\Delta tm \quad (\text{ its generation and use Babcook and Wilcox hal 47 )$$

dengan

U = Koefisien perpindahan panas total

## Generator Uap Lokomotif

$A$  = Luas yang menghantarkan panas

$\Delta tm$  = Beda suhu antara sumber panas dan penerima panas

Perhitungan luas selimut bidang pemanas adalah :

$$\begin{aligned}A_o &= \pi \times OD \times L \\&= 3,14 \times \frac{0.0603504}{12} \times 6.05 \\&= 0.09626 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Luas bidang pemanas untuk n jumlah pipa

$n$  = 175 pipa (direncanakan)

$$\begin{aligned}A &= n \times A_o \\&= 175 \times 0.09626 \\&= 16.8465 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Untuk menghitung luas penampang luar

$$\begin{aligned}A_{pl} &= \frac{\pi}{4} ID^2 \\&= \frac{3,14}{4} \left( \frac{0.0525018}{12} \right)^2 \\&= 0.0232 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Luas penampang dalam ( $A_{pn}$ )

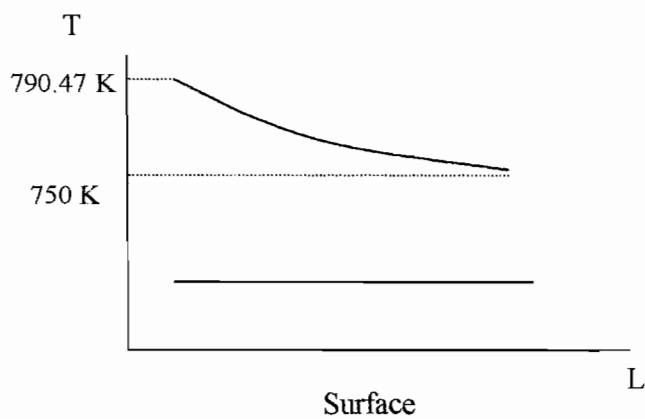
$$\begin{aligned}A_{pn} &= n \times A_{pl} \\&= 175 \times 0,0232 \\&= 4.076 \text{ m}^2\end{aligned}$$

## Generator Uap Lokomotif

Gas massa velocity ( $W_g$ )

$$\begin{aligned}W_g &= \frac{M_g}{A_{pn}} \\&= \frac{5447,587}{4.075} \\&= 1336,83 \text{ kg/jam}\end{aligned}$$

Karena suhu kedua fluida berubah dari inlet ke outlet maka  $\Delta tm$  dihitung sebagai logmean temperature difference (sumber dari Babcox Steam its Generation and Use hal 14-1)



$$\Delta tm = \frac{T_{g1} - T_{g2}}{\log_e \frac{T_{g1}}{T_{g2}}}$$

Dengan

$\Delta tm$  = Beda suhu

$T_{g1}$  = Temperatur gas meninggalkan ruang bakar 790,47 K

$T_{g2}$  = Temperatur gas meninggalkan pipa – pipa api 750 K  
(direncanakan)

## Generator Uap Lokomotif

Maka beda suhu yang terjadi :

$$\begin{aligned}\Delta tm &= \frac{790.47 - 750}{\log_e \frac{790.47}{750}} \\ &= 105,35 \text{ K}\end{aligned}$$

Temperatur film gas

$$\begin{aligned}t_f &= T_{\text{didhair}} + \frac{\Delta tm}{2} \\ &= 478 + (75/2) \\ &= 515.5 \text{ K} = 468.23 \text{ }^\circ\text{F}\end{aligned}$$

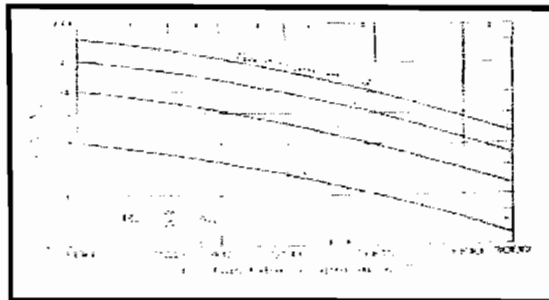
Bilangan Reynolds

$$Re = Kre \cdot Wg$$

Maka bilangan renolds

$$\begin{aligned}Re &= 2 \times 1431.35 \text{ Kg/jam} \\ &= 4007.78 \text{ Kg/Jam}\end{aligned}$$

Maka dari gambar 5.3 dibawah ini didapat harga Kre = 1.8

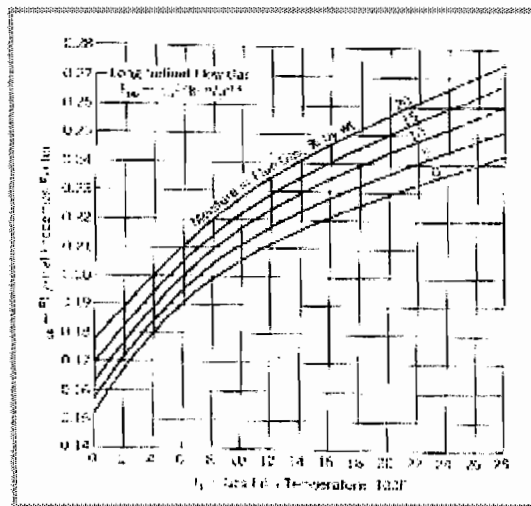


Tabel 5.1 Angka Reynold dengan massa gass velocity

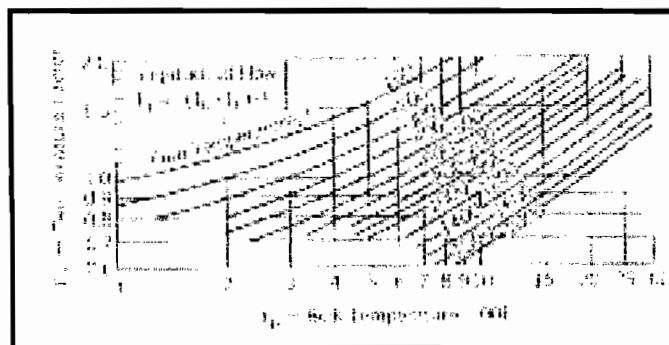
( Sumber its generation and use babcock and wilcox halaman 311)

## Generator Uap Lokomotif

Dari data temperatur film  $474.46^{\circ}\text{F}$  dan 5,35 % dari gas asap adalah  $\text{H}_2\text{O}$  dalam gas didapat nilai  $f_{pp} = 0.3$ , harga  $F_t$  dapat dicari, untuk  $t_f = 474.46^{\circ}\text{F}$  dan bulk temperature =  $958.806^{\circ}\text{F}$

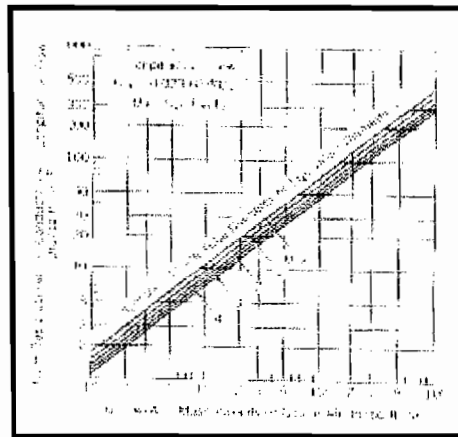


Grafik 5.3 Air film temperature  
( Sumber its generation and use babcock and wilcox halaman 49)



Grafik 5.5 Bulk Temperatur  
( its generation and use babcox and wilcox halaman 49)





Grafik 5.6 Mass Velocity of air  
( its generation and use babcock and wilcox halaman 48)

$$\begin{aligned}
 \text{maka } F_t &= \frac{t_b}{t_f} && \text{(its generation and use babcox and wilcox hal 49)} \\
 &= \frac{958.806}{474.46} \\
 &= 1.9
 \end{aligned}$$

Dari harga yang didapat maka dapat dihitung

$$\begin{aligned}
 U_{cg} &= U_{cl} \cdot F_{pp} \cdot F_t \text{ ( Its generation and use babcock and wilcox halaman 49 )} \\
 &= 1,6 \cdot 0,12 \cdot 1,9 \\
 &= 0.36
 \end{aligned}$$

## Generator Uap Lokomotif

Perhitungan konduktifitas panas konveksi film air adalah

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

Dengan :

$H_p$  = Konduktansi panas film air pada tekanan kerja (Kj/Jam °F)

$h_a$  = Konduktansi panas konveksi film air pada takanan atmosfir  
(Kj/jam°F)

$P$  = Tekanan kerja didalam ketel ( Psia)

$P_a$  = Tekanan atmosfir (14,7 Psia)

Maka :

$$\frac{Q}{A} = \frac{117966.224}{16.84}$$

$$= 7005.12 \text{ kJ / jam K}$$

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

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

Maka dihitung dengan menggunakan rumus :

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

dengan

$\Delta T$  = Selisih temperature direncanakan  $10^\circ \text{F}$

maka didapat nilai  $h_a$  sebesar :

$$\begin{aligned} h_a &= 0,168 ( 10 )^3 \\ &= 168 \text{ Kj/Kg } ^\circ \text{F} \end{aligned}$$

Dengan memasukkan nilai-nilai yang didapat di dalam rumus :

## Generator Uap Lokomotif

$$H_p = U_a = 168 \left( \frac{232.064}{14.7} \right)$$

$$= 2652.16 \text{ Kj/Kg}$$

$$T_{\text{saturated}} = 205^\circ \text{C} = 401^\circ \text{F}$$

$$T_{\text{surface}} = 10 + 401$$

$$= 411^\circ \text{F} (578 \text{ K})$$

Maka

$$Q_{\text{pa}} = U_a \times A (T_{\text{sur}} - 411)$$

$$71854.192 \text{ Kj/Jam} = 2652.16 \text{ Kj/Kg} \times 2174.17 (T_{\text{sur}} - 411)$$

$$T_{\text{surf}} = 411.02^\circ \text{F}$$

Pemeriksaan  $T_{\text{surface}}$

$$(411.2^\circ \text{F} - 411^\circ \text{F}) / 411^\circ \text{F} \times 100\% = 0.04\%$$

Perbedaan cukup kecil maka perkiraan  $10^\circ \text{F}$  dapat diterima

Konduktifitas material pipa untuk bahan iron (K) adalah  $108 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam } ^\circ \text{F}$

Sehingga harga U :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{U_{cg} \frac{OD}{ID}} + \frac{0.5OD \log e \frac{OD}{ID}}{K} + \frac{1}{U_a}} \quad (\text{Mesin konversi energi I hal 412})$$

$$= \frac{1}{0.36 \frac{2.376}{2.06} + \frac{0.52.376 \log e \frac{2.376}{2.06}}{108} + \frac{1}{2652.16}}$$

$$= \frac{1}{0.415 + 0.015 + 0.00037}$$

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

Jadi laju panas pada pipa-pipa api adalah :

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta_{tm}$$

$$= 43,7 \times 16.84 \times 167$$

$$= 122\,896,636 \text{ Btu/Jam}$$

$$= 129041,467 \text{ kJ/Jam}$$

Pemeriksaan laju perpindahan panas pada pipa-pipa api :

$$= \frac{129041,467 - 71854,192}{129041,467} \times 100\%$$

= 4.4 % Perbedaan cukup kecil sehingga dengan 175 pipa api perancangan ini dapat dilaksanakan.

#### 5.4 Perpindahan Panas pada Superheater

Perpindahan panas pada superheater terjadi secara konveksi dan konduksi, pada tahap pertama pipa-pipa superheater dipanaskan oleh gas asap yang mengalir secara konveksi .

Untuk mengetahui dimensi superheater telah diketahui beberapa data-data sebagai berikut :

$$\text{Kebutuhan panas (Q)} = 126\,563,366 \text{ kJ/jam}$$

$$\text{Jumlah uap yang dipanaskan (W}_g) = 5447,58 \text{ kg/jam}$$

$$\text{Temperatur uap masuk superheater(T}_{u1}) = 488 \text{ K ( 910.4 } ^\circ \text{F )}$$

$$\text{Temperatur uap keluar dari superheater direncanakan bersuhu (T}_{u2}) = 498 \text{ K (928.4 } ^\circ \text{F)}$$

## Generator Uap Lokomotif

Tekanan kerja pada ketel (P) = 1,7 MPa

Dimensi dari pipa superheater direncanakan :

Diameter luar ( Od ) = 0.04 m

Diameter dalam ( Id ) = 0.028 m

Tebal pipa ( t ) = 0.0768 m

Bahan pipa dari Alloy steel SA 376 IP 316 H

Tegangan yang diijinkan (  $\sigma$  ) = 12 400 pada temperatur 1100 °F

Jarak dari pusat ke pusat :

Kearah samping = 1.584 m

Kearah belakang = 5,5729 m

Jumlah deret pipa (m) = 3

Jumlah pipa (n) = 10

Panjang superheater (l) = 1.829 m

Radius kelengkungan ( r ) = 0.1524 m

Untuk mengetahui apakah tebal pipa memenuhi syarat ketebalannya dapat di hitung dengan rumus yang diambil dari Mechanical engineering hand book Kent's 1977 hal 18

$$t_m = \frac{P \times Id}{2 \times S} + 0,065$$

dengan :

P = Tekanan kerja ketel (Psia)

Id = Diameter dalam ( inch)

S = Tegangan yang diijinkan

Syarat  $t_m <$  tebal yang direncanakan

## Generator Uap Lokomotif

Perhitungan luas superheater

Luas permukaan bidang pemanas bagian luar

$$A_{pl} = m \times n \times l \times \pi \times \frac{r}{12}$$

Maka ;

$$\begin{aligned} A_{pl} &= 3 \times 10 \times 1.82 \times 3,14 \times (0.1524/12) \\ &= 2,2 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Luas permukaan dalam :

$$\begin{aligned} A &= \frac{\pi}{4} Id^2 \\ &= \frac{3.14}{4} (0,024)^2 \\ &= 0.0045 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Luas untuk 10 pipa :

$$\begin{aligned} A_{25} &= 0.0045 \times 10 \\ &= 0.045 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Perpindahan panas yang terjadi pada superheater Sumber Babcock and wilcox, its  
eneration and use hal 4-1

$$Q = U \cdot A_t \cdot \Delta t_m$$

dengan :

U = Koefisien perpindahan panas menyeluruh ( Btu/jam ft<sup>2</sup> °F)

A<sub>t</sub> = Luas penampang bidang pemanas ( ft<sup>2</sup>)

Δt<sub>m</sub> = Beda temperatur rata-rata logaritma

## Generator Uap Lokomotif

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

Dengan ;

$T_{g1}$  = Temperatur gas meninggalkan pipa api 750 K

$T_{g2}$  = Temperatur gas asap meninggalkan superheater direncanakan 533 K

$T_{u1}$  = Temperatur uap masuk superheater 488 K ( 910.4 ° F )

$T_{u2}$  = Temperatur uap keluar superheater direncanakan 583 K (1081.4 ° F)

$$\begin{aligned}\Delta tm &= \frac{(750 - 488) - (533 - 583)}{\ln\left(\frac{750 - 533}{533 - 583}\right)} \\ &= 213.69 \text{ K ( 416.642 °F)}\end{aligned}$$

Temperatur uap rata-rata :

$$\begin{aligned}T_{ur} &= \frac{T_{u1} + T_{u2}}{2} \\ &= \frac{488 + 583}{2} \\ &= 535.5 \text{ K ( 995.9 ° F )}\end{aligned}$$

Temperatur rata-rata gas asap pada superheater

$$\begin{aligned}T_{gr} &= \frac{T_{g1} + T_{g2}}{2} \\ &= \frac{750 + 533}{2} \\ &= 641.5 \text{ K ( 1154.7 ° F )}\end{aligned}$$

Temperatur gas film

$$T_{fr} = T_{ur} + \frac{\Delta tm}{2}$$

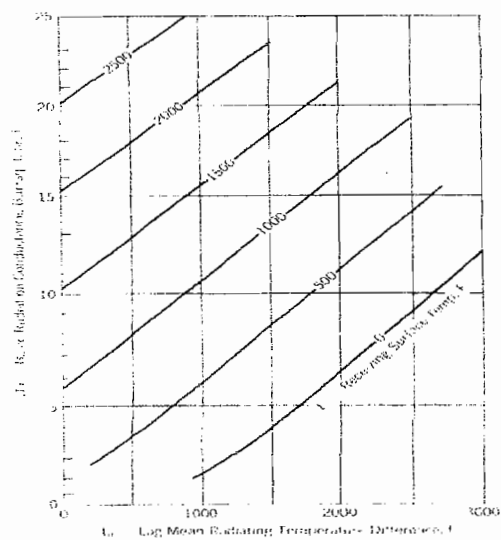
## Generator Uap Lokomotif

$$\begin{aligned} &= 535.5 + (213.69/2) \\ &= 642.345 \text{ K ( 1188.221 } ^\circ \text{ F)} \end{aligned}$$

Dari grafik 5.6 dibawah ini didapatkan nilai  $u'r = 6 \text{ Btu/sq ft hr,F}$  dan dari grafik 5.7 didapatkan nilai  $K = 0,9$  , sehingga didapatkan nilai ( $u_{rg}$ )

$$\begin{aligned} U_{rg} &= u'r \cdot K \\ &= 6 \cdot 0,9 \\ &= 5,4 \end{aligned}$$

Dari grafik 5.3 , grafik 5.4 dan grafik 5.5 didapatkan harga-harga  $f_{pp} : 0,17$  ,  $u'cl :$   
 $1,6 \text{ Ft} : 1,103$  ,  $F_a : 1,4$  ,  $F_d : 1,05$



Tabel 5.7 Grafik Log Mean Radiating Vs  $U'r$   
( Sumber Its Generation and Use Hal 14-3

Maka

$$U'cg = U'cl \times f_{pp} \times F_a \times F_d$$



## Generator Uap Lokomotif

$$= 1,6 \times 0,17 \times 1,4 \times 1,05$$

$$= 12,7449$$

$$U = \frac{(U_{rg} + U_{cg})U_{cs}}{U_{rg} + U_{cg} + U_{cs}}$$

$$= \frac{(5,4 + 12,7449)185}{5,4 + 12,7449 + 185}$$

$$= \frac{3356.806}{203}$$

$$= 16.53$$

$$Q = U \times A \times (\Delta tm)$$

$$= 16.53 \cdot 14,7 \cdot 213.69$$

$$= 51924,76 \text{ Btu/Jam}$$

$$= 54\,220,65 \text{ kJ/Jam}$$

Pemeriksaan dimensi superheater dengan memperhitungkan kalor yang dihasilkan dengan kalor yang direncanakan sebelumnya

$$\frac{147470.74 - 54220,65}{147470.74} \times 100\% = 0.6 \%$$

Hasil yang dihitung dengan perencanaan mempunyai perbedaan yang sangat kecil jadi dimensi ketel ini bisa di gunakan dalam perancangan ini.

## BAB VI

### PERANCANGAN SILINDER KETEL

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

#### VI.I. Perhitungan silinder ketel pada ruang bakar.

Pada perancangan generator uap jenis lokomotif ini silinder ketel berfungsi untuk memisahkan antara uap dan air. Pada generator uap ini yang digunakan direncanakan menggunakan bahan dari jenis baja karbon SA 515 65 ( dari table material untuk silinder ketel ), dimana bahan ini mempunyai kekuatan tarik yang diijinkan sebesar 16250 pada temperatur 600 ° F bahan ini mengandung 0,3 % carbon ( C), dan 0,3 % Silicon ( Si) serta kandungan mangan ( Mn), Phospor ( 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 ketel maka dapat digunakan rumus sebagai berikut:

Pesawat-pesawat konversi energi, Ir. Syamsir A Muin, 1988, hal 334

$$D = 2 d \quad (m)$$

Dengan :

D = Diameter silinder ketel pada ruang bakar

d = Diameter rata-rata ruang bakar 1,5 m

Maka

$$D = 2 \times 1,5 \\ = 3 \text{ m}^2$$

Tebal minimum silinder ketel dapat dihitung dengan menggunakan rumus Sumber Steam-Plant operation, Evert B Woosrufr, Heber B, Lammers, New York, 1977, hal 70

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

dengan :

tm = tebal minimum dinding ketel (m)

P = Tekanan kerja ketel

r = Jari – jari silinder ketel bagian dalam

$\sigma$  = Tekanan kerja bahan yang diijinkan pada temperatur 650<sup>0</sup> F

E = Efisiensi sambungan pada arah memanjang

Y = Koefisien friksi temperatur

C = Nilai minimum yang diijinkan karena stabilitas dan pengerjaan bahan adalah 0,065 karenadiameter pipa lebih dari linci

sehingga :

$$tm = \frac{17 \times 1,5}{1120,38 \times 0,9 - (1 - 0,7) \times 17} \\ = 0,0254 \text{ m ( 1 in )}$$

Karena nilai tersebut adalah nilai minimal maka untuk menjamin kekuatan dan keamanannya diambil tebal dinding ketel  $0,00254 \times 2 = 0,00508 \text{ m ( 2 in )}$

## VI.2, Silinder Ketel Pada Pipa-pipa Api

Pada perancangan silinder ketel pada pipa-pipa api digunakan baja SA-213 T22. Tegangan tarik maksimal dari bahan ini yaitu sebesar 15 000 psi maka ukuran untuk silinder api yaitu sebagai berikut :

Diameter dalam silinder ( ID ) = 72.08 in ( 1,85 m)

Diameter luar silinder ( OD) = 75,37 in ( 1.91m )

Tebal dari silinder dapat diperiksa kembali dengan menggunakan rumus :

$$t_m = \frac{P \times D}{2\sigma + 2YP} + C$$

dengan :

$t_m$  = Tebal minimum dinding silinder ketel pada pipa-pipa api ( m )

P = Tekanan kerja ketel 17 bar

D = Diameter luar 0.06 m

$\sigma$  = Kekuatan tarik maksimum bahan 1034.19 bar

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

Sehingga

$$t_m = \frac{17 \times 1.91}{2 \times 1034,19 + 2 \times 0,7 \times 17} + 0,065$$
$$= 0.016 \text{ m ( 0,642 in)}$$

dengan demikian tebal ukuran pipa sebesar 0,642 in dapat digunakan karena cukup kuat.

### VI.3 Pipa-pipa Api

Untuk pipa-pipa api pada ketel uap lokomotif ini digunakan bahan baja karbon dengan tingkat spesifik SA 106 C. Sedangkan ukuran pipa-pipa apinya adalah menggunakan pipa-pipa baja dengan ukuran 2 in memiliki ukuran standar sebagai berikut :

Diameter luar ( OD ) = 2,375 in

Diameter dalam ( ID ) = 2,075 in

Tebal pipa api = 0,154 in

Tegangan yang diijinkan (  $\sigma$  ) = 15 000 psi

Tekanan kerja = 246.57 psi

Maka dari rumus dapat diketahui tebal minimum pipa-pipa api yaitu sebagai berikut :

$$\begin{aligned} t_m &= \frac{P \times D}{2\sigma + 2YP} + C \\ &= \frac{246.57 \times 2,375}{2 \times 15000 + 2 \times 0,7 \times 246.57} \\ &= \frac{585.603}{30000 + 345.198} \\ &= \frac{585.603}{30345.198} \\ &= 0.0192 \text{ in} \end{aligned}$$

Dengan demikian tebal ukuran pipa 0,154 dapat digunakan karena lebih dari tebal minimum pipa.

#### VI.4. Perhitungan Jarak Antar Pipa-pipa Api

Untuk dapat menghitung jarak antar pipa-pipa api maka harus disesuaikan dengan tekanan yang bekerja pada pipa-pipa api tersebut dengan diameter nominal dari pipa api tersebut. Sehingga dapat dihitung sebagai berikut :

Berdasarkan tekanan kerja dari pipa yaitu pada 246,57 psia, maka diambil bahan pipa SA 213 T 22

Dengan

Diameter dalam pipa = 2,067 in

Diameter silinder ketel 75, 37 in

Lebar dan tinggi ruang bakar 59,05 in

Jumlah pipa = 175 pipa

S = Jarak antar pipa

$$= 1,5 \text{ do}$$

$$= 1,5 \times 2,375$$

$$= 3,562 \text{ in}$$

$$n = \frac{P}{s} + 1$$

$$175 = \frac{P}{3,562} + 1$$

$$= 619,79$$

Jarak antar pipa dapat dapat dihitung :

$$s = \frac{P}{n - 1}$$

$$= \frac{619.798}{175 - 1}$$

$$= 3,56 \text{ in (140,15 mm)}$$

Sehingga didapat jarak antar pipa sebesar 140,15 mm

### **VI.5 Perhitungan Rangka Pendukung**

Pada perancangan generator uap ini akan terjadi suatu gaya yang disebabkan karena pengoperasian pada ketel uap, sehingga untuk menahan gaya dorong dalam ketel uap ini digunakan penahan atau rangka pendukung ketel uap yang terbuat dari bahan baha tahan karat atau rangka pendukung ketel uap yang terbuat dari bahan baja tahan karat atau korosi dengan kemampuan menahan beban kurang lebih sebesar 40 000 psi. Dengan perincian sebagai berikut :

Diameter batang penahan pipa = 2 in

Diameter silinder ketel = 146,16 in

Tekanan kerja ketel maksimum = 246,57 psi

Tebal tabung = 11 in

Jarak dari dinding silinder ketel dengan bagian lebar tabung yang diperhitungkan untuk ditahan dengan batang penahan dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut Sumber diambil dari Steam – Plant operation, Evert B. Woodruff, Hebert B. Lammers New York, 1977, hal 615

$$d = \frac{5T}{\sqrt{P}}$$

$$d = \frac{5 \times 11}{\sqrt{246,57}}$$

$$= \frac{55}{15.7}$$

## Generator Uap Lokomotif

$$= 3,5 \text{ in}$$

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

$$\begin{aligned} A &= (D - 2d)^2 \times \frac{\pi}{8} - \left(\frac{D}{2} - h + 2\right)(D + 2d) \\ &= (146,16 - 2 \times 3,5)^2 \times \frac{3,14}{8} - \left(\frac{146,16}{2} - 11 + 2\right)(146,16 + 2 \times 3,5) \\ &= 19365,5 \times 0,3925 - 73,08 - 13 \times 153,16 \\ &= 7527,88 - 1991,08 \\ &= 5536,8 \text{ in}^2 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} F &= P \times A \\ &= 246,57 \times 5536,553 \\ &= 1365147,873 \text{ lb} \end{aligned}$$

Untuk setiap penampang batang yang mampu menahan beban sebesar

$$\begin{aligned} f &= \sigma \times \pi/4 \times d^2 \\ &= 40.000 \times 3,14 / 4 \times 2^2 \\ &= 125600 \end{aligned}$$

Jumlah penahan yang diperlukan untuk menahan ketel uap ini yaitu :

$$\begin{aligned} n &= \frac{F}{f} \\ &= \frac{1365147,873}{125600} \\ &= 10,8 = 11 \text{ buah} \end{aligned}$$



## VI.6 Perhitungan Sambungan Las

Dalam pembuatan silinder ketel pada perancangan ketel uap ini seluruh pengerjaan pembuatan sambungan dilakukan dengan jalan pengelasan.

Untuk mendapatkan silinder ketel dengan arah memanjang dapat dibuat dengan cara melakukan plat baja dengan menggunakan mesin pelengkung atau mesin pengerut plat.

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

Perhitungan sambungan dengan arah memanjang :

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

$$F_t = D \times L \times P$$

Dengan :

$F_t$  = Gaya pada dinding silinder ketel

$D$  = Diameter dalam silinder ketel 146,16 in

$L$  = Panjang silinder ketel 240 in

$P$  = Tekanan kerja ketel 246,57 psi

Maka

$$F_t = 146,16 \times 240 \times 246,57$$

$$= 8649281.08 \text{ psi}$$

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

$$\sigma = \frac{F_t}{a \times b}$$

dengan :

$F_t$  = Gaya dinding silinder ketel 8649281,08 lb

$a$  = Tebal kampuh

$$a = 1/2(\sqrt{2} \times S)$$

$s$  = Merupakan tebal plat 2 in

$$a = 1/2(\sqrt{2} \times 2,428)$$

$$= 1,71 \text{ in}$$

$b$  = Panjang kampuh =  $L - 3 a$

$$= 240 - 3 \times 1,71$$

$$= 234,87 \text{ in}$$

sehingga :

$$\sigma = \frac{8649281,08}{1,71 \times 234,87}$$

$$= 21524,73 \text{ psi}$$

Dari syarat tegangan yang diijinkan sebesar 40 000 psi, karena teganganyang terjadi lebihkecil sehingga sambungan las pada arah memanjang pada silinder ketel tersebut sudah cukup kuat dan memenuhi syarat.

Perhitungan sambungan las melintang

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

$$\begin{aligned} F_m &= \frac{\pi \times D^2 \times P}{4} \\ &= \frac{3,14 \times 146,16^2 \times 246,57}{4} \\ &= 4134918,563 \text{ lb} \end{aligned}$$

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

$$F_m = \frac{F_m}{a \times L}$$

Dengan :

$F_m$  = Gaya arah melintang 4134918,563 lb

$a$  = Tebal kampuh 1,717

$L$  = Panjang kampuh

$L = \pi D - 3a$

$$= 3,14 \times 146,16 - 3 \times 1,717$$

$$= 453,791 \text{ in}$$

Sehingga :

$$\sigma = \frac{4134918,563}{1,71 \times 453,791}$$

$$\sigma = \frac{4134918,563}{775,98}$$

$$= 5328,64 \text{ psi}$$

Dari syarat tegangan yang diijinkan yaitu sebesar 40000 psi maka tegangan pada arah melintang lebih kecil sehingga sambungan las pada arah melintang sudah cukup kuat dan memenuhi syarat yang ada.

## BAB VII

### ISOLASI KETEL

Untuk mengurangi kerugian panas sebagai akibat perbedaan temperatur nyala api dan gas asap hasil pembakaran bahan bakar yang digunakan sebagai pemanas didalam ketel dengan udara luar, maka dinding ketel tersebut harus diisolasi dengan baik.

Isolasi dinding ketel meskipun telah dibuat dengan baik namun hanya dapat memperkecil kerugian saja karena tidak dapat meniadakan kerugian yang terjadi akibat perbedaan temperatur tetapi dari segi keamanan menjadi lebih baik, temperatur dinding ketel bagian luar setelah diisolasi menjadi lebih baik.

Dengan demikian, hanya luka bakar akibat menyentuh atau berhubungan dengan dinding ketel dapat dihindarkan. Dari segi keamanan, hal ini dapat menjaga suasana aman di dalam ruangan atau tempat dimana ketel tersebut berada.

#### VII.1 Perancangan Isolasi pada Silinder Ketel

Pada perancangan isolasi dinding silinder ketel ini akan terdapat jenis bahan dan ketebalan yang berbeda karena disesuaikan kondisi dan fungsinya untuk memperkecil kerugian panas :

Data perencanaan:

- Plat penutup isolasi digunakan alumunium dengan ketebalan 0,5 in
- Isolasi digunakan dari bahan glasswool dengan ketebalan 4 in
- $d_1$  = Diameter dalam silinder ketel 72,08 in = 1830,832 mm
- $d_2$  = Diameter luar silinder ketel 75,37 in = 1914,398 mm
- $d_3$  = Diameter ketel setelah diisolasi 79,37 in = 2015,998 mm

- $d_4$  = Diamter ketel setelah diisolasi dan ditutup plat alumunium 79,42 in  
= 2017,268 mm
- $K_1$  = Konduktifias panas bahan ketel ( carbon steel ) 26 Btu/ft<sup>2</sup> Jam F / ft
- $K_2$  = Konduktifitas panas bahan isolasi ( glasswool) 0,022 Btu/ft<sup>2</sup> Jam F/ft
- $K_3$  = Konduktifitas panas bahan plat alumunium 117 Btu/ft<sup>2</sup> Jam F/ft  
(Sumber : JP. Holman, Daftar A<sub>3</sub> hal 584 )
- $T_a$  = Temperatur titik didih air dalam ketel 205<sup>0</sup> C ( 401<sup>0</sup> F )
- $T_u$  = Temperatur udara luar 27<sup>0</sup> C ( 80,6<sup>0</sup> F )
- $U_u$  = Konduktansi film udara 3 Btu /ft<sup>2</sup>hr<sup>0</sup> F ( Sumber Boyler Type band  
Characteristic, Carl D. Shield)

## VII.2. Perhitungan Kerugian Panas melalui dinding Silinder

Luas permukaan silinder ketel yang diisolasi dihitung dengan rumus :

$$\begin{aligned} A &= \pi \times d_2 L + 2 \frac{\pi}{4} (d_2)^2 \\ &= 3,14 \times \frac{6,28}{12} \times \frac{20}{12} + 2 \frac{3,14}{4} \times \frac{6,28}{12} \\ &= 456,289 \text{ ft}^2 \end{aligned}$$

Perhitungan konduktansi panas konveksi film air

$$U_a = h_a \left( \frac{P}{P_a} \right)^{0,4}$$

Dengan :

$h_a$  = Konduktansi panas film air pada tekanan atmosfer

$P$  = Tekanan kerja 246,586 psi

$P_a$  = Tekanan admosfir 14,7 psi

Untuk mendapatkan nilai  $h_a$  maka digunakan rumus

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

Temperatur permukaan dalam dinding silinder ketel direncanakan = 391° F  
 temperatur tersebut lebih rendah dari titik didih air, karena adanya film air  
 sehingga mempunyai selisih sebesar 10 °F, maka :

$$\begin{aligned} h_a &= 0,168(10)^3 \\ &= 0,168 ( 10 )^3 \\ &= 168 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam F} \end{aligned}$$

Sehingga  $U_a$  dapat diperoleh :

$$\begin{aligned} U_a &= 168 \left( \frac{246,508}{14,7} \right) \\ &= 1424,09 \text{ Btu/ft}^2 \text{ jam F} \end{aligned}$$

Maka kerugian panas melalui dinding ketel dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Q_s &= \frac{A(T_a - T_u)}{\left( \frac{d_4}{d_1} \frac{1}{U_a} \right) + \left( \frac{d_4}{2K_1} \log_e \frac{d_2}{d_1} \right) + \left( \frac{d_4}{2K_2} \log_e \frac{d_3}{d_2} \right) + \left( \frac{d_4}{2K_3} \log_e \frac{d_4}{d_3} \right) + \left( \frac{1}{U_u} \right)} \\ Q_s &= \frac{456,289(401 - 80,6)}{\left( \frac{6,6}{6} \times 7,02 \times 10^{-4} \right) + \left( \frac{6,6}{32} \log 1,1 \right) + \left( \frac{6,6}{0,044} \log 1,05 \right) + \left( \frac{6,6}{2808} \log 1,05 \right) + \left( \frac{1}{3} \right)} \\ &= \frac{146194,99}{67,99} \\ &= 2151,83 \text{ Btu/Jam} \end{aligned}$$

Perhitungan temperatur bagian luar plat penutup

$$Q = \frac{A(T_a - T_u)}{\left(\frac{d_4}{d_1} \frac{1}{U_a}\right) + \left(\frac{d_4}{2K_1} \log_e \frac{d_2}{d_1}\right) + \left(\frac{d_4}{2K_2} \log_e \frac{d_3}{d_2}\right) + \left(\frac{d_4}{2K_3} \log_e \frac{d_4}{d_3}\right)}$$

$$2151,83 = \frac{456,289(401 - T_4)}{67,61}$$

$$T_4 = 82,15 \text{ } ^\circ \text{F}$$

$$= 27,7 \text{ } ^\circ \text{C}$$



### VII.3. Perencanaan isolasi tutup belakang Silinder Ketel

Pada bagian tutup belakang adalah bagian yang berbatasan langsung dengan kamar api, pada bagian belokan asap kamar api mempunyai temperatur yang sangat tinggi, sehingga dibutuhkan bahu tahan api sebagai isolasi.

Pada perencanaan ini ditentukan :

Tebal fire brick/batu tahan api = 6 in

Tebal Isolasi = 4 in

Sehingga kerugian kalor pada tutup belakang silinder ketel dapat dihitung dengan persamaan :

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



## Generator Uap Lokomotif

Dengan :

$A_{tb}$  = Luas penampang tutup belakang

$$= \frac{\pi (d_1)^2}{4}$$

$$= \frac{3,14 (72,08)^2}{4}$$

$$= 28,32 \text{ ft}^2$$

$T_g$  = Temperatur gas asap dalam kotak api/ ruang bakar 1031,6 K (1397,192 ° F)

$T_u$  = Temperatur udara luar 27° C ( 80,6 ° F )

$U_a$  = Konduktansi panas film gas = 10,8 Btu/ft<sup>2</sup> Jam F

$t_1$  = Tebal batu tahan api 10 in ( 0.8 ft )

$K_1$  = Konduktansi panas batu tahan api 0,27 Btu/ft<sup>2</sup> jam F

$t_2$  = Tebal silinder ketel 1,315 in ( 0,01 ft )

$K_2$  = Konduktifitas bahan silinder ketel ( Carbon steel ) 26 Btu/ft<sup>2</sup> jam F ( Sumber JP. Holman Daftar A<sub>3</sub> )

$T_3$  = Tebal isolasi 4 in ( 0,33 ) ft

$K_3$  = Konduktansi panas bahan isolasi ( glasswool) 0,022 Btu/ft<sup>2</sup> jam F

$t_4$  = Tebal plat aluminium 1 in ( 0,08 ft )

$K_4$  = Konduktifitas panas bahan plat aluminium 117 Btu/ft<sup>2</sup> Jam F

$U_a$  = Konduktansi panas film udara 3 Bu/ft<sup>2</sup> jam F ( Sumber : Boiler Type and Characteristic and Function, Carl D, Shield)

Sehingga kerugian kalor pada tutup belakang ketel :

$$\begin{aligned}
 Q_{tb} &= \frac{28,32(1397 - 80,6)}{\frac{1}{10,8} + \frac{0,8}{0,27} + \frac{0,01}{26} + \frac{0,33}{0,022} + \frac{0,08}{117} + \frac{1}{3}} \\
 &= \frac{39563,04 - 2282,592}{0,09 + 2,9 + 0,0038 + 15 + 0,00068 + 0,33} \\
 &= \frac{37280,448}{18,32} \\
 &= 2034,958 \text{ Btu/Jam}
 \end{aligned}$$

Dengan demikian, temperatur pada permukaan luar plat penutup isolasi (  $T_s$  ) adalah :

$$\begin{aligned}
 Q_{tb} &= \frac{A_{ib}(T_g - T_s)}{\frac{1}{U_g} + \frac{t_1}{K_1} + \frac{t_2}{K_2} + \frac{t_3}{K_3} + \frac{t_4}{K_4} + \frac{1}{U_u}} \\
 Q_{tb} &= \frac{28,32(1397 - T_s)}{\frac{1}{10,8} + \frac{0,8}{0,27} + \frac{0,01}{26} + \frac{0,33}{0,022} + \frac{0,08}{117} + \frac{1}{3}} \\
 2034,958 &= \frac{39563,04 - 28,32T_s}{0,09 + 1,85 + 0,003 + 1,86 + 0,33}
 \end{aligned}$$

$$37280,430 - 39563,04 = 28,32T_s$$

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

Jadi total kerugian panas melalui dinding silinder ketel

$$\begin{aligned}
 Q_{rugi} &= Q_s + Q_{tb} \\
 &= 2151,83 + 2034,958 \\
 &= 4186,788 \text{ Btu/jam} \\
 &= 4417,46 \text{ kJ/jam}
 \end{aligned}$$

## **BAB VIII**

### **CEROBONG**

Cerobong digunakan untuk menghisap gas asap hasil reaksi pembakaran bahan bakar dari ruang bakar dan membuang gas asap tersebut keluar, ke udara bebas pada kecepatan dan ketinggian tertentu. Oleh karena gas asap tersebut mengandung debu dan dapat mencemari lingkungan yang berbahaya bagi kesehatan manusia ataupun kehidupan lainnya, oleh karena itu cerobong harus dibuat sesuai dengan kebutuhan yang diijinkan.

Tinggi rendahnya corobong tersebut dipengaruhi oleh kondisi. Cerobong pada lokomotif tidak dibangun cukup tinggi karena lokomotif selalu bergerak dan pada rel yang melewati bermacam-macam tempat. Kontruksi cerobong ini dapat di buat dari bahan plat baja dengan beberapa keuntungan diantaranya :

1. Mudah dan cepat dalam pembuatannya.
2. Lebih ringan untuk diameter dan tinggi yang sama
3. Harga lebih murah
4. Membutuhkan ruangan yang lebih kecil.

Sedangkan kelemahannya adalah sulit dilindungi terhadap pengaruh korosi sulfur yang terdapat dalam bahan bakar.

Cara untuk mengalirkan atau menghisap gasa asap dari ruang bakar hingga masuk ke cerobong serta keluar ke udara bebas digunakan dua cara yaitu:

1. Sistem tarikan alam ( natural draft)

Bila tarikan cerobong dapat lebih besar dari tahanan-tahanan aliran gas asap di dalam ketel, disamping adanya tarikan cerobong saja.

### 2. Sistem tarikan paksa ( forced draft)

Bila tarikan cerobong lebih kecil dari hambatan gas asap di dalam ketel, maka untuk mengeluarkan gas asap tersebut dari dalam ketel, disamping adanya tarikan cerobong harus dibantu dengan fan atau blower.

Pada sistem tarikan paksa ini dapat digunakan tiga cara yaitu :

#### a. Tarikan isap ( IDF = Induced Draft Fan )

Bila gas asap dihisap oleh fan atau blower yang dipasang sebelum cerobong, sehingga tungku atau ruang bakar akan bertekanan lebih rendah dari tekanan udara luar atau disebut dengan under pressure furnace.

#### b. Tarikan tekan ( FDF = Forced Draft Fan )

Bila gas asap dihembus dari ruang bakar oleh fan yang dipasang pada dinding ruang bakar, sehingga ruang bakar bertekanan lebih besar dari tekanan udara luar yang disebut tungku bertekanan.

#### c. Tarikan kombinasi antara isap dan tekan.

Bila dipasang baik IDF maupun FDF secara bersamaan maka tekanan didalam ruang bakar sama dengan tekanan udara luar yang disebut balanced draft.

Perencanaan cerobong tergantung pada beberapa hal antara lain :

1. Jumlah kerugian tekanan aliran total gas asap mulai dari dapur sampai cerobong.

2. Temperatur rata-rata gas asap lewat cerobong dan temperatur udara sekeliling.
3. Jumlah aliran gas asap
4. Tekanan udara luar.

### VIII.1. Perencanaan Cerobong

Dalam perencanaan ketel ini, cerobong dibuat dari plat baja dengan data-data perencanaan sebagai berikut :

Tinggi cerobong (H) : 5 ft

Temperatur gas asap masuk cerobong ( $T_{g1}$ ) : 533 K (500 °F)

Tekanan udara luar : 30 inHg

Temperatur udara luar ( $T_a$ ) : 80,6 °F

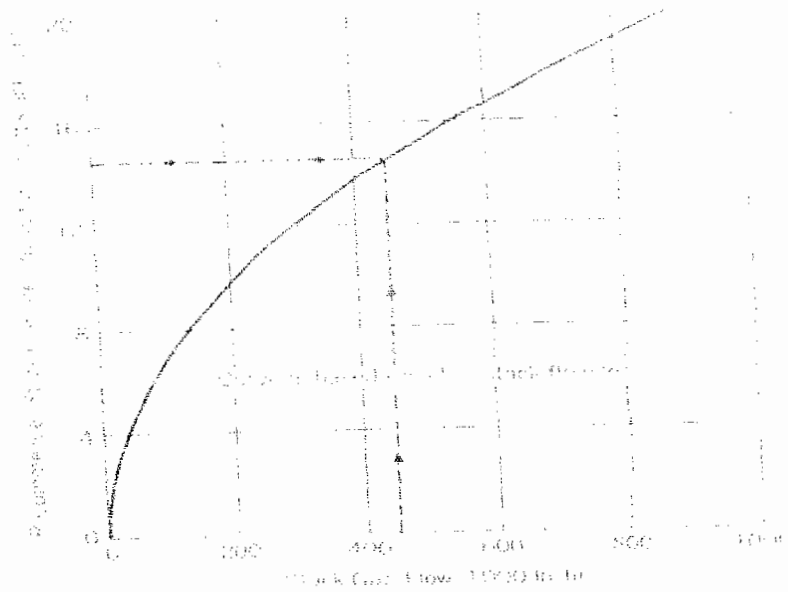
Jumlah gas asap yang dialirkan : 5447,58 kg/jam (3155,55lbm)

Dengan menggunakan gambar 8.1 diperoleh diameter cerobong  $D = 2,5$  ft (0,98m)

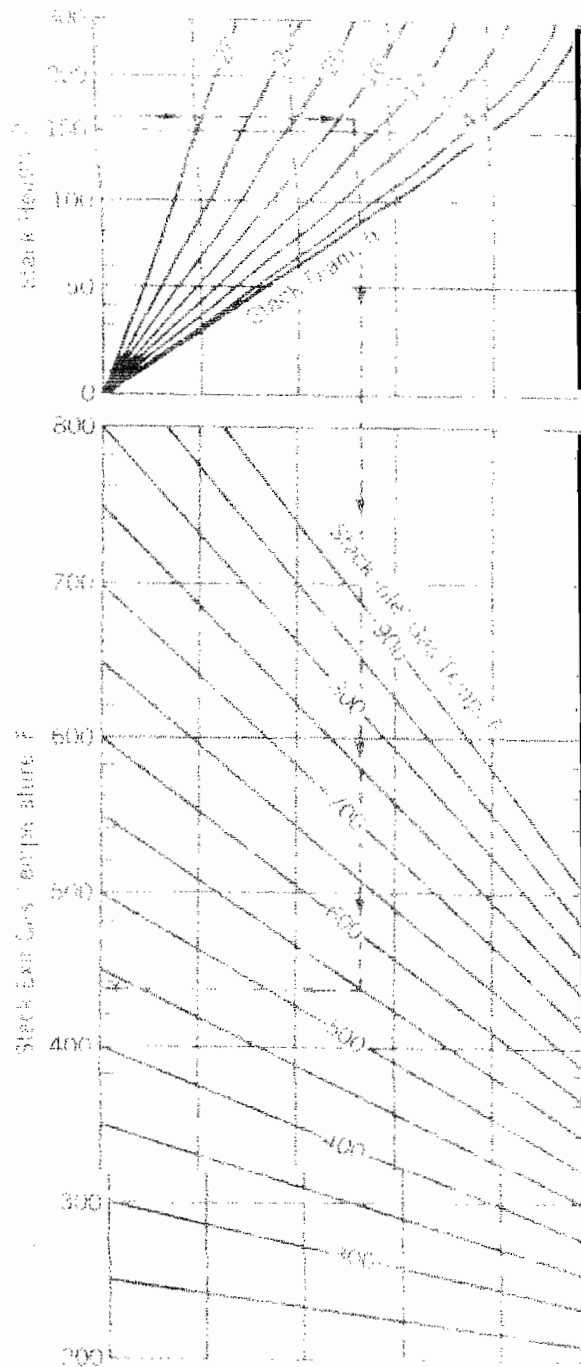
Temperatur keluar cerobong dapat diketahui melalui gambar 8.2 untuk tinggi cerobong  $H = 5$  ft dan diameter cerobong 2,5 ft maka temperatur gas asap keluar cerobong  $T_{g2} = 800$  °F ( 292 °C) Temperatur rata-rata gas asap didalam cerobong

$$\begin{aligned} T_{gr} &= \frac{T_{g1} + T_{g2}}{2} \\ &= \frac{901,8 + 800}{2} \\ &= 850,9 \text{ °F} \end{aligned}$$

## Generator Uap Lokomotif



**Gambar 8.1**  
Diameter Cerobong yang dianjurkan berdasarkan  
Jumlah gas asap yang dialirkan perjam  
( Sumber : Babcock & Wilcox, Steams it's Generation and use hal 17-4)



Gambar 8.2  
Hubungan antara temperatur gas asap keluar dan Masuk cerobong dengan  
dimensi cerobong  
( Sumber Babcock & Wilcox, Steam It's Generation and use, hal 17-5)

## Generator Uap Lokomotif

Untuk temperatur gas asap rata-rata 850°F di dalam cerobong dan untuk tinggi cerobong 5ft dengan menggunakan gambar 8.3 dapat diperoleh besarnya tarikan cerobong teoritis yaitu  $P_{ct} = 0,26 \text{ in H}_2\text{O}$

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

sumber Steam it's generation and use. Babcox and Wilcox hal 17-5

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

Dengan :

L = Tinggi cerobong 5 ft

B = Tekanan udara luar 30 in Hg

$T_{gr}$  = Temperatur absolute gas asap rata-rata di dalam cerobong 850,9 °F

Sehingga besarnya tarikan cerobong teoritis

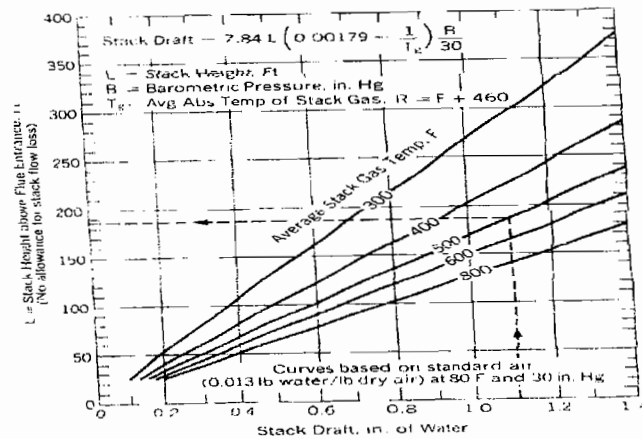
$$P_{ct} = 7,84 \times L \left( 0,0079 - \frac{1}{T_{gr}} \right) \times \frac{B}{30}$$

$$P_{ct} = 7,84 \times 5 \left( 0,0079 - \frac{1}{850,9} \right) \times \frac{30}{30}$$

$$= 0,0305 \text{ in H}_2\text{O}$$

untuk menambah tekanan tarikan cerobong di bantu dengan nossel yang dialirkan melalui pipa dengan prinsip perbedaan tekanan, uap panas dialirkan keluar melalui cerobong.





Gambar 8.3 Hubungan antara tarikan cerobong dengan Temperature dan tinggi cerobong  
 ( Sumber : Babcock and Wilcox, Steam its generation and use, hal 17-5)

### VIII.2. Kerugian tekanan aliran gas asap di cerobong

Untuk menghitung kerugian tekanan aliran gas asap di cerobong digunakan rumus:

$$SFL = \left( \frac{2,76}{B} \right) \times \left( \frac{T_{gr}}{D^4} \right) \times \left( \frac{W_g}{10^5} \right) \times \left( \frac{f \times L}{D} + I \right)$$

sumber Steam it's generation and

use. Babcox and Wilcox hal 17-4

Dengan :

$f$  = Faktor gesekan untuk mengetahui faktor gesekan terlebih dahulu

dihitung bilangan Reynold untuk aliran gas asap di dalam cerobong :

$$N_{Re} = \frac{20000 \times Wg}{T_{gr} \times D}$$

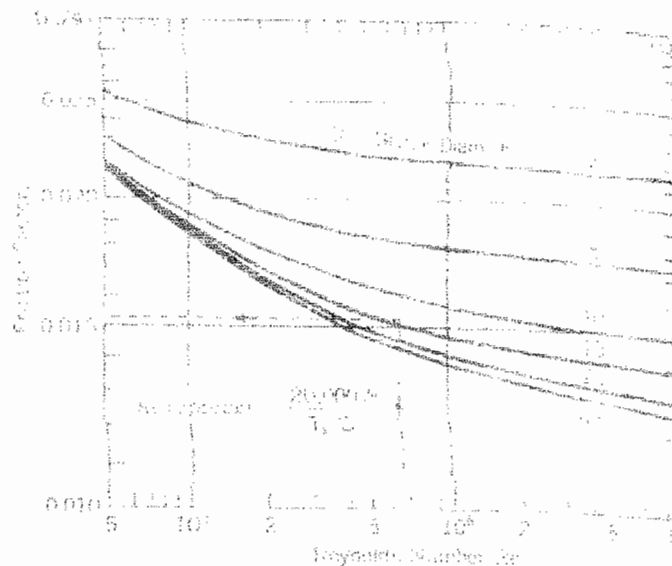
$$N_{Re} = \frac{20000 \times 12839.64}{850.9 \times 2.5}$$

$$= 120715.85$$

## Generator Uap Lokomotif

Dengan menggunakan gambar 8.4 untuk bilangan Reynols  $N_{re} = 120715,85$  maka besarnya faktor gesekan  $f = 0,025$  Sehingga kerugian tekanan aliran gas asap di dalam cerobong :

$$\begin{aligned} SFL &= \left(\frac{2,76}{30}\right) \times \left(\frac{850,9}{2,5^4}\right) \times \left(\frac{12839,64}{10^5}\right) \times \left(\frac{0,025 \times 5}{2,5} + 1\right) \\ &= (0,092) \times (21,78) \times (0,12)^2 \times (1,05) \\ &= 0,00042 \end{aligned}$$



Gambar 8.4  
Hubungan antara koefisien gesek dengan diameter cerobong  
( Sumber : Babcox and Wilcox, Steam its Generation and use, hal 17-4)

Kerugian tekanan aliran gas asap di dalam cerobong dengan tarikan cerobong teoritis adalah :

$$\begin{aligned} \frac{SFL}{Pc} &= \frac{0,00042}{0,0305} \times 100\% \\ &= 1,3\% \end{aligned}$$

Ternyata perbandingan kerugian tarikan cerobong ( SFL) dengan kerugian tarikan cerobong teoritis ( Pc) < 5 % jadi cerobong yang direncanakan memenuhi syarat untuk dijadikan tarikan alam. ( Sumber : Babcock & Wilcox, Steam it's Generation And Use, hal 17-4)

### VIII.3. Perhitungan Kerugian Aliran Gas Asap Dalam Ketel

Untuk mengetahui besarnya aliran gas asap selama mengalir dalam ketel berikut ini akan dihitung hambatan dalam pipa-pipa api :

Hambatan aliran gas asap pada saat melewati pipa silinder api dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$\Delta P_1 = F \left( \frac{L}{D} \right) \left( 460 + \left( \frac{T_1 + 2T_2}{3} \right) \right) \left[ \frac{\left( \frac{W_g}{10^3} \right)^2}{14400} \right] \text{ sumber its generation and use}$$

Babcoox and Wilcox 17-4

Dengan :

f = faktor gesekan

L = Panjang silinder pipa api

Wg = gas massa velocity

T<sub>1</sub> = Temperatur udara masuk pipa = 27° C (80,6° F)

T<sub>2</sub> = Temperatur gas asap keluar pipa api = 750 ° C (890.6° F)

Temperatur rata-rata gas asap di dalam pipa api adalah :

$$\frac{80,6 + 890,6}{2} = 971.2^\circ \text{ F}$$

Harga f dapat dicari dengan cara :

## Generator Uap Lokomotif

$$N_{ge} = \frac{W_g \times D_r}{12 \times \mu}$$

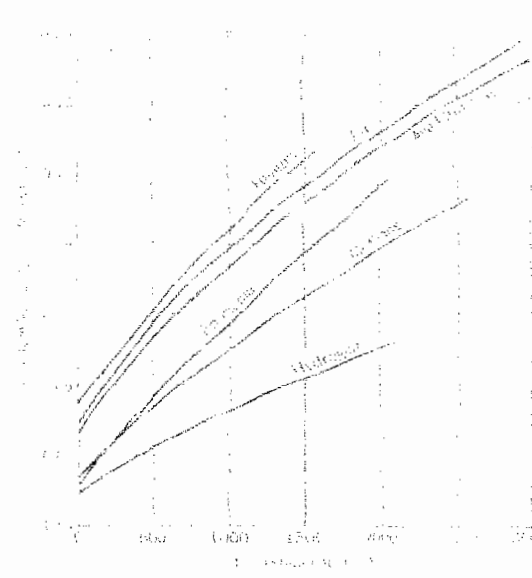
Sehingga dari gambar 8.5 didapat harga  $\mu$

$$N_{Re} = \frac{325.44 \times 72.08}{12 \times 0.085}$$

$$= \frac{23457.71}{1.02}$$

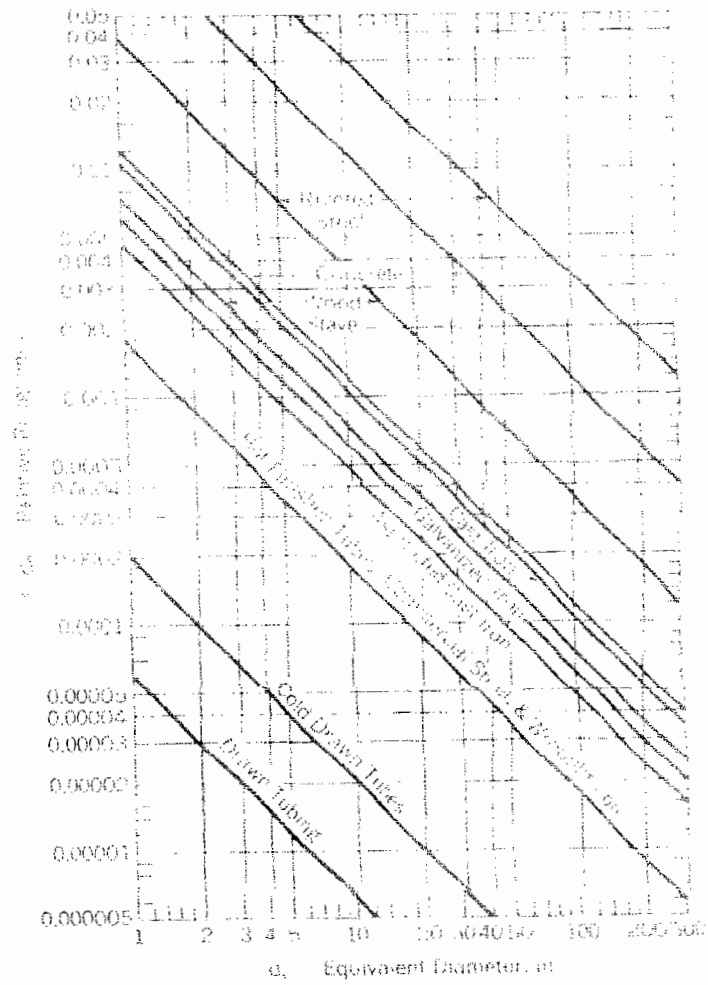
$$= 22\,997,75$$

Untuk  $D_r = 72,08$  in dan diasumsikan untuk hot finished tubes, maka dari gambar 8.6 didapat harga Relative Roughes = 0.00004

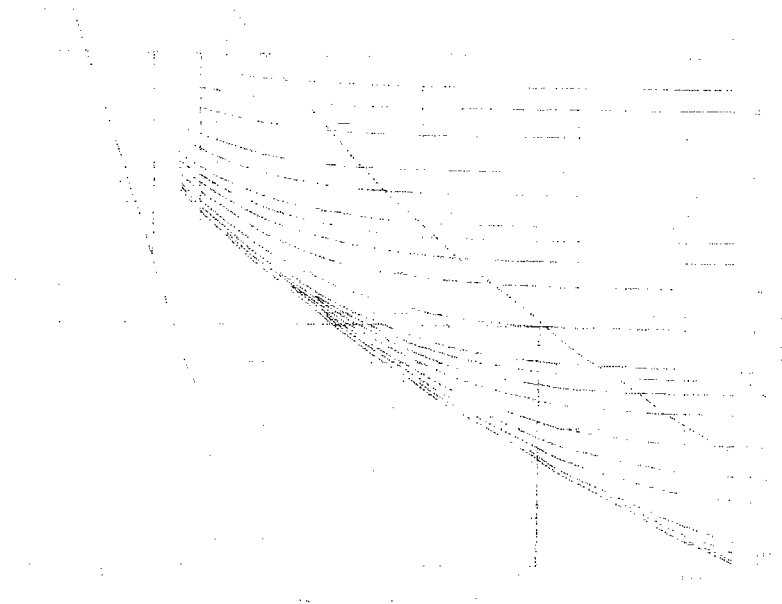


Gambar 8.5 Viskositas absolute untuk beberapa gas ideal pada tekanan atmosfer  
( Sumber : Babcock and wilcox, Steam it's generation and use, hal 3-7)

# Generator Uap Lokomotif



Gambar 8.6 Kekerasan relative dari berbagai permukaan  
 ( Sumber : babcock and Wilcox, Steam it's generation and use, hal 3-7)



Gambar 8.7  
Diagram untuk mendapatkan faktor gesekan  
( Sumber : Babcock and Wilcox, Steam it's generation and use, hal 3-6)

Untuk  $N_{Re} = 22997,75$  maka dari gambar 8.7 didapat koefisien gesek  $f = 0,0207$  dengan memasukkan

$$\Delta P_t = 0.0207 \left( \frac{1546.86}{72.08} \right) \left( 460 + \left( \frac{80.6 + 2 \times 890.6}{3} \right) \right) \left[ \frac{\left( \frac{5825.61}{10^3} \right)^2}{14400} \right]$$

$$= 0.19 \text{ in H}_2\text{O}$$

Tarikan cerobong secara teoritis ( $P_c$ ) adalah 0,26 in  $H_2O$  sehingga dapat disimpulkan bahwa hambatan tarikan cerobong teoritis lebih besar dari aliran hambatan gas asap dalam ketel sehingga dalam perancangan cerobong ini tidak menggunakan kipas atau fan untuk mengeluarkan gas asap dari cerobong dibantu

## Generator Uap Lokomotif

dengan menggunakan nosel yang disemprotkan gas panas yang berasal dari pipa yang dialirkan dari superheater.

## **BAB IX**

### **AIR ISIAN KETEL**

Air isian ketel harus mempunyai kualitas agar diperoleh hasil yang optimal, karena jika menggunakan sembarang air akan menimbulkan kesulitan dalam pengoperasian ketel, yaitu dapat menyebabkan korosi atau pengkaratan yang akan terbentuk kerak yang akan mengurangi hantaran panas ke air, sehingga membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mendapatkan jumlah panas tertentu yang dibutuhkan, dengan mendapatkan pembakaran bahan bakar yang lebih banyak, hal ini akan dapat menurunkan efisiensi ketel.

Sumber air untuk mengisi ketel diambil dari danau, sungai, sumur. Dari sumber air tersebut kemungkinan masih mengandung kotoran yang berbentuk zat terlarut atau padatan yang akan mengendap atau berbentuk suspensi. Air dapat pula datang dari kondensor, yang mengembungkan uap bekas setelah digunakan untuk menggerakkan turbin uap. Namun air dari kondensor tersebut masih mengandung minyak, minyak menimbulkan kerak pada dinding ketel uap.

Macam-macam kandungan dalam air dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Garam-garam keras (harness salt)

Yaitu garam-garam magnesium dan kalsium seperti  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)$ ,  $\text{Ca}(\text{SO}_4)$ ,  $\text{CaCl}_2$   $\text{Mg}(\text{SO}_4)$ , jenis-jenis ini dapat menyebabkan terbentuknya kerak.

2. Silika

Jenis ini dapat menyebabkan kerak yang sangat keras dan sangat sulit untuk dihilangkan dari permukaan yang dilapisi kerak tersebut.



3. Garam-garam tidak keras (Non hardness salt)

Yaitu garam-garam sulfat ( $\text{SO}_4$ ) dan klorida ( $\text{Cl}_2$ ), jenis ini dapat menyebabkan buih.

4. Zat-zat organik (Organic matter)

Yaitu berupa minyak yang dihasilkan akibat tumbuh-tumbuhan dan binatang, Jenis ini dapat menyebabkan air bersifat masam dan korosif.

5. Benda-benda melayang (Suspended matter)

Dapat ditemukan apabila dilakukan penyaringan terhadap air tersebut, jenis ini dapat membantu terbentuknya buih.

6. Gas-gas terlarut (Dissolved gases)

Seperti  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  dan  $\text{N}_2$  jenis ini dapat menyebabkan korosi.

Tujuan utama pengolahan air pada air pengisi ketel

- a. Mencegah terbentuknya kerak
- b. Mencegah terbentuknya korosi
- c. Mencegah terbentuknya buih

### **IX.1 Sistem Pengolahan Air**

Dalam pengolahan air yang dimaksudkan untuk mendapatkan mutu air yang bersih dan murni, dikenal dengan istilah Exsternal Water Treatment dan Internal Water Treatment.

Dalam sistem External Water Treatment ini meliputi :

- Penjernihan/pengendapan ( Clarification)
- Penyaringan (Filtration)

- Pertukaran Ion ( Ion Exchange)
- Danasi ( Daeratio)

Sedangkan untuk Internal Water Treatment adalah pemberian obat-obatan, didalam metode ini dapat bersamaan diinjeksi bahan kimia tawas dan soda asli.

Garam-garam magnesium bikarbonat dan kalsium akan mengendap berupa gumpalan (Fluo) dan mengikat zat-zat padatan yang tidak terlarut dalam air( tanah,pasir,lumpur, kotoran lain), sehingga air yang agak jernih naik kepermukaan dan akan keluar.

Metode filtration digunakan untuk menyaring benda-benda yang masih dapat lolos dari clifer tank. Dalam konstruksi filtration dapat digunakan bak atau kolom yang mana didalamnya berisi pasir. Tujuan adanya pasir ini adalah untuk menyaring benda yang lolos yang dapat berupa gumpalan. Air hasil penyaringan harus bersih tidak berwarna dan tidak berbau.

## **IX.2. Kesadahan air**

Air yang terdapat di alam masih banyak mengandung garam-garam terlarut, berupa garam magnesium dan kalsium. Maka air alam dikatakan mempunyai kesadahan yang tinggi. Untuk menurunkan tingkat kesadahan dilakukan proses pelunakan (Water treatmen) yaitu menurunkan garam-garam yang terkandung didalamnya sekecil mungkin atau dihilangkan sama sekali agar air mempunyai tingkat kesadahan yang rendah.

Kesadahan air berdasarkan sifatnya dibedakan menjadi dua yaitu :

1. Kesadahan yang bersifat sementara

Kesadahan yang disebabkan oleh garam-garam karbonat seperti  $\text{Ca}(\text{HCO}_2)_2$

2. Kesadahan yang bersifat tetap

Kesadahan yang disebabkan oleh garam-garam non karbonat seperti :

$\text{Ca}(\text{SO}_4)$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{Mg}(\text{SO}_4)$

Kesadahan yang bersifat sementara dapat dihilangkan dengan pemanasan, karena karbonat-karbonat tersebut akan mengendap sebagai karbonat normal yang merupakan lumpur yang dapat larut.

### **IX.3. Pencegahan Korosi**

Korosi dalam ketel disebabkan oleh zat-zat terlarut dalam air isian ketel antara lain  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Fe}_2$ ,  $\text{Fe}(\text{SO}_4)$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3$ .

Oksigen merupakan zat yang paling agresif yang dapat menimbulkan korosi pada bahan ketel, oleh sebab itu oksigen harus dihilangkan atau dikurangi sampai batas-batas tertentu.

Proses korosi pada bahan ketel pada dasarnya tidak dapat dihilangkan tetapi dapat diperlambat. Proses korosi dapat terjadi pada bahan ketel bertekanan kerja dan bertemperatur tinggi, dimana pada bahan ketel bertemperatur tinggi uap beroksidasi dengan baja hingga timbul korosi.

Untuk menghambat korosi dapat ditempuh dengan tiga cara; perlindungan katodis, alkalisasi air ketel dan pengusiran oksigen.

### **IX.4. Pencegahan Terbentuknya Kerak**

Pencegahan terbentuknya kerak dapat dilakukan dengan perlakuan air diluar ketel ( external feed water treatment), yaitu dengan cara pengolahan air isian sebelum masuk ketel dipanaskan didalam ketel yaitu meliputi :

1. Proses pemanasan
2. Proses kapur soda
3. Proses phospat
4. Proses pertukaran ion
5. Proses pemisahan silikat
6. Menghilangkan minyak

Pencegahan terbentuknya kerak dilakukan setelah air berada didalam ketel 9 (internal feed water treatment), yaitu proses penyempurnaan dari pelunakan air di luar ketel. Dengan cara memasukkan sebuah zat ke dalam ketel bersamaan dengan air isian yang kemudian akan bereaksi dengan senyawa-senyawa pembentuk kerak dan akan membentuk endapan berupa lumpur yang dapat dikeluarkan dari dalam ketel Blow down valve.

Bahan-bahan kimia yang banyak digunakan untuk pelunakan air isian didalam ketel adalah sodium carbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) dan sodium phospat. Dimana sodium carbonat akan bereaksi dengan kalsium sulfat dan membentuk endapan kalsium carbonat. Perbandingan antara kalsium karbonat terhadap kalsium sulfat berkisar antara 1,0 – 1,2 ( dalam batas tidak terjadi kerak selain lumpur). Semakin tinggi tekanan ketel semakin besar pula karbonat yang digunakan.

Untuk menghindari terbentuknya korosi kalsium atau magnesium phospat tidak ditambahkan pada air isian ketel sebelum masuk ketel, akan tetapi dimasukkan secara terpisah lewat larutan tertentu di dalam ketel.

### **IX.5. Pencegahan Buih dan Gelombang**

Buih dan gelombang yang terjadi dalam ketel uap, dapat menyebabkan timbulnya bintik-bintik air ikut dalam aliran uap, sehingga kualitas uap menurun. Adanya buih dan gelombang ini terjadi akibat adanya zat-zat padat yang melayang-layang, bahan-bahan organik, kadar garam terlalu tinggi, minyak dan zat-zat yang mudah menguap dalam ketel. Adanya bintik-bintik air juga dipengaruhi oleh konstruksi ketel. Semakin besar ruangan uap dalam ketel akan semakin kecil kemungkinan bintik-bintik air ikut aliran uap. Untuk mencegah buih dan gelombang, selain dengan cara penyulingan digunakan garam Barium karbonat. Garam barium karbonat dapat menyebabkan terbentuknya endapan sulfat tanpa adanya kenaikan kadar soda dalam ketel.

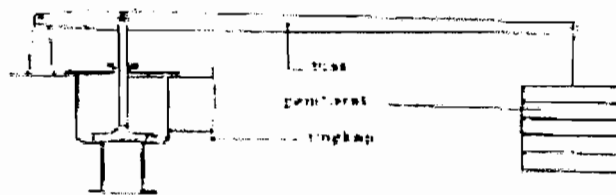
## BAB X

### ALAT-ALAT KEAMANAN KETEL

Alat-alat keamanan dalam ketel adalah alat yang diperlukan supaya ketel dapat bekerja secara aman dan berkesinambungan jika terjadi suatu keadaan diluar pengawasan operasi ketel, maka alat keamanan dan Bantu ketel akan memberikan indikasi untuk tindakan pengamanan ataupun dapat mengamankan secara otomatis. Alat-alat keamanan dan Bantu ketel uap yang dipakai atau direncanakan adalah :

#### X.1. Katup Keamanan (Safety Valve)

Katup keamanan merupakan alat yang memungkinkan jketel uap membuang uap keluar bila tekanan uap di dalam ketel melampaui tekanan kerja maksimum. Sebuah ketel uap paling sedikit harus mempunyai dua buah katup keamanan. Pada ketel uap ini direncanakan menggunakan katup keamanan dengan pemberat, hal ini disebabkan karena ketel uap ini bekerja pada tekanan kerja yang rendah. Katup keamanan ini dipasang pada drum uap dan diatur pada tekanan kerja ketel.



Gambar 10.1

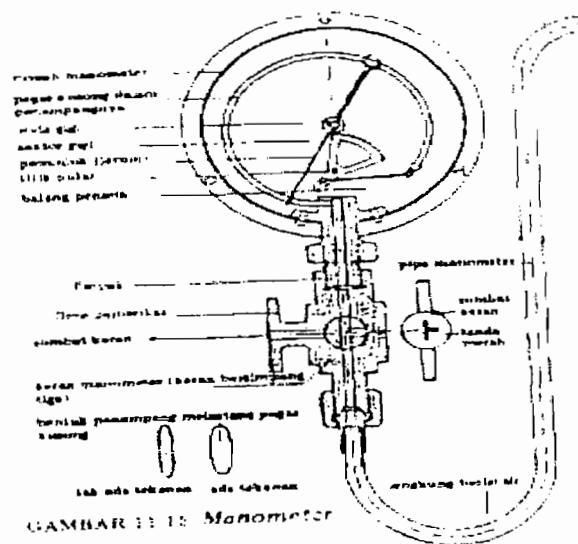
Katub keamanan dengan pemberat

Sumber : Pesawat-pesawat konversi energi I Syamsir A. Muin Hal 366

## X.2. Manometer

Manometer adalah alat penunjuk tekanan, dimana manometer ini digunakan untuk mengukur tekanan uap yang ada di dalam ketel. Pemasangan manometer diletakkan pada daerah di mana uap tidak mengalir yaitu pada tangki sebelah atas.

Manometer diletakkan ditempat yang mudah terbaca dan selalu kelihatan oleh operator. Manometer yang digunakan adalah manometer logam jenis Bourdon. Manometer Bourdon ini terdiri dari pipa-pipa kecil yang berbentuk lingkaran dengan dengan penampang bulat panjang yang pada salah satu ujungnya tertutup. Ujung yang terbuka dihubungkan dengan ruang uap ketel melalui saluran. Oleh karena tekanan uap yang tinggi, maka pipa-pipa berbentuk lingkaran akan berubah benuk, perubahan bentuk ini akan memutar jarum manometer. Minimal harus ada satu manometer dipasang pada setiap ketel.



Gambar 10  
Manometer

Sumber : Pesawat-pesawat konversi energi I Syamsir A.Muin Hal 362

- Pertukaran Ion ( Ion Exchange)
- Danasi ( Daeratio)

Sedangkan untuk Internal Water Treatment adalah pemberian obat-obatan, didalam metode ini dapat bersamaan diinjeksi bahan kimia tawas dan soda asli.

Garam-garam magnesium bikarbonat dan kalsium akan mengendap berupa gumpalan (Fluo) dan mengikat zat-zat padatan yang tidak terlarut dalam air( tanah,pasir,lumpur, kotoran lain), sehingga air yang agak jernih naik kepermukaan dan akan keluar.

Metode filtration digunakan untuk menyaring benda-benda yang masih dapat lolos dari clarifer tank. Dalam konstruksi filtration dapat digunakan bak atau kolom yang mana didalamnya berisi pasir. Tujuan adanya pasir ini adalah untuk menyaring benda yang lolos yang dapat berupa gumpalan. Air hasil penyaringan harus bersih tidak berwarna dan tidak berbau.

## **IX.2. Kesadahan air**

Air yang terdapat di alam masih banyak mengandung garam-garam terlarut, berupa garam magnesium dan kalsium. Maka air alam dikatakan mempunyai kesadahan yang tinggi. Untuk menurunkan tingkat kesadahan dilakukan proses pelunakan (Water treatmen) yaitu menurunkan garam-garam yang terkandung didalamnya sekecil mungkin atau dihilangkan sama sekali agar air mempunyai tingkat kesadahan yang rendah.

Kesadahan air berdasarkan sifatnya dibedakan menjadi dua yaitu :

1. Kesadahan yang bersifat sementara



Kesadahan yang disebabkan oleh garam-garam karbonat seperti  $\text{Ca}(\text{HCO}_2)_2$

## 2. Kesadahan yang bersifat tetap

Kesadahan yang disebabkan oleh garam-garam non karbonat seperti :

$\text{Ca}(\text{SO}_4)$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{Mg}(\text{SO}_4)$

Kesadahan yang bersifat sementara dapat dihilangkan dengan pemanasan, karena karbonat-karbonat tersebut akan mengendap sebagai karbonat normal yang merupakan lumpur yang dapat larut.

### **IX.3. Pencegahan Korosi**

Korosi dalam ketel disebabkan oleh zat-zat terlarut dalam air isian ketel antara lain  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Fe}_2$ ,  $\text{Fe}(\text{SO}_4)$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3$ .

Oksigen merupakan zat yang paling agresif yang dapat menimbulkan korosi pada bahan ketel, oleh sebab itu oksigen harus dihilangkan atau dikurangi sampai batas-batas tertentu.

Proses korosi pada bahan ketel pada dasarnya tidak dapat dihilangkan tetapi dapat diperlambat. Proses korosi dapat terjadi pada bahan ketel bertekanan kerja dan bertemperatur tinggi, dimana pada bahan ketel bertemperatur tinggi uap beroksidasi dengan baja hingga timbul korosi.

Untuk menghambat korosi dapat ditempuh dengan tiga cara; perlindungan katodis, alkalisasi air ketel dan pengusiran oksigen.

### **IX.4. Pencegahan Terbentuknya Kerak**

Pencegahan terbentuknya kerak dapat dilakukan dengan perlakuan air diluar ketel ( external feed water treatment), yaitu dengan cara pengolahan air isian sebelum masuk ketel dipanaskan didalam ketel yaitu meliputi :



1. Proses pemanasan
2. Proses kapur soda
3. Proses fosfat
4. Proses pertukaran ion
5. Proses pemisahan silikat
6. Menghilangkan minyak

Pencegahan terbentuknya kerak dilakukan setelah air berada didalam ketel 9 (internal feed water treatment), yaitu proses penyempurnaan dari pelunakan air di luar ketel. Dengan cara memasukkan sebuah zat ke dalam ketel bersamaan dengan air isian yang kemudian akan bereaksi dengan senyawa-senyawa pembentuk kerak dan akan membentuk endapan berupa lumpur yang dapat dikeluarkan dari dalam ketel Blow down valve.

Bahan-bahan kimia yang banyak digunakan untuk pelunakan air isian didalam ketel adalah sodium karbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) dan sodium fosfat. Dimana sodium karbonat akan bereaksi dengan kalsium sulfat dan membentuk endapan kalsium karbonat. Perbandingan antara kalsium karbonat terhadap kalsium sulfat berkisar antara 1,0 – 1,2 ( dalam batas tidak terjadi kerak selain lumpur). Semakin tinggi tekanan ketel semakin besar pula karbonat yang digunakan.

Untuk menghindari terbentuknya korosi kalsium atau magnesium fosfat tidak ditambahkan pada air isian ketel sebelum masuk ketel, akan tetapi dimasukkan secara terpisah lewat larutan tertentu di dalam ketel.

### **IX.5. Pencegahan Buih dan Gelombang**

Buih dan gelombang yang terjadi dalam ketel uap, dapat menyebabkan timbulnya bintik-bintik air ikut dalam aliran uap, sehingga kualitas uap menurun. Adanya buih dan gelombang ini terjadi akibat adanya zat-zat padat yang melayang-layang, bahan-bahan organik, kadar garam terlalu tinggi, minyak dan zat-zat yang mudah menguap dalam ketel. Adanya bintik-bintik air juga dipengaruhi oleh konstruksi ketel. Semakin besar ruangan uap dalam ketel akan semakin kecil kemungkinan bintik-bintik air ikut aliran uap. Untuk mencegah buih dan gelombang, selain dengan cara penyulingan digunakan garam Barium karbonat. Garam barium karbonat dapat menyebabkan terbentuknya endapan sulfat tanpa adanya kenaikan kadar soda dalam ketel.

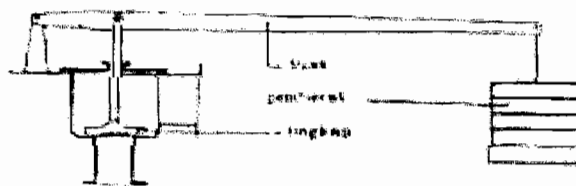
## BAB X

### ALAT-ALAT KEAMANAN KETEL

Alat-alat keamanan dalam ketel adalah alat yang diperlukan supaya ketel dapat bekerja secara aman dan berkesinambungan jika terjadi suatu keadaan diluar pengawasan operasi ketel, maka alat keamanan dan Bantu ketel akan memberikan indikasi untuk tindakan pengamanan ataupun dapat mengamankan secara otomatis. Alat-alat keamanan dan Bantu ketel uap yang dipakai atau direncanakan adalah :

#### X.1. Katup Keamanan (Safety Valve)

Katup keamanan merupakan alat yang memungkinkan jketel uap membuang uap keluar bila tekanan uap di dalam ketel melampaui tekanan kerja maksimum. Sebuah ketel uap paling sedikit harus mempunyai dua buah katup keamanan. Pada ketel uap ini direncanakan menggunakan katup keamanan dengan pemberat, hal ini disebabkan karena ketel uap ini bekerja pada tekanan kerja yang rendah. Katup keamanan ini dipasang pada drum uap dan diatur pada tekanan kerja ketel.



Gambar 10.1

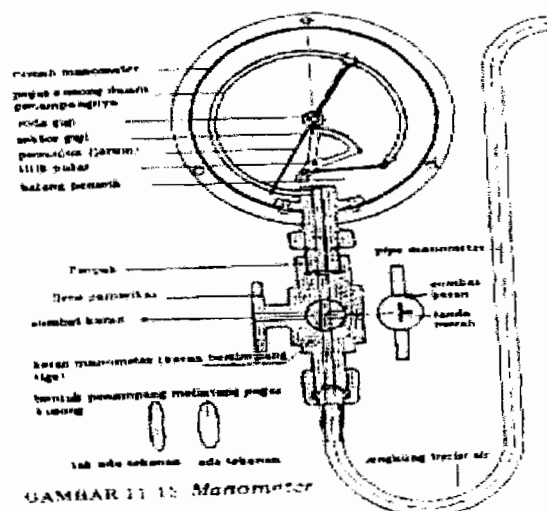
Katub keamanan dengan pemberat

Sumber : Pesawat-pesawat konversi energi I Syamsir A. Muin Hal 366

## X.2. Manometer

Manometer adalah alat penunjuk tekanan, dimana manometer ini digunakan untuk mengukur tekanan uap yang ada di dalam ketel. Pemasangan manometer diletakkan pada daerah di mana uap tidak mengalir yaitu pada tangki sebelah atas.

Manometer diletakkan ditempat yang mudah terbaca dan selalu kelihatkan oleh operator. Manometer yang digunakan adalah manometer logam jenis Bourdon. Manometer Bourdon ini terdiri dari pipa-pipa kecil yang berbentuk lingkaran dengan dengan penampang bulat panjang yang pada salah satu ujungnya tertutup. Ujung yang terbuka dihubungkan dengan ruang uap ketel melalui saluran. Oleh karena tekanan uap yang tinggi, maka pipa-pipa berbentuk lingkaran akan berubah benuk, perubahan bentuk ini akan memutar jarum manometer. Minimal harus ada satu manometer dipasang pada setiap ketel.

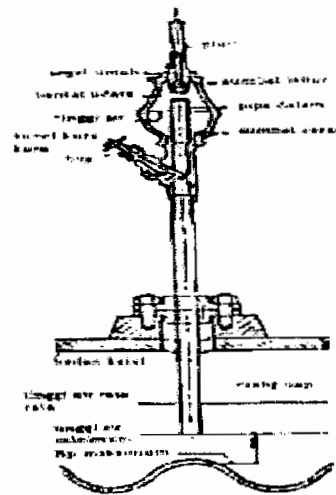


Gambar 10  
Manometer

Sumber : Pesawat-pesawat konversi energi I Syamsir A.Muin Hal 362

### X.3. Peluit Keamanan

Peluit keamanan ini akan berbunyi bila air didalam ketel turun melampaui, batas minimumnya. Bila tinggi air normal, uap didalam pipa suhunya rendah, sehingga tidak bisa melelehkan timah pada peluit. Bila air didalam drum uap turun melampaui batas minimumnya maka uap didalam pipa akan berhubungan langsung dengan uap yang bersuhu tinggi dengan uap yang tinggi dan oleh sebab itu akan mengakibatkan uap yang bersuhu tinggi dari drum uap. Sehingga timah akan mencair karena suhu uap cukup tinggi dan oleh sebab itu akan mengakibatkan uap dari drum uap akan keluar melalui peluit ini dan akan menimbulkan bunyi. Untuk mengganti timah maka kran ditutup agar tidak keluar, dengan jalan melepas cincin keamanan. Cincin keamanan ini dipakai untuk mengecek kran itu tertutup atau terbuka pada waktu ketel bekerja.

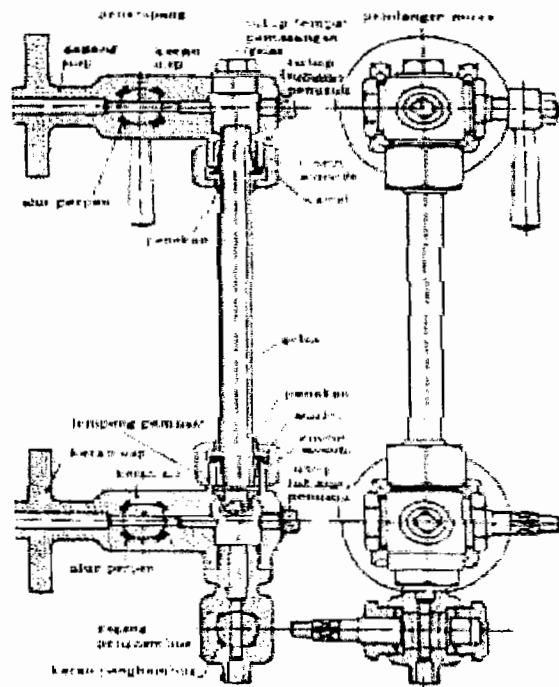


Gambar 10.4  
Peluit keamanan

Sumber : Pesawat-pesawat konversi energi I Syamsir A.Muin Hal 358

#### X.4. Gelas Penduga

Gelas penduga adalah alat untuk menunjuk tingginya permukaan air di dalam ketel. Gelas penduga ini terbuat dari tabung gelas yang transparan yang dipasang tegak, dan dihubungkan dengan drum. Pada bagian atas tabung gelas terdapat katup uap dibawahnya terdapat katup air. Pada gelas penduga ini terdapat perbedaan yang jelas antara uap dan air. Bagian yang berisi uap kelihatan agak jernih dan bagian yang berisi air agak kelihatan hitam.



Gambar 10.5  
Gelas Penduga

Sumber : Pesawat-pesawat konversi energi I Syamsir A.Muin Hal 349

#### X.5. Thermometer

Untuk mengukur suhu dipakai thermometer. Pada perencanaan ketel uap ini digunakan thermometer jenis thermocouple. Prinsip kerja thermocouple adalah bila dua buah konduktor logam dari dua buah material yang berbeda ujungnya

maka bila terkena panas pada ujungnya maka akan timbul daya electromotor force yang akan membangkitkan arus. Beda arus tergantung pada beda suhu antara kedua ujung dan jenis material. Apabila salah satu ujungnya dapat dijaga konstan maka temperature ujung yang lain dapat dideteksi dari arus yang mengalir.

Keuntungan menggunakan thermocoupeL antara lain:

1. Ketepatan pengukuran tinggi
2. Respon cepat dan tepat
3. Dapat dipakai untuk berbagai keperluan
4. Tak mudah rusak dan harganya murah
5. Membutuhkan peralatan yang sederhana untuk control dan pengaturan otomatis
6. Dapat dihubungkan ke panel sentral untuk pembacaan dan signal dapat dicatat untuk berbagai alat catat.

Pada perancangan ketel uap ini thermocoupeL digunakan untuk mengukur :

1. Suhu uap keluar drum
2. Suhu udara pembakaran masuk ruang bakar

Gambar berikut ini memperlihatkan cara pemasangan thermocoupeL pada pipa untuk mengukur uap yang sedang mengalir didalam pipa.

### **X.7. Katup Air Isian**

Katup air isian ini dipasang antara pompa pengisi dan ketel uap. Katup air isian ini berfungsi untuk mengatur kapasitas air masuk ke dalam ketel sebagai pengganti air yang telah menjadi uap selama beroperasi, maupun saat tidak beroperasi, untuk mengisi ketel guna melakukan pembersihan ketel . Katup air



isian juga berfungsi untuk mencegah terjadinya arus balik pada saluran pengisi air ketel. Katup air isian ini terdiri dari :

1. Katup yang dapat berfungsi untuk mencegah terjadinya aliran balik
2. Katup yang dapat dibuka dan ditutup yang berfungsi sebagai pengatur aliran

### **X.8. Katup Penutup Uap Induk**

Katup penutup uap induk dipasang pada bagian atas tangki ketel, dan berfungsi untuk mengalirkan keluar uap dari drum bagian atas melalui pipa-pipa pembawa uap menuju tempat penggunaan uap. Katup penutup uap ini saat ketel beroperasi harus dibuka.



Gambar 10.6  
Gelas Penduga

Sumber : Pesawat-pesawat konversi energi I Syamsir A.Muin Hal 353

### **X.9. Katup Penguras**

Katup ini berfungsi untuk mengosongkan atau membuang seluruh maupun sebagian air ketel. Pembuangan sebagian air ketel dilakukan pada saat ketel beroperasi untuk membuang endapan lumpur atau kotoran yang terbawa oleh air ketel, sekaligus untuk menjaga kesadahan air dalam ketel. Pembukaan katup saat beroperasi ini biasanya dilakukan tiap dua jam dengan membuka katub selama 3-4 detik untuk setiap kali pembukaan. Pada perencanaan ketel uap ini digunakan dua buah katub penguras yang ditempatkan pada bagian bawah drum.

### **X.10. Katub Udara**

Katub udara digunakan untuk membuang gas  $O_2$  dan  $CO_2$  yang terkondensasi dalam air ketel. Ketika  $O_2$  dan  $CO_2$  menjadi gas setelah pendidihan air kedua gas tersebut akan keluar melalui katub udara. Katub udara dipasang pada permukaan bagian atas drum, direncanakan dipasang sebanyak dua buah katub udara.

### **X.11. Pengaturan Otomatis**

Produksi uap yang tidak merata akan berpengaruh secara langsung terhadap pemasukkan bahan bakar, udara dan air isian ketel serta temperatur dan tekanan uap meningkat sehingga tinggi permukaan air di dalam ketel dan tekanannya akan menurun, sedangkan temperatur uap naik. Agar ketel beroperasi dengan aman dan tinggi permukaan air tidak terlalu rendah, maka perlu penambahan air isian ketel agar produksi uap tetap stabil baik tekanan maupun temperatur. Diperlukan juga penambahan panas yang berarti diperlukan penambahan bahan bakar dan udara pembakaran. Agar ketel beroperasi dengan aman dan sesuai dengan kebutuhan,

maka setiap perubahan yang terjadi perlu dikontrol dan disesuaikan dengan kondisi baru yang diinginkan, oleh karena itu diperlukan system pengaturan dan keamanan otomatis yang sensitive dan peka terhadap perubahan yang terjadi.

Prinsip kerja pengaturan terhadap setiap perubahan yang terjadi dalam ketel akan diubah, dan diteruskan instrument menjadi sinyal kearah pengatur. Elemen alat pengaturan akan mengatur setiap perubahan yang terjadi serta mengirim sinyal pengaturan ke instrumen operasi serta valve, damper dan lain-lain, dengan sinyal yang dikirim berupa tekanan, temperatur ataupun bentuk sinyal lain. Sistem keadaan otomatis akan menyebabkan ketel berhenti beroperasi bila kondisi atau prosedur operasi ketel tidak memenuhi kemandirian operasi. Dalam perencanaan ketel prosedur operasi ketel tidak memenuhi kemandirian operasi. Dalam perencanaan ketel uap ini, digunakan dua macam alat pengatur otomatis yaitu :

1. Alat pengaturan otomatis berdasarkan level air.
2. Alat pengaturan otomatis berdasarkan perubahan tekanan.

#### **X.11.1. Alat pengaturan otomatis berdasarkan level air**

Untuk menghidupkan dan mematikan pompa air, lampu tanda bahaya dan alarm secara otomatis berdasarkan tinggi rendahnya permukaan air di dalam ketel digunakan sebuah "*Contractor transmitting magnet*"

Gambar di bawah memperlihatkan skema instalasi transmitting magnet. Alat ini terdiri dari magnet permanent yang dihubungkan dengan pelampung dan sebuah batang penghubung, sehingga dapat bergerak naik turun mengikuti perubahan permukaan air didalam ketel. Gerakan naik dan turunnya magnet akan

menggerakkan kontak ( switch) yang dipasang di sekeliling transmitting tube dan dihubungkan ke pompa air isian, lampu-lampu tanda bahaya dan alarm. Pada kondisi permukaan berdatar dalam batas normal, kedudukan transmitting magnet pada keadaan normal pula. Bila kondisi air turun diatas permukaan normal, maka magnet ikut bergerak turun dan menggerakkan saklar untuk menghidupkan pompa air isian, pompa air isian dipompa masuk ke dalam ketel sehingga permukaan air didalam ketel juga akan terus naik. Naiknya permukaan air ini menyebabkan magnet ikut naik, dan setelah permukaan air kembali pada batas normal, magnet akan menyentuh saklar untuk mematikan pompa, sehingga pompa berhenti. Namun bila terjadi gangguan yang menyebabkan pompa tidak berhenti, sehingga air di dalam ketel terus bertambah (permukaan air naik), maka magnet akan menghubungkan saklar lampu tanda bahaya dan membunyikan alarm, pada keadaan ini operator harus segera mematikan lampu secara manual.

Sebaiknya pada waktu permukaan air turun dibawah normal, yaitu pada saat magnet menyentuh saklar yang menghidupkan pompa, tetapi karena adanya gangguan dan pompa tidak dapat hidup, sehingga permukaan air terus turun, maka keadaan magnet akan menghubungkan saklar tanda bahaya dan membunyikan alarm sehingga pompa dapat langsung dimatikan secara manual oleh operator.

#### **X.11.2. Alat pengaturan otomatis berdasarkan perubahan tekanan**

Pada pengaturan ini yang diatur adalah pembakaran yang dilakukan oleh burner, yaitu dengan mengatur jumlah penambahan batubara yang akan dibakar. Prinsip kerja alat pengaturan otomatis berdasarkan perubahan tekanan adalah sebagai berikut :

Apabila kondisi beban ketel naik maka tekanan uap didalam ketel akan turun, sebaliknya bila beban ketel turun, maka tekanan ketel akan naik. Dari pengertian dasar ini, maka diatur agar jumlah bahan bakar yang dibakar dapat disesuaikan dengan kondisi ini. Untuk melakukan pengaturan ini digunakan silinder dan batang torak berpegas.

Bila tekanan didalam ketel naik, maka torak akan bergerak kekanan, maka torak akan bergerak kekanan, sebaliknya bila tekanan di dalam ketel turun, maka torak akan bergerak kekiri. Gerakan torak ini akan menyebabkan perubahan pada potensiometer dan selanjutnya akan mengatur putaran dari motor servo, kemudian oleh motor servo diteruskan lagi untuk mengatur pembukaan dumper udara (air dumper) dan mengatur penambahan bahan bakar batu bara Gambar dibawah ini memperlihatkan diagram perlengkapan dan cara kerja alat yang digunakan yaitu modulating pressure control.

## BAB XI

### PENUTUP DAN KESIMPULAN

Dari seluruh analisa dan perhitungan yang telah dilakukan pada bab-bab diatas, maka didapat kesimpulan :

Ketel uap yang dirancang adalah ketel uap pipa api jenis lokomotif dengan superheater dengan data-data sebagai berikut :

|                                |               |
|--------------------------------|---------------|
| Daya yang dihasilkan           | : 60 PK       |
| Tekanan kerja                  | : 17 Bar      |
| Bahan bakar                    | : Batubara    |
| Temperatur air isian           | : 27 ° C      |
| Temperatur uap yang dihasilkan | : 215 ° C     |
| Bahan plat silinder ketel      | : Baja karbon |
| Diameter luar silinder ketel   | : 1900 mm     |
| Diameter dalam silinder ketel  | : 1830 mm     |
| Tebal plat silinder            | : 33.401 mm   |
| Panjang total                  | : 9000 mm     |
| Efisiensi ketel                | : 97 %        |
| Bahan isolasi                  | : Glasswool   |
| Pengerjaan                     | : Pengelasan  |

## Generator Uap Lokomotif

### Bagian-bagian utama ketel uap lokomotif

#### 1. Kotak api ketel , data-data :

Bahan plat kotak api : Baja Karbon

Lebar kota api : 1,5 m

Panjang kotak api : 1,5 m

Tinggi kotak api : 1,5 m

Tebal plat kotak api : 0,05 m

#### 2. Pipa-pipa api, data-data

Bahan pipa api : Baja karbon

Diameter luar pipa api : 0,06 m

Diameter dalam pipa api : 0,052 m

Tebal pipa api : 0,08 m

Panjang pipa api : 6,050 m

Jumlah pipa api : 175 buah

#### 3. Superheater data-data :

Bahan : Alloy steel SA 376 IP 316 H

Diameter luar : 0,04 m

Diameter dalam : 0,028 m

Tebal plat : 76,8 mm

Panjang superheater : 1,829 m

Radius kelengkungan : 1,5 m

## Generator Uap Lokomotif

Deret pipa : 3

Jumlah pipa : 25 buah

### 4. Cerobong data-data :

Tinggi cerobong : 1,524 m

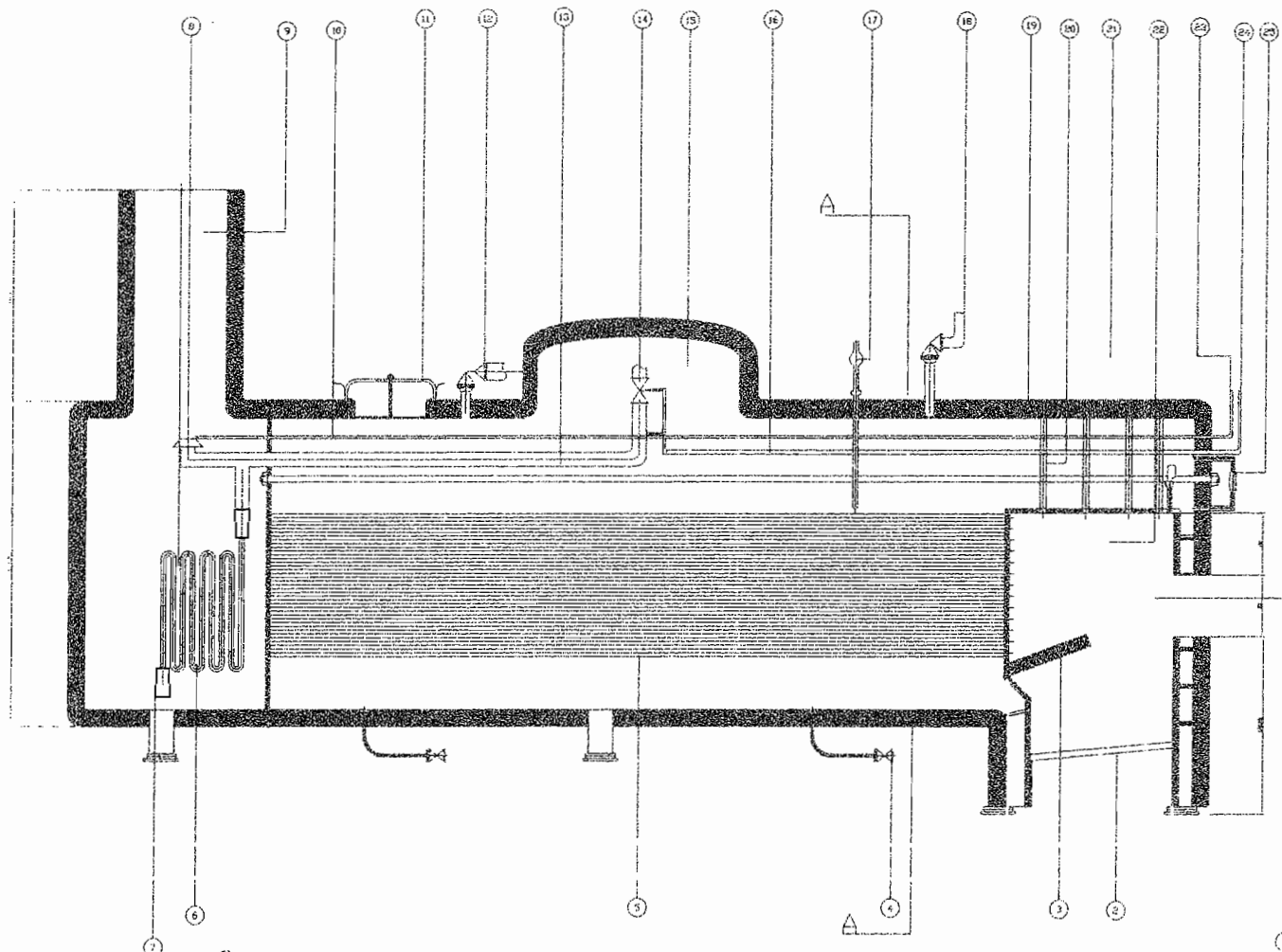
Diameter cerobong : 0,76 m

Bahan cerobong : Baja carbon

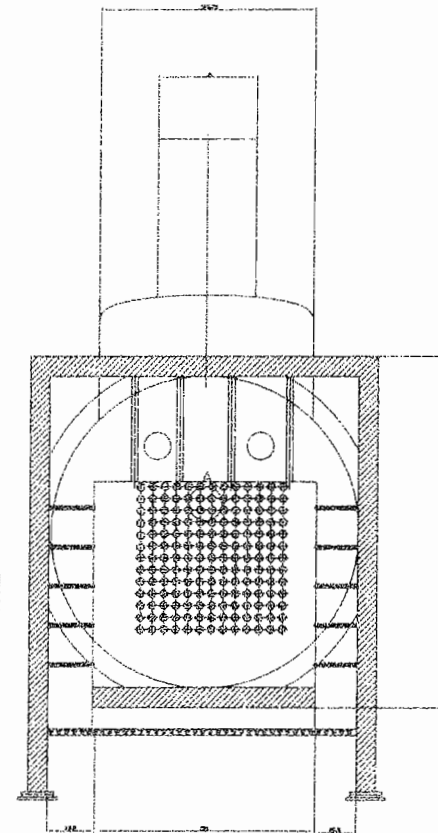


DAFTAR PUSTAKA

- Ashton M. (1961) Boiler Efisiensi and safety. The Mac Millan Press LTD.  
London and Basing Stoke.
- Babcock and Wilcox (1972). Steam Generation and Use. Babcock and Wilcox  
Company. New York
- Carl D Shield. (1972). Boiler Type Characteristic And Function Mc Grawhill  
Book Company. New York
- Djoko Styardjo M.J. (1987). Ketel Uap. Pniel Turu. Pradnya Paramita. Jakarta
- Holman J.P. (1984). Perpindahan Panas Alih Bahasa E. Jasfi. Erlangga Jakarta
- Nainggolan W.S. (1987) Teori Soal Penyelesaian Thermodinamika Amriko  
Bandung.
- Syamsir A. Muin (1988) Pesawat-pesawat Konversi Energi I. Rajawali Jakarta
- Tambunan S.M. Ketel Uap Pniel Turu. Karya Agung. Jakarta

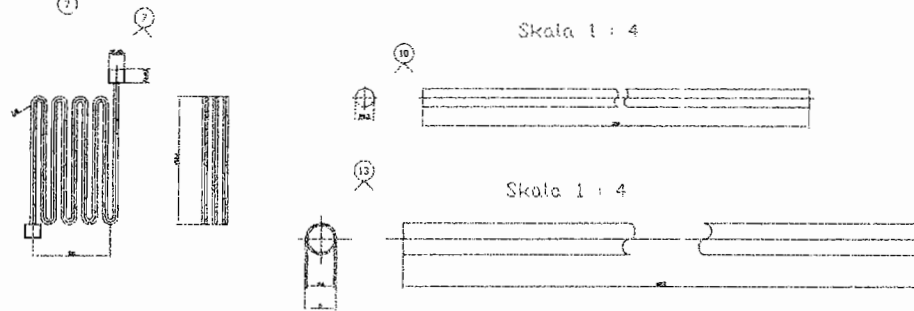


Potongan  
A-A



Skala 1 : 4

Detail A  
Skala 1 : 4



| No | Uraian | Materi | Jumlah | Uraian | Materi | Jumlah |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 01 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 02 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 03 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 04 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 05 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 06 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 07 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 08 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 09 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 10 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 11 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 12 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 13 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 14 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 15 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 16 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 17 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 18 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 19 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 20 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 21 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 22 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 23 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 24 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |
| 25 | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ...    |

## LAMPIRAN 1 Sifat-sifat Uap Jenuh

| Temp.<br>°C<br>T | Sat. press.<br>kPa<br>P <sub>sat</sub> | Specific volume<br>m <sup>3</sup> /kg |                              | Internal energy<br>kJ/kg      |                          |                              | Enthalpy<br>kJ/kg             |                          |                              | Entropy<br>kJ/(kg K)          |                          |                              |
|------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------------------|
|                  |                                        | Sat. liquid<br>v <sub>f</sub>         | Sat. vapor<br>v <sub>g</sub> | Sat. liquid<br>u <sub>f</sub> | Evap.<br>u <sub>fg</sub> | Sat. vapor<br>u <sub>g</sub> | Sat. liquid<br>h <sub>f</sub> | Evap.<br>h <sub>fg</sub> | Sat. vapor<br>h <sub>g</sub> | Sat. liquid<br>s <sub>f</sub> | Evap.<br>s <sub>fg</sub> | Sat. vapor<br>s <sub>g</sub> |
| 0.01             | 0.6113                                 | 0.001 000                             | 206.14                       | 0.00                          | 2375.3                   | 2375.3                       | 0.01                          | 2501.3                   | 2501.4                       | 0.0000                        | 9.1562                   | 9.1562                       |
| 5                | 0.8721                                 | 0.001 000                             | 147.12                       | 20.97                         | 2361.3                   | 2382.3                       | 20.98                         | 2409.6                   | 2510.6                       | 0.0761                        | 8.9360                   | 9.0121                       |
| 10               | 1.2276                                 | 0.001 000                             | 106.38                       | 42.00                         | 2347.2                   | 2389.2                       | 42.01                         | 2477.7                   | 2519.6                       | 0.1510                        | 8.7656                   | 8.9166                       |
| 15               | 1.7051                                 | 0.001 001                             | 77.93                        | 62.99                         | 2333.1                   | 2396.1                       | 62.99                         | 2465.9                   | 2528.9                       | 0.2245                        | 8.6359                   | 8.8604                       |
| 20               | 2.339                                  | 0.001 002                             | 57.79                        | 83.95                         | 2319.0                   | 2402.9                       | 83.96                         | 2454.1                   | 2538.1                       | 0.2966                        | 8.5366                   | 8.8332                       |
| 25               | 3.169                                  | 0.001 003                             | 43.36                        | 104.88                        | 2304.9                   | 2409.6                       | 104.89                        | 2442.3                   | 2547.2                       | 0.3674                        | 8.4605                   | 8.8207                       |
| 30               | 4.246                                  | 0.001 004                             | 32.83                        | 125.78                        | 2290.8                   | 2416.6                       | 125.79                        | 2430.5                   | 2556.3                       | 0.4369                        | 8.4044                   | 8.8133                       |
| 35               | 5.628                                  | 0.001 005                             | 25.22                        | 146.67                        | 2276.7                   | 2423.4                       | 146.68                        | 2418.6                   | 2565.3                       | 0.5053                        | 8.3678                   | 8.8091                       |
| 40               | 7.354                                  | 0.001 008                             | 19.52                        | 167.56                        | 2262.6                   | 2430.1                       | 167.57                        | 2406.7                   | 2574.3                       | 0.5726                        | 8.3486                   | 8.8076                       |
| 45               | 9.593                                  | 0.001 010                             | 15.26                        | 188.44                        | 2248.4                   | 2436.8                       | 188.45                        | 2394.9                   | 2583.2                       | 0.6387                        | 8.3421                   | 8.8084                       |
| 50               | 12.349                                 | 0.001 012                             | 12.03                        | 209.32                        | 2234.2                   | 2443.5                       | 209.33                        | 2383.7                   | 2592.1                       | 0.7038                        | 8.3475                   | 8.8101                       |
| 55               | 15.758                                 | 0.001 015                             | 9.508                        | 230.21                        | 2219.9                   | 2450.1                       | 230.22                        | 2373.0                   | 2600.9                       | 0.7679                        | 8.3634                   | 8.8131                       |
| 60               | 19.940                                 | 0.001 017                             | 7.671                        | 251.11                        | 2205.5                   | 2456.6                       | 251.12                        | 2362.5                   | 2609.6                       | 0.8312                        | 8.3894                   | 8.8172                       |
| 65               | 25.03                                  | 0.001 020                             | 6.197                        | 272.02                        | 2191.1                   | 2463.1                       | 272.03                        | 2352.2                   | 2618.2                       | 0.8938                        | 8.4255                   | 8.8318                       |
| 70               | 31.19                                  | 0.001 023                             | 5.042                        | 292.95                        | 2176.6                   | 2469.6                       | 292.98                        | 2342.1                   | 2626.6                       | 0.9559                        | 8.4704                   | 8.7853                       |
| 75               | 38.58                                  | 0.001 026                             | 4.131                        | 313.90                        | 2162.0                   | 2475.9                       | 313.93                        | 2332.4                   | 2635.3                       | 1.0175                        | 8.5256                   | 8.8831                       |
| 80               | 47.39                                  | 0.001 029                             | 3.407                        | 334.86                        | 2147.4                   | 2482.2                       | 334.91                        | 2323.0                   | 2643.7                       | 1.0783                        | 8.5909                   | 8.8121                       |
| 85               | 57.83                                  | 0.001 033                             | 2.828                        | 355.84                        | 2132.6                   | 2488.4                       | 355.89                        | 2313.6                   | 2651.9                       | 1.1383                        | 8.6662                   | 8.8444                       |
| 90               | 70.14                                  | 0.001 036                             | 2.391                        | 376.85                        | 2117.7                   | 2494.5                       | 376.92                        | 2304.2                   | 2660.1                       | 1.1975                        | 8.7517                   | 8.8779                       |
| 95               | 84.55                                  | 0.001 040                             | 1.982                        | 397.88                        | 2102.7                   | 2500.6                       | 397.96                        | 2294.8                   | 2668.1                       | 1.2560                        | 8.8475                   | 8.9111                       |
| 100              | 101.35                                 | 0.001 044                             | 1.613                        | 418.94                        | 2087.5                   | 2506.5                       | 418.98                        | 2285.0                   | 2676.1                       | 1.3139                        | 8.9521                   | 8.9441                       |
| 105              | 120.82                                 | 0.001 048                             | 1.4194                       | 440.02                        | 2072.3                   | 2512.1                       | 440.05                        | 2274.7                   | 2683.0                       | 1.3713                        | 9.0652                   | 8.9769                       |
| 110              | 143.27                                 | 0.001 052                             | 1.2107                       | 461.14                        | 2057.0                   | 2518.1                       | 461.18                        | 2263.9                   | 2689.5                       | 1.4283                        | 9.1862                   | 9.0094                       |
| 115              | 169.06                                 | 0.001 056                             | 1.0366                       | 482.30                        | 2041.4                   | 2523.7                       | 482.34                        | 2252.6                   | 2695.6                       | 1.4840                        | 9.3136                   | 9.0416                       |
| 120              | 198.53                                 | 0.001 050                             | 0.8919                       | 503.50                        | 2025.8                   | 2529.3                       | 503.71                        | 2240.6                   | 2701.3                       | 1.5386                        | 9.4467                   | 9.0735                       |
| 125              | 232.1                                  | 0.001 055                             | 0.7766                       | 524.74                        | 2009.9                   | 2534.5                       | 524.95                        | 2228.5                   | 2706.5                       | 1.5913                        | 9.5847                   | 9.1051                       |
| 130              | 270.1                                  | 0.001 070                             | 0.6682                       | 546.02                        | 1993.9                   | 2539.9                       | 546.31                        | 2216.2                   | 2711.5                       | 1.6424                        | 9.7261                   | 9.1364                       |
| 135              | 313.30                                 | 0.001 075                             | 0.5822                       | 567.35                        | 1977.7                   | 2545.0                       | 567.65                        | 2203.5                   | 2716.3                       | 1.6919                        | 9.8702                   | 9.1674                       |
| 140              | 361.3                                  | 0.001 080                             | 0.5069                       | 588.74                        | 1961.3                   | 2550.0                       | 589.13                        | 2190.4                   | 2720.9                       | 1.7400                        | 10.0162                  | 9.1981                       |
| 145              | 415.4                                  | 0.001 085                             | 0.4463                       | 610.18                        | 1944.7                   | 2554.9                       | 610.63                        | 2176.9                   | 2725.3                       | 1.7867                        | 10.1632                  | 9.2285                       |
| 150              | 475.6                                  | 0.001 091                             | 0.3928                       | 631.68                        | 1927.9                   | 2559.5                       | 632.20                        | 2163.3                   | 2729.5                       | 1.8321                        | 10.3112                  | 9.2586                       |
| 155              | 543.1                                  | 0.001 096                             | 0.3468                       | 653.24                        | 1910.8                   | 2564.1                       | 653.84                        | 2149.6                   | 2733.4                       | 1.8763                        | 10.4601                  | 9.2884                       |
| 160              | 617.8                                  | 0.001 102                             | 0.3071                       | 674.87                        | 1893.5                   | 2568.4                       | 675.55                        | 2135.6                   | 2737.1                       | 1.9194                        | 10.6090                  | 9.3179                       |
| 165              | 700.5                                  | 0.001 105                             | 0.2727                       | 696.56                        | 1876.0                   | 2572.5                       | 697.34                        | 2121.2                   | 2740.5                       | 1.9615                        | 10.7579                  | 9.3471                       |
| 170              | 791.7                                  | 0.001 114                             | 0.2429                       | 718.33                        | 1858.1                   | 2576.5                       | 719.21                        | 2106.5                   | 2743.5                       | 2.0026                        | 10.9067                  | 9.3760                       |
| 175              | 892.0                                  | 0.001 121                             | 0.2166                       | 740.17                        | 1840.0                   | 2580.2                       | 741.17                        | 2091.4                   | 2746.3                       | 2.0428                        | 11.0554                  | 9.4046                       |
| 180              | 1 002.1                                | 0.001 127                             | 0.194 05                     | 762.09                        | 1821.6                   | 2583.7                       | 763.22                        | 2075.0                   | 2748.8                       | 2.0821                        | 11.2040                  | 9.4329                       |
| 185              | 1.1227                                 | 0.001 134                             | 0.174 05                     | 784.10                        | 1802.9                   | 2587.0                       | 785.37                        | 2058.1                   | 2751.1                       | 2.1206                        | 11.3522                  | 9.4609                       |
| 190              | 1.2544                                 | 0.001 141                             | 0.156 54                     | 806.19                        | 1783.8                   | 2590.0                       | 807.62                        | 2040.6                   | 2753.0                       | 2.1583                        | 11.5001                  | 9.4885                       |
| 195              | 1.3978                                 | 0.001 149                             | 0.141 05                     | 828.37                        | 1764.4                   | 2592.8                       | 829.98                        | 2022.6                   | 2754.6                       | 2.1953                        | 11.6476                  | 9.5158                       |
| 200              | 1.5535                                 | 0.001 157                             | 0.127 56                     | 850.65                        | 1744.7                   | 2595.3                       | 852.45                        | 2004.0                   | 2755.9                       | 2.2316                        | 11.7947                  | 9.5428                       |
| 205              | 1.7230                                 | 0.001 164                             | 0.115 21                     | 873.04                        | 1724.5                   | 2597.5                       | 875.04                        | 1984.7                   | 2756.9                       | 2.2672                        | 11.9414                  | 9.5694                       |
| 210              | 1.9062                                 | 0.001 173                             | 0.104 41                     | 895.53                        | 1703.9                   | 2599.5                       | 897.76                        | 1964.7                   | 2757.5                       | 2.3021                        | 12.0876                  | 9.5957                       |
| 215              | 2.104                                  | 0.001 181                             | 0.094 79                     | 918.14                        | 1682.9                   | 2601.1                       | 920.62                        | 1944.0                   | 2757.8                       | 2.3363                        | 12.2333                  | 9.6217                       |
| 220              | 2.318                                  | 0.001 190                             | 0.086 15                     | 940.87                        | 1661.5                   | 2602.4                       | 943.62                        | 1922.6                   | 2757.8                       | 2.3700                        | 12.3785                  | 9.6472                       |
| 225              | 2.545                                  | 0.001 199                             | 0.078 49                     | 963.73                        | 1639.6                   | 2603.3                       | 966.78                        | 1900.5                   | 2757.5                       | 2.4032                        | 12.5232                  | 9.6723                       |

(Continued)

| Temp.<br>°C<br>T | Sat.<br>press.<br>MPa<br>P <sub>sat</sub> | Specific volume<br>m <sup>3</sup> /kg |                                 | Internal energy<br>kJ/kg         |                          |                                 | Enthalpy<br>kJ/kg                |                          |                                 | Entropy<br>kJ/(kg·K)             |                          |                                 |
|------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
|                  |                                           | Sat.<br>liquid<br>v <sub>f</sub>      | Sat.<br>vapor<br>v <sub>g</sub> | Sat.<br>liquid<br>u <sub>f</sub> | Evap.<br>u <sub>fg</sub> | Sat.<br>vapor<br>u <sub>g</sub> | Sat.<br>liquid<br>h <sub>f</sub> | Evap.<br>h <sub>fg</sub> | Sat.<br>vapor<br>h <sub>g</sub> | Sat.<br>liquid<br>s <sub>f</sub> | Evap.<br>s <sub>fg</sub> | Sat.<br>vapor<br>s <sub>g</sub> |
| 230              | 2.795                                     | 0.001 209                             | 0.071 58                        | 986.74                           | 1617.2                   | 2603.9                          | 990.12                           | 1813.8                   | 2804.0                          | 2.6099                           | 3.6047                   | 6.214                           |
| 235              | 3.060                                     | 0.001 219                             | 0.065 37                        | 1009.89                          | 1594.2                   | 2604.1                          | 1013.62                          | 1790.5                   | 2804.2                          | 2.6558                           | 3.5233                   | 6.174                           |
| 240              | 3.344                                     | 0.001 229                             | 0.059 76                        | 1033.21                          | 1570.8                   | 2604.0                          | 1037.32                          | 1766.5                   | 2803.8                          | 2.7015                           | 3.4422                   | 6.144                           |
| 245              | 3.648                                     | 0.001 240                             | 0.054 71                        | 1056.71                          | 1546.7                   | 2603.4                          | 1061.23                          | 1741.7                   | 2803.0                          | 2.7472                           | 3.3612                   | 6.114                           |
| 250              | 3.973                                     | 0.001 251                             | 0.050 13                        | 1080.39                          | 1522.0                   | 2602.4                          | 1085.36                          | 1716.2                   | 2801.5                          | 2.7927                           | 3.2802                   | 6.084                           |
| 255              | 4.319                                     | 0.001 263                             | 0.045 98                        | 1104.28                          | 1596.7                   | 2600.9                          | 1109.73                          | 1689.5                   | 2799.5                          | 2.8383                           | 3.1992                   | 6.054                           |
| 260              | 4.688                                     | 0.001 276                             | 0.042 21                        | 1128.39                          | 1470.6                   | 2599.0                          | 1134.37                          | 1662.5                   | 2796.9                          | 2.8838                           | 3.1181                   | 6.024                           |
| 265              | 5.081                                     | 0.001 289                             | 0.038 77                        | 1152.74                          | 1443.9                   | 2596.6                          | 1159.28                          | 1634.4                   | 2793.6                          | 2.9294                           | 3.0368                   | 5.994                           |
| 270              | 5.499                                     | 0.001 302                             | 0.035 64                        | 1177.36                          | 1416.3                   | 2593.7                          | 1184.51                          | 1605.2                   | 2789.7                          | 2.9751                           | 2.9551                   | 5.964                           |
| 275              | 5.942                                     | 0.001 317                             | 0.032 79                        | 1202.25                          | 1387.9                   | 2590.2                          | 1210.07                          | 1574.9                   | 2785.0                          | 3.0208                           | 2.8730                   | 5.934                           |
| 280              | 6.412                                     | 0.001 332                             | 0.030 17                        | 1227.46                          | 1358.7                   | 2586.1                          | 1235.99                          | 1543.6                   | 2779.6                          | 3.0668                           | 2.7903                   | 5.904                           |
| 285              | 6.909                                     | 0.001 346                             | 0.027 77                        | 1253.00                          | 1328.4                   | 2581.4                          | 1262.31                          | 1511.0                   | 2773.3                          | 3.1130                           | 2.7070                   | 5.874                           |
| 290              | 7.436                                     | 0.001 366                             | 0.025 57                        | 1278.92                          | 1297.1                   | 2576.0                          | 1289.07                          | 1477.1                   | 2766.2                          | 3.1594                           | 2.6227                   | 5.844                           |
| 295              | 7.993                                     | 0.001 384                             | 0.023 54                        | 1305.2                           | 1264.7                   | 2569.9                          | 1316.3                           | 1441.8                   | 2758.1                          | 3.2062                           | 2.5375                   | 5.814                           |
| 300              | 8.581                                     | 0.001 404                             | 0.021 67                        | 1332.0                           | 1231.0                   | 2563.0                          | 1344.0                           | 1404.9                   | 2749.0                          | 3.2534                           | 2.4511                   | 5.784                           |
| 305              | 9.202                                     | 0.001 425                             | 0.019 948                       | 1359.3                           | 1195.9                   | 2555.2                          | 1372.4                           | 1366.4                   | 2739.7                          | 3.3010                           | 2.3633                   | 5.754                           |
| 310              | 9.856                                     | 0.001 447                             | 0.018 350                       | 1387.1                           | 1159.4                   | 2546.4                          | 1401.3                           | 1326.0                   | 2727.3                          | 3.3493                           | 2.2737                   | 5.724                           |
| 315              | 10.547                                    | 0.001 472                             | 0.016 867                       | 1415.5                           | 1121.1                   | 2536.6                          | 1431.0                           | 1283.5                   | 2714.5                          | 3.3982                           | 2.1821                   | 5.694                           |
| 320              | 11.274                                    | 0.001 499                             | 0.015 488                       | 1444.6                           | 1080.9                   | 2525.5                          | 1461.5                           | 1238.6                   | 2700.1                          | 3.4460                           | 2.0882                   | 5.664                           |
| 330              | 12.845                                    | 0.001 561                             | 0.012 924                       | 1495.3                           | 993.7                    | 2498.9                          | 1525.3                           | 1140.6                   | 2665.9                          | 3.5507                           | 1.8907                   | 5.644                           |
| 340              | 14.586                                    | 0.001 638                             | 0.010 797                       | 1570.3                           | 894.3                    | 2464.6                          | 1594.2                           | 1027.9                   | 2622.0                          | 3.6594                           | 1.6763                   | 5.624                           |
| 350              | 16.513                                    | 0.001 740                             | 0.008 513                       | 1641.9                           | 776.6                    | 2418.4                          | 1670.6                           | 893.4                    | 2563.9                          | 3.7777                           | 1.4335                   | 5.604                           |
| 360              | 18.651                                    | 0.001 893                             | 0.006 215                       | 1709.2                           | 626.3                    | 2351.5                          | 1760.5                           | 720.3                    | 2481.0                          | 3.9147                           | 1.1375                   | 5.584                           |
| 370              | 21.03                                     | 0.002 213                             | 0.004 505                       | 1744.7                           | 434.5                    | 2278.5                          | 1890.5                           | 441.6                    | 2332.1                          | 4.1106                           | 0.6665                   | 5.564                           |
| 374.14           | 22.09                                     | 0.003 155                             | 0.003 155                       | 1744.7                           | 0                        | 2278.5                          | 1890.5                           | 0                        | 2332.1                          | 4.4296                           | 0                        | 5.564                           |

Source: Gordon J. Van Wylen and Richard E. Sonntag, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*, English/SI Version, 3d ed., Wiley, New York, 1986, pp. 635–637, table A.1.1. Originally published in Joseph H. Keenan, Frederick G. Keyes, Philip G. Hill and Joe Moore, *Steam Tables, SI Units*, Wiley, New York, 1978.

Sumber: Tabel Dasar-dasar Termodinamika SI versi 3d Uap Superheated

## Lampiran 2 Sifat-sifat Uap Panas Lanjut

| t<br>°C                 | P = 0.01 MPa (45.81°C) |            |            |                         | P = 0.05 MPa (101.33°C) |            |            |                         | P = 0.10 MPa (99.63°C) |            |            |                |
|-------------------------|------------------------|------------|------------|-------------------------|-------------------------|------------|------------|-------------------------|------------------------|------------|------------|----------------|
|                         | v<br>m³/kg             | h<br>kJ/kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/(kg·K)          | v<br>m³/kg              | h<br>kJ/kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/(kg·K)          | v<br>m³/kg             | h<br>kJ/kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/(kg·K) |
| 50                      | 14.674                 | 2437.9     | 2584.7     | 8.1502                  | 3.240                   | 2483.9     | 2645.9     | 7.5939                  | 1.6940                 | 2506.1     | 2675.5     | 7.3594         |
| 100                     | 14.869                 | 2443.9     | 2592.6     | 8.1749                  |                         |            |            |                         |                        |            |            |                |
| 150                     | 17.195                 | 2515.5     | 2687.5     | 8.4479                  | 3.418                   | 2511.6     | 2692.5     | 7.6947                  | 1.6958                 | 2506.7     | 2676.2     | 7.3614         |
| 200                     | 19.512                 | 2587.9     | 2783.0     | 8.6882                  | 3.889                   | 2565.6     | 2780.1     | 7.9401                  | 1.9364                 | 2582.8     | 2776.4     | 7.6134         |
| 250                     | 21.925                 | 2661.3     | 2879.5     | 8.9038                  | 4.356                   | 2659.9     | 2877.7     | 8.1560                  | 2.172                  | 2658.1     | 2875.3     | 7.8343         |
| 300                     | 24.126                 | 2736.0     | 2977.3     | 9.1002                  | 4.820                   | 2735.0     | 2976.0     | 8.3556                  | 2.406                  | 2733.7     | 2974.3     | 8.0333         |
| 350                     | 26.245                 | 2812.1     | 3076.5     | 9.2813                  | 5.264                   | 2811.3     | 3075.5     | 8.5373                  | 2.639                  | 2810.4     | 3074.3     | 8.2158         |
| 400                     | 31.063                 | 2966.9     | 3279.6     | 9.6077                  | 6.209                   | 2966.5     | 3278.9     | 8.8942                  | 3.103                  | 2967.9     | 3278.2     | 8.5435         |
| 450                     | 35.679                 | 3132.3     | 3489.1     | 9.8978                  | 7.134                   | 3132.0     | 3488.7     | 9.1546                  | 3.565                  | 3131.6     | 3488.1     | 8.8342         |
| 500                     | 40.295                 | 3302.5     | 3705.4     | 10.1608                 | 8.057                   | 3302.2     | 3705.1     | 9.4178                  | 4.028                  | 3301.9     | 3704.4     | 9.0976         |
| 550                     | 44.911                 | 3479.6     | 3928.7     | 10.4028                 | 8.981                   | 3479.4     | 3928.5     | 9.6599                  | 4.490                  | 3479.2     | 3928.2     | 9.3398         |
| 600                     | 49.526                 | 3663.8     | 4159.0     | 10.6261                 | 9.904                   | 3663.6     | 4158.9     | 9.8852                  | 4.952                  | 3663.5     | 4158.6     | 9.5652         |
| 650                     | 54.141                 | 3855.0     | 4396.4     | 10.8396                 | 10.828                  | 3854.9     | 4396.3     | 10.0967                 | 5.414                  | 3854.8     | 4396.1     | 9.7767         |
| 700                     | 58.757                 | 4053.0     | 4640.6     | 11.0393                 | 11.751                  | 4052.9     | 4640.5     | 10.2964                 | 5.875                  | 4052.8     | 4640.3     | 9.9764         |
| 750                     | 63.372                 | 4257.5     | 4891.2     | 11.2287                 | 12.674                  | 4257.4     | 4891.1     | 10.4659                 | 6.337                  | 4257.3     | 4891.0     | 10.1659        |
| 800                     | 67.987                 | 4467.9     | 5147.8     | 11.4091                 | 13.597                  | 4467.8     | 5147.7     | 10.6062                 | 6.799                  | 4467.7     | 5147.6     | 10.3463        |
| 850                     | 72.602                 | 4683.7     | 5409.7     | 11.5811                 | 14.521                  | 4683.6     | 5409.6     | 10.8382                 | 7.260                  | 4683.5     | 5409.5     | 10.5183        |
| P = 0.20 MPa (120.23°C) |                        |            |            | P = 0.30 MPa (133.55°C) |                         |            |            | P = 0.40 MPa (143.53°C) |                        |            |            |                |
| 900                     | 0.8857                 | 2529.5     | 2706.7     | 7.1272                  | 0.6056                  | 2543.6     | 2723.3     | 6.9919                  | 0.4625                 | 2553.6     | 2738.3     | 6.8659         |
| 950                     | 0.9596                 | 2576.9     | 2768.6     | 7.2795                  | 0.6539                  | 2578.8     | 2761.0     | 7.1776                  | 0.4768                 | 2564.5     | 2752.6     | 6.9299         |
| 1000                    | 1.0303                 | 2654.4     | 2870.5     | 7.5066                  | 0.7163                  | 2654.7     | 2855.0     | 7.3915                  | 0.5342                 | 2656.8     | 2850.5     | 7.1706         |
| 1050                    | 1.1988                 | 2721.2     | 2971.0     | 7.7066                  | 0.7964                  | 2728.7     | 2957.6     | 7.6311                  | 0.5921                 | 2726.1     | 2954.1     | 7.3769         |
| 1100                    | 1.3162                 | 2806.6     | 3071.8     | 7.8926                  | 0.8753                  | 2808.7     | 3059.3     | 7.8811                  | 0.6506                 | 2808.6     | 3052.8     | 7.5997         |
| 1150                    | 1.5493                 | 2966.7     | 3276.6     | 8.2218                  | 1.0315                  | 2968.8     | 3261.1     | 8.1311                  | 0.7101                 | 2968.7     | 3259.4     | 7.8156         |
| 1200                    | 1.7514                 | 3130.8     | 3487.1     | 8.5133                  | 1.1867                  | 3130.9     | 3462.9     | 8.3811                  | 0.7701                 | 3130.8     | 3459.9     | 8.0314         |
| 1250                    | 2.013                  | 3301.4     | 3704.0     | 8.7776                  | 1.3414                  | 3301.5     | 3703.7     | 8.6311                  | 0.8301                 | 3301.4     | 3702.4     | 8.2472         |
| 1300                    | 2.244                  | 3478.8     | 3927.6     | 9.0194                  | 1.4957                  | 3478.4     | 3927.1     | 8.8811                  | 0.8901                 | 3478.3     | 3925.9     | 8.4630         |
| 1350                    | 2.475                  | 3663.1     | 4158.2     | 9.2449                  | 1.6499                  | 3662.9     | 4157.8     | 9.0976                  | 0.9501                 | 3662.8     | 4157.5     | 8.6788         |
| 1400                    | 2.706                  | 3854.5     | 4395.8     | 9.4556                  | 1.8041                  | 3854.2     | 4395.4     | 9.2992                  | 1.0101                 | 3854.1     | 4395.1     | 8.8946         |
| 1450                    | 2.937                  | 4052.5     | 4640.0     | 9.6563                  | 1.9581                  | 4052.3     | 4639.7     | 9.4690                  | 1.0701                 | 4052.2     | 4639.4     | 9.1000         |
| 1500                    | 3.169                  | 4257.0     | 4890.7     | 9.8458                  | 2.1121                  | 4256.8     | 4890.4     | 9.6505                  | 1.1301                 | 4256.7     | 4890.2     | 9.2856         |
| 1550                    | 3.399                  | 4467.5     | 5147.5     | 10.0262                 | 2.2661                  | 4467.2     | 5147.1     | 9.8329                  | 1.1901                 | 4467.1     | 5146.9     | 9.4712         |
| 1600                    | 3.630                  | 4683.2     | 5409.3     | 10.1962                 | 2.4201                  | 4683.0     | 5409.0     | 10.0110                 | 1.2501                 | 4682.9     | 5408.8     | 9.6568         |
| P = 0.50 MPa (151.86°C) |                        |            |            | P = 0.60 MPa (158.85°C) |                         |            |            | P = 0.80 MPa (176.43°C) |                        |            |            |                |
| 1650                    | 0.3749                 | 2551.2     | 2748.7     | 6.8213                  | 0.3157                  | 2567.4     | 2756.8     | 6.7600                  | 0.2404                 | 2576.6     | 2769.1     | 6.6676         |
| 1700                    | 0.4249                 | 2642.9     | 2855.4     | 7.0592                  | 0.3520                  | 2638.9     | 2850.1     | 6.9665                  | 0.2605                 | 2630.6     | 2839.3     | 6.8158         |
| 1750                    | 0.4744                 | 2723.5     | 2960.7     | 7.2709                  | 0.3938                  | 2720.9     | 2957.2     | 7.1816                  | 0.2821                 | 2715.5     | 2950.0     | 7.0364         |
| 1800                    | 0.5226                 | 2802.9     | 3064.2     | 7.4599                  | 0.4344                  | 2801.0     | 3061.6     | 7.3724                  | 0.3041                 | 2797.2     | 3056.5     | 7.2328         |
| 1850                    | 0.5701                 | 2882.6     | 3167.7     | 7.6329                  | 0.4742                  | 2881.2     | 3165.7     | 7.5464                  | 0.3274                 | 2878.4     | 3161.7     | 7.4069         |
| 1900                    | 0.6173                 | 2963.2     | 3271.9     | 7.7938                  | 0.5137                  | 2962.1     | 3270.3     | 7.7079                  | 0.3543                 | 2959.7     | 3267.1     | 7.5716         |
| 1950                    | 0.7159                 | 3128.4     | 3483.9     | 8.0573                  | 0.5920                  | 3127.6     | 3482.8     | 8.0021                  | 0.4433                 | 3126.0     | 3480.6     | 7.8073         |
| 2000                    | 0.8041                 | 3299.6     | 3701.7     | 7.3522                  | 0.6697                  | 3299.1     | 3700.9     | 8.2674                  | 0.5018                 | 3297.9     | 3699.4     | 8.1323         |
| 2050                    | 0.8959                 | 3477.5     | 3925.9     | 8.5952                  | 0.7472                  | 3477.0     | 3925.3     | 8.5107                  | 0.5631                 | 3476.2     | 3924.2     | 8.3770         |
| 2100                    | 0.9896                 | 3662.1     | 4156.9     | 8.8211                  | 0.8245                  | 3661.6     | 4156.5     | 8.7567                  | 0.6161                 | 3661.1     | 4155.6     | 8.6093         |
| 2150                    | 1.0822                 | 3853.6     | 4394.7     | 9.0329                  | 0.9017                  | 3853.4     | 4394.4     | 8.9480                  | 0.6761                 | 3852.8     | 4393.7     | 8.8165         |
| 2200                    | 1.1747                 | 4051.8     | 4639.1     | 9.2326                  | 0.9788                  | 4051.5     | 4638.8     | 9.1485                  | 0.7340                 | 4051.0     | 4638.0     | 9.0153         |
| 2250                    | 1.2672                 | 4256.2     | 4889.9     | 9.4224                  | 1.0559                  | 4256.1     | 4889.6     | 9.3581                  | 0.7919                 | 4255.6     | 4889.1     | 9.2080         |
| 2300                    | 1.3596                 | 4466.6     | 5146.6     | 9.5929                  | 1.1330                  | 4466.5     | 5146.3     | 9.5165                  | 0.8497                 | 4466.1     | 5145.9     | 9.3984         |
| 2350                    | 1.4521                 | 4682.5     | 5409.6     | 9.7749                  | 1.2101                  | 4682.3     | 5408.3     | 9.6906                  | 0.9076                 | 4681.8     | 5407.5     | 9.5779         |

| T<br>°C                        | v<br>m <sup>3</sup> /kg | u<br>kJ/kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/(kg·K)                 | v<br>m <sup>3</sup> /kg | u<br>kJ/kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/(kg·K)                 | v<br>m <sup>3</sup> /kg | u<br>kJ/kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/(kg·K) |
|--------------------------------|-------------------------|------------|------------|--------------------------------|-------------------------|------------|------------|--------------------------------|-------------------------|------------|------------|----------------|
| <b>P = 1.00 MPa (179.91°C)</b> |                         |            |            | <b>P = 1.20 MPa (187.99°C)</b> |                         |            |            | <b>P = 1.40 MPa (195.07°C)</b> |                         |            |            |                |
| Sat.                           | 0.194 44                | 2583.6     | 2778.1     | 6.5865                         | 0.163 33                | 2588.8     | 2784.8     | 6.5233                         | 0.140 84                | 2592.8     | 2790.0     | 6.4693         |
| 200                            | 0.2060                  | 2621.9     | 2827.9     | 6.6940                         | 0.169 30                | 2612.8     | 2815.9     | 6.5858                         | 0.143 02                | 2603.1     | 2803.3     | 6.4975         |
| 250                            | 0.2327                  | 2709.9     | 2942.6     | 6.9247                         | 0.192 34                | 2704.2     | 2935.0     | 6.8294                         | 0.163 50                | 2698.3     | 2927.2     | 6.7467         |
| 300                            | 0.2579                  | 2793.2     | 3051.2     | 7.1229                         | 0.2138                  | 2789.2     | 3045.8     | 7.0317                         | 0.182 28                | 2785.2     | 3040.4     | 6.9534         |
| 350                            | 0.2825                  | 2875.2     | 3157.7     | 7.3011                         | 0.2345                  | 2872.2     | 3153.6     | 7.2121                         | 0.2002                  | 2869.2     | 3149.5     | 7.1360         |
| 400                            | 0.3066                  | 2957.3     | 3263.9     | 7.4651                         | 0.2548                  | 2954.9     | 3260.7     | 7.3774                         | 0.2178                  | 2952.5     | 3257.5     | 7.3026         |
| 500                            | 0.3541                  | 3124.4     | 3478.5     | 7.7622                         | 0.2946                  | 3122.8     | 3476.3     | 7.6759                         | 0.2521                  | 3121.1     | 3474.1     | 7.6027         |
| 600                            | 0.4011                  | 3295.8     | 3697.9     | 8.0290                         | 0.3339                  | 3295.6     | 3696.3     | 7.9435                         | 0.2860                  | 3294.4     | 3694.8     | 7.8710         |
| 700                            | 0.4478                  | 3475.3     | 3923.1     | 8.2731                         | 0.3729                  | 3474.4     | 3922.0     | 8.1881                         | 0.3155                  | 3473.6     | 3920.0     | 8.1160         |
| 800                            | 0.4943                  | 3650.4     | 4154.7     | 8.4996                         | 0.4118                  | 3659.7     | 4153.8     | 8.4148                         | 0.3528                  | 3659.0     | 4153.0     | 8.3431         |
| 900                            | 0.5407                  | 3822.2     | 4392.9     | 8.7118                         | 0.4505                  | 3851.6     | 4392.2     | 8.6272                         | 0.3861                  | 3851.1     | 4391.5     | 8.5556         |
| 1000                           | 0.5871                  | 4050.5     | 4637.6     | 8.9119                         | 0.4892                  | 4050.0     | 4637.0     | 8.8274                         | 0.4192                  | 4042.5     | 4636.4     | 8.7559         |
| 1100                           | 0.6335                  | 4255.1     | 4888.6     | 9.1017                         | 0.5278                  | 4254.6     | 4888.0     | 9.0172                         | 0.4524                  | 4254.1     | 4887.5     | 8.9437         |
| 1200                           | 0.6798                  | 4465.6     | 5145.4     | 9.2822                         | 0.5665                  | 4465.1     | 5144.9     | 9.1977                         | 0.4855                  | 4464.7     | 5144.4     | 9.1262         |
| 1300                           | 0.7261                  | 4681.3     | 5407.4     | 9.4543                         | 0.6051                  | 4680.9     | 5407.0     | 9.3698                         | 0.5185                  | 4680.4     | 5406.5     | 9.2954         |
| <b>P = 1.60 MPa (201.41°C)</b> |                         |            |            | <b>P = 1.80 MPa (207.15°C)</b> |                         |            |            | <b>P = 2.00 MPa (212.42°C)</b> |                         |            |            |                |
| Sat.                           | 0.123 80                | 2596.0     | 2794.0     | 6.4218                         | 0.110 42                | 2593.4     | 2797.1     | 6.3794                         | 0.099 63                | 2600.3     | 2799.5     | 6.3409         |
| 225                            | 0.132 87                | 2644.7     | 2857.3     | 6.5518                         | 0.116 73                | 2636.6     | 2846.7     | 6.4604                         | 0.103 77                | 2628.3     | 2835.8     | 6.4147         |
| 250                            | 0.141 84                | 2692.3     | 2919.2     | 6.6732                         | 0.124 97                | 2694.0     | 2911.0     | 6.6226                         | 0.111 44                | 2679.6     | 2902.5     | 6.5453         |
| 300                            | 0.158 62                | 2781.1     | 3034.8     | 6.8844                         | 0.140 21                | 2776.9     | 3029.2     | 6.8226                         | 0.129 47                | 2772.6     | 3023.5     | 6.7624         |
| 350                            | 0.174 56                | 2866.1     | 3145.4     | 7.0694                         | 0.154 57                | 2863.0     | 3141.2     | 7.0140                         | 0.134 57                | 2859.8     | 3137.0     | 6.9323         |
| 400                            | 0.190 05                | 2950.1     | 3254.2     | 7.2374                         | 0.168 47                | 2947.7     | 3250.9     | 7.1794                         | 0.144 20                | 2945.2     | 3247.6     | 7.1231         |
| 500                            | 0.2203                  | 3119.5     | 3472.0     | 7.5390                         | 0.195 50                | 3117.9     | 3462.6     | 7.4631                         | 0.179 65                | 3116.2     | 3462.6     | 7.4377         |
| 600                            | 0.2500                  | 3293.3     | 3693.2     | 7.8080                         | 0.2320                  | 3292.1     | 3691.1     | 7.7111                         | 0.212 92                | 3290.9     | 3690.1     | 7.7024         |
| 700                            | 0.2794                  | 3472.7     | 3919.7     | 8.0500                         | 0.2682                  | 3471.6     | 3918.3     | 7.9353                         | 0.2423                  | 3470.9     | 3917.4     | 7.9427         |
| 800                            | 0.3086                  | 3658.3     | 4152.1     | 8.2808                         | 0.2742                  | 3657.6     | 4151.2     | 8.2058                         | 0.2467                  | 3657.0     | 4150.3     | 8.1769         |
| 900                            | 0.3377                  | 3850.5     | 4390.8     | 8.4935                         | 0.3001                  | 3849.9     | 4390.1     | 8.4386                         | 0.2700                  | 3849.3     | 4389.7     | 8.3816         |
| 1000                           | 0.3638                  | 4049.0     | 4635.8     | 8.6938                         | 0.3200                  | 4048.5     | 4635.2     | 8.6391                         | 0.2933                  | 4048.0     | 4634.6     | 8.4901         |
| 1100                           | 0.3958                  | 4253.7     | 4887.0     | 8.8837                         | 0.3518                  | 4253.2     | 4886.4     | 8.8290                         | 0.3106                  | 4252.7     | 4885.9     | 8.6890         |
| 1200                           | 0.4248                  | 4464.2     | 5143.3     | 9.0643                         | 0.3776                  | 4463.7     | 5143.4     | 9.0096                         | 0.3396                  | 4463.3     | 5142.9     | 9.0607         |
| 1300                           | 0.4538                  | 4679.9     | 5406.0     | 9.2364                         | 0.4034                  | 4679.5     | 5405.6     | 9.1818                         | 0.3631                  | 4679.0     | 5405.1     | 9.1329         |
| <b>P = 2.50 MPa (223.99°C)</b> |                         |            |            | <b>P = 3.00 MPa (233.90°C)</b> |                         |            |            | <b>P = 3.50 MPa (242.60°C)</b> |                         |            |            |                |
| Sat.                           | 0.079 98                | 2603.1     | 2803.1     | 6.2575                         | 0.066 68                | 2604.1     | 2804.2     | 6.1869                         | 0.057 07                | 2603.7     | 2803.4     | 6.1253         |
| 225                            | 0.080 27                | 2605.6     | 2806.3     | 6.2639                         | 0.070 58                | 2644.0     | 2855.8     | 6.2872                         | 0.058 72                | 2623.7     | 2829.2     | 6.1749         |
| 250                            | 0.087 00                | 2662.6     | 2880.1     | 6.4085                         | 0.081 14                | 2750.1     | 2993.5     | 6.5390                         | 0.068 42                | 2738.0     | 2977.5     | 6.4481         |
| 300                            | 0.098 90                | 2761.6     | 3008.8     | 6.6438                         | 0.090 53                | 2843.7     | 3115.3     | 6.7428                         | 0.076 78                | 2835.3     | 3104.0     | 6.6576         |
| 350                            | 0.109 76                | 2851.9     | 3126.3     | 6.8402                         | 0.099 36                | 2932.8     | 3220.9     | 6.9212                         | 0.084 53                | 2926.4     | 3222.3     | 6.8406         |
| 400                            | 0.120 10                | 2929.1     | 3239.3     | 7.0148                         | 0.107 87                | 3022.4     | 3344.0     | 7.0834                         | 0.091 96                | 3015.3     | 3337.2     | 7.0050         |
| 450                            | 0.130 14                | 3025.5     | 3350.8     | 7.1746                         | 0.116 15                | 3108.0     | 3456.5     | 7.2338                         | 0.099 16                | 3103.0     | 3450.9     | 7.1571         |
| 500                            | 0.139 93                | 3112.1     | 3462.1     | 7.3234                         | 0.132 43                | 3285.0     | 3682.3     | 7.5095                         | 0.113 24                | 3282.1     | 3678.4     | 7.4301         |
| 600                            | 0.159 30                | 3286.0     | 3686.3     | 7.5960                         | 0.148 38                | 3466.5     | 3911.7     | 7.7571                         | 0.126 99                | 3464.3     | 3908.6     | 7.6807         |
| 700                            | 0.178 32                | 3468.7     | 3914.5     | 7.8425                         | 0.164 14                | 3653.5     | 4145.9     | 7.9862                         | 0.140 56                | 3651.8     | 4143.7     | 7.9128         |
| 800                            | 0.197 16                | 3655.3     | 4148.2     | 8.0720                         | 0.179 60                | 3846.5     | 4385.9     | 8.1923                         | 0.154 02                | 3845.0     | 4384.1     | 8.1371         |
| 900                            | 0.215 90                | 3847.9     | 4387.6     | 8.2853                         | 0.195 41                | 4045.4     | 4631.6     | 8.4009                         | 0.167 43                | 4044.1     | 4630.1     | 8.3200         |
| 1000                           | 0.2346                  | 4046.7     | 4633.1     | 8.4801                         | 0.210 98                | 4250.3     | 4883.3     | 8.5912                         | 0.180 80                | 4249.2     | 4881.9     | 8.5139         |
| 1100                           | 0.2532                  | 4251.5     | 4884.6     | 8.6762                         | 0.220 52                | 4460.9     | 5140.5     | 8.7720                         | 0.194 15                | 4459.8     | 5139.3     | 8.7011         |
| 1200                           | 0.2718                  | 4462.1     | 5141.7     | 8.8569                         | 0.242 00                | 4676.6     | 5402.3     | 8.9442                         | 0.207 49                | 4675.5     | 5401.7     | 8.8671         |
| 1300                           | 0.2905                  | 4677.8     | 5404.0     | 9.0291                         |                         |            |            |                                |                         |            |            |                |

Sumber: Tabel Dasar-dasar Termodinamika SI versi 3d Uap Saturheated

| No.                 | Substance        | Formula                          | Molecular Weight | Lb per Cu Ft | Cu Ft per Lb | Sp Gr Air = 1.0000 | Heat of Combustion |                |              |                 | For 100% Total Air Moles per mole of Combustible or Cu Ft per Cu Ft of Combustible |                |                |                |     |                 | For 100% Total Air Lb per Lb of Combustible |                |       |               |      |      |
|---------------------|------------------|----------------------------------|------------------|--------------|--------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|-----|-----------------|---------------------------------------------|----------------|-------|---------------|------|------|
|                     |                  |                                  |                  |              |              |                    | Gross (High)       | Net (Low)      | Gross (High) | Net (Low)       | Required for Combustion                                                            |                |                | Flue Products  |     |                 | Required for Combustion                     |                |       | Flue Products |      |      |
|                     |                  |                                  |                  |              |              |                    | O <sub>2</sub>     | N <sub>2</sub> | Air          | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O                                                                   | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> | Air | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O                            | N <sub>2</sub> |       |               |      |      |
| 1                   | Carbon*          | C                                | 12.01            | —            | —            | —                  | —                  | —              | 14,093       | 14,093          | 1.0                                                                                | 3.76           | 4.76           | 1.0            | —   | 3.76            | 2.66                                        | 8.06           | 11.53 | 3.66          | —    | 8.0  |
| 2                   | Hydrogen         | H <sub>2</sub>                   | 2.016            | 0.0053       | 187.723      | 0.0696             | 325                | 275            | 61,095       | 51,623          | 0.5                                                                                | 1.88           | 2.38           | —              | 1.0 | 1.88            | 7.94                                        | 26.41          | 34.34 | —             | 8.94 | 26.4 |
| 3                   | Oxygen           | O <sub>2</sub>                   | 32.00            | 0.0846       | 11.819       | 1.1053             | —                  | —              | —            | —               | —                                                                                  | —              | —              | —              | —   | —               | —                                           | —              | —     | —             | —    | —    |
| 4                   | Nitrogen (atm)   | N <sub>2</sub>                   | 28.01            | 0.0744       | 13.443       | 0.9718             | —                  | —              | —            | —               | —                                                                                  | —              | —              | —              | —   | —               | —                                           | —              | —     | —             | —    | —    |
| 5                   | Carbon monoxide  | CO                               | 28.01            | 0.0740       | 13.506       | 0.9672             | 321                | 321            | 4,347        | 4,347           | 0.5                                                                                | 1.88           | 2.38           | 1.0            | —   | 1.88            | 0.57                                        | 1.90           | 2.47  | 1.57          | —    | 1.5  |
| 6                   | Carbon dioxide   | CO <sub>2</sub>                  | 44.01            | 0.1170       | 8.548        | 1.5282             | —                  | —              | —            | —               | —                                                                                  | —              | —              | —              | —   | —               | —                                           | —              | —     | —             | —    | —    |
| Paraffin series     |                  |                                  |                  |              |              |                    |                    |                |              |                 |                                                                                    |                |                |                |     |                 |                                             |                |       |               |      |      |
| 7                   | Methane          | CH <sub>4</sub>                  | 16.04            | 0.0425       | 23.552       | 0.5543             | 1012               | 911            | 23,875       | 21,495          | 2.0                                                                                | 7.53           | 9.53           | 1.0            | 2.0 | 7.53            | 3.99                                        | 13.28          | 17.27 | 2.74          | 2.25 | 13.2 |
| 8                   | Ethane           | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>    | 30.07            | 0.0803       | 12.455       | 1.0488             | 1773               | 1622           | 22,323       | 20,418          | 3.5                                                                                | 13.18          | 16.68          | 2.0            | 3.0 | 13.18           | 3.73                                        | 12.39          | 16.12 | 2.93          | 1.80 | 12.1 |
| 9                   | Propane          | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>    | 44.09            | 0.1196       | 8.365        | 1.5617             | 2524               | 2322           | 21,669       | 19,937          | 5.0                                                                                | 18.82          | 23.82          | 3.0            | 4.0 | 18.82           | 3.63                                        | 12.07          | 15.70 | 2.99          | 1.63 | 12.0 |
| 10                  | n-Butane         | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>   | 58.12            | 0.1582       | 6.321        | 2.0665             | 3271               | 3018           | 21,321       | 19,678          | 6.5                                                                                | 24.47          | 30.97          | 4.0            | 5.0 | 24.47           | 3.58                                        | 11.91          | 15.49 | 3.03          | 1.55 | 11.5 |
| 11                  | Isobutane        | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>   | 58.12            | 0.1582       | 6.321        | 2.0665             | 3261               | 3009           | 21,271       | 19,628          | 6.5                                                                                | 24.47          | 30.97          | 4.0            | 5.0 | 24.47           | 3.58                                        | 11.91          | 15.49 | 3.03          | 1.55 | 11.9 |
| 12                  | n-Pentane        | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>   | 72.15            | 0.1904       | 5.252        | 2.4872             | 4020               | 3717           | 21,095       | 19,507          | 8.0                                                                                | 30.11          | 38.11          | 5.0            | 6.0 | 30.11           | 3.55                                        | 11.81          | 15.35 | 3.05          | 1.50 | 11.8 |
| 13                  | Isopentane       | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>   | 72.15            | 0.1904       | 5.252        | 2.4872             | 4011               | 3708           | 21,047       | 19,459          | 8.0                                                                                | 30.11          | 38.11          | 5.0            | 6.0 | 30.11           | 3.55                                        | 11.81          | 15.35 | 3.05          | 1.50 | 11.8 |
| 14                  | Neopentane       | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>   | 72.15            | 0.1904       | 5.252        | 2.4872             | 3994               | 3692           | 20,978       | 19,390          | 8.0                                                                                | 30.11          | 38.11          | 5.0            | 6.0 | 30.11           | 3.55                                        | 11.81          | 15.35 | 3.05          | 1.50 | 11.8 |
| 15                  | n-Hexane         | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>   | 86.17            | 0.2274       | 4.398        | 2.9704             | 4768               | 4415           | 20,966       | 19,415          | 9.5                                                                                | 35.76          | 45.26          | 6.0            | 7.0 | 35.76           | 3.53                                        | 11.74          | 15.27 | 3.06          | 1.46 | 11.7 |
| Olefin series       |                  |                                  |                  |              |              |                    |                    |                |              |                 |                                                                                    |                |                |                |     |                 |                                             |                |       |               |      |      |
| 16                  | Ethylene         | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>    | 28.05            | 0.0742       | 13.475       | 0.9740             | 1604               | 1503           | 21,636       | 20,275          | 3.0                                                                                | 11.29          | 14.29          | 2.0            | 2.0 | 11.29           | 3.42                                        | 11.39          | 14.81 | 3.14          | 1.29 | 11.3 |
| 17                  | Propylene        | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>    | 42.08            | 0.1110       | 9.007        | 1.4504             | 2340               | 2188           | 21,048       | 19,687          | 4.5                                                                                | 16.94          | 21.44          | 3.0            | 3.0 | 16.94           | 3.42                                        | 11.39          | 14.81 | 3.14          | 1.29 | 11.3 |
| 18                  | n-Butene         | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>    | 56.10            | 0.1480       | 6.756        | 1.9336             | 3084               | 2885           | 20,854       | 19,493          | 6.0                                                                                | 22.59          | 28.59          | 4.0            | 4.0 | 22.59           | 3.42                                        | 11.39          | 14.81 | 3.14          | 1.29 | 11.3 |
| 19                  | Isobutene        | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>    | 56.10            | 0.1480       | 6.756        | 1.9336             | 3069               | 2868           | 20,737       | 19,376          | 6.0                                                                                | 22.59          | 28.59          | 4.0            | 4.0 | 22.59           | 3.42                                        | 11.39          | 14.81 | 3.14          | 1.29 | 11.3 |
| 20                  | n-Pentene        | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>   | 70.13            | 0.1852       | 5.400        | 2.4190             | 3837               | 3585           | 20,720       | 19,359          | 7.5                                                                                | 28.23          | 35.73          | 5.0            | 5.0 | 28.23           | 3.42                                        | 11.39          | 14.81 | 3.14          | 1.29 | 11.3 |
| Aromatic series     |                  |                                  |                  |              |              |                    |                    |                |              |                 |                                                                                    |                |                |                |     |                 |                                             |                |       |               |      |      |
| 21                  | Benzene          | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>    | 78.11            | 0.2060       | 4.852        | 2.6920             | 3752               | 3601           | 18,184       | 17,451          | 7.5                                                                                | 28.23          | 35.73          | 6.0            | 3.0 | 28.23           | 3.07                                        | 10.22          | 13.30 | 3.38          | 0.69 | 10.2 |
| 22                  | Toluene          | C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>    | 92.13            | 0.2431       | 4.113        | 3.1760             | 4486               | 4285           | 18,501       | 17,672          | 9.0                                                                                | 33.88          | 42.88          | 7.0            | 4.0 | 33.88           | 3.13                                        | 10.40          | 13.53 | 3.34          | 0.78 | 10.4 |
| 23                  | Xylene           | C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>   | 106.16           | 0.2803       | 3.567        | 3.6618             | 5230               | 4980           | 18,650       | 17,760          | 10.5                                                                               | 39.52          | 50.02          | 8.0            | 5.0 | 39.52           | 3.17                                        | 10.53          | 13.70 | 3.32          | 0.85 | 10.5 |
| Miscellaneous gases |                  |                                  |                  |              |              |                    |                    |                |              |                 |                                                                                    |                |                |                |     |                 |                                             |                |       |               |      |      |
| 24                  | Acetylene        | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>    | 26.04            | 0.0697       | 14.344       | 0.9107             | 1477               | 1426           | 21,502       | 20,769          | 2.5                                                                                | 9.41           | 11.91          | 2.0            | 1.0 | 9.41            | 3.07                                        | 10.22          | 13.30 | 3.38          | 0.69 | 10.2 |
| 25                  | Naphthalene      | C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>   | 128.16           | 0.3384       | 2.955        | 4.4208             | 5854               | 5654           | 17,303       | 16,708          | 12.0                                                                               | 45.17          | 57.17          | 10.0           | 4.0 | 45.17           | 3.00                                        | 9.97           | 12.96 | 3.43          | 0.56 | 9.9  |
| 26                  | Methyl alcohol   | CH <sub>3</sub> OH               | 32.04            | 0.0846       | 11.820       | 1.1052             | 868                | 767            | 10,258       | 9,066           | 1.5                                                                                | 5.65           | 7.15           | 1.0            | 2.0 | 5.65            | 1.50                                        | 4.98           | 6.48  | 1.37          | 1.13 | 4.98 |
| 27                  | Ethyl alcohol    | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH | 46.07            | 0.1216       | 8.221        | 1.5890             | 1600               | 1449           | 13,161       | 11,917          | 3.0                                                                                | 11.29          | 14.29          | 2.0            | 3.0 | 11.29           | 2.08                                        | 6.93           | 9.02  | 1.92          | 1.17 | 6.93 |
| 28                  | Ammonia          | NH <sub>3</sub>                  | 17.03            | 0.0456       | 21.914       | 0.5961             | 441                | 364            | 9,667        | 7,985           | 0.75                                                                               | 2.82           | 3.57           | —              | 1.5 | 3.32            | 1.41                                        | 4.69           | 6.10  | —             | 1.59 | 5.51 |
| 29                  | Sulfur*          | S                                | 32.06            | —            | —            | —                  | —                  | —              | 3,980        | 3,980           | 1.0                                                                                | 3.76           | 4.76           | 1.0            | —   | 3.76            | 1.00                                        | 3.29           | 4.29  | 2.00          | —    | 3.29 |
| 30                  | Hydrogen sulfide | H <sub>2</sub> S                 | 34.08            | 0.0911       | 10.979       | 1.1898             | 646                | 595            | 7,097        | 6,537           | 1.5                                                                                | 5.65           | 7.15           | 1.0            | 1.0 | 5.65            | 1.41                                        | 4.69           | 6.10  | 1.88          | 0.53 | 4.69 |
| 31                  | Sulfur dioxide   | SO <sub>2</sub>                  | 64.06            | 0.1733       | 5.770        | 2.2640             | —                  | —              | —            | —               | —                                                                                  | —              | —              | —              | —   | —               | —                                           | —              | —     | —             | —    | —    |
|                     | Water vapor      | H <sub>2</sub> O                 | 18.02            | 0.0476       | 21.017       | 0.6215             | —                  | —              | —            | —               | —                                                                                  | —              | —              | —              | —   | —               | —                                           | —              | —     | —             | —    | —    |
|                     |                  |                                  | —                | 0.0766       | 13.063       | 1.0000             | —                  | —              | —            | —               | —                                                                                  | —              | —              | —              | —   | —               | —                                           | —              | —     | —             | —    | —    |

LAMPIRAN 3 Tabel Combustion Constant

### LAMPIRAN 4 Konduktivitas Bahan Isolasi

| BAHAN                                | Suhu Rata-rata (F) | $k$ (Btu/hr ft F) | $c$ (Btu/lb <sub>m</sub> F) | $\rho$ (lb <sub>m</sub> /ft <sup>3</sup> ) | $\alpha$ (ft <sup>2</sup> /h) |
|--------------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------|
| <b>Bahan isolasi</b>                 |                    |                   |                             |                                            |                               |
| 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               | 0,088             | ....                        | ....                                       | ....                          |
| <b>Wol kaca</b>                      |                    |                   |                             |                                            |                               |
| 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                                        | ....                          |
| <b>Isolasi kaolin</b>                |                    |                   |                             |                                            |                               |
| bata                                 | 932                | 0,15              | ....                        | 27                                         | ....                          |
|                                      | 2102               | 0,26              | ....                        | ....                                       | ....                          |
| <b>Isolasi kaolin bata tahan api</b> |                    |                   |                             |                                            |                               |
|                                      | 392                | 0,05              | ....                        | 19                                         | ....                          |
|                                      | 1400               | 0,11              | ....                        | ....                                       | ....                          |
| <b>Magnesia 85%</b>                  |                    |                   |                             |                                            |                               |
|                                      | 32                 | 0,032             | ....                        | 17                                         | ....                          |
|                                      | 200                | 0,037             | ....                        | 17                                         | ....                          |
| <b>Wol batu</b>                      |                    |                   |                             |                                            |                               |
|                                      | 20                 | 0,017             | ....                        | 8                                          | ....                          |
|                                      | 200                | 0,030             | ....                        | ....                                       | ....                          |
| Karet                                | 32                 | 0,087             | 0,48                        | 75                                         | 0,0024                        |
| <b>Bahan bangunan</b>                |                    |                   |                             |                                            |                               |
| <b>Bata</b>                          |                    |                   |                             |                                            |                               |
| 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              | ....                        | ....                                       | ....                          |
| <b>Bata khrom</b>                    |                    |                   |                             |                                            |                               |
|                                      | 392                | 0,82              | ....                        | 246                                        | ....                          |
|                                      | 1832               | 0,96              | ....                        | ....                                       | ....                          |
| <b>Beton</b>                         |                    |                   |                             |                                            |                               |
| 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                         |
| <b>Pasir</b>                         |                    |                   |                             |                                            |                               |
| Kering                               | 68                 | 0,20              | ....                        | 95                                         | ....                          |
| 10% H <sub>2</sub> O                 | 68                 | 0,60              | ....                        | 100                                        | ....                          |
| <b>Tanah</b>                         |                    |                   |                             |                                            |                               |
| Kering                               | 70                 | ~0,20             | 0,44                        | ....                                       | ~0,01                         |
| Basah                                | 70                 | ~1,5              | ....                        | ....                                       | ~0,03                         |
| <b>Kayu</b>                          |                    |                   |                             |                                            |                               |
| Oak 1 serat                          | 70                 | 0,12              | 0,57                        | 51                                         | 0,0041                        |
| 1 serat                              | 70                 | 0,20              | 0,57                        | 51                                         | 0,0069                        |
| Pinus 1 serat                        | 70                 | 0,06              | 0,67                        | 31                                         | 0,0029                        |
| 1 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)



Tabel 5. Entalpi Gas

| T, R   | CO        |              | CO <sub>2</sub> |              | H <sub>2</sub> |              | H <sub>2</sub> O |              | N <sub>2</sub> |              | 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       | 5550.3          | 53.539       | 4772.5         | 33.054       | 5578.9           | 47.250       | 4864.8         | 47.615       | 700    |
| 800    | 5569.2    | 49.999       | 6551.1          | 54.874       | 5469.9         | 33.985       | 6401.1           | 48.348       | 5564.4         | 48.549       | 800    |
| 900    | 6277.5    | 50.833       | 7596.3          | 56.105       | 6168.8         | 34.808       | 7235.7           | 49.331       | 6268.4         | 49.378       | 900    |
| 1000   | 6993.3    | 51.587       | 8681.2          | 57.248       | 6868.4         | 35.545       | 8083.9           | 50.224       | 6978.3         | 50.126       | 1000   |
| 1100   | 7717.7    | 52.278       | 9801.7          | 58.315       | 7568.5         | 36.213       | 8946.8           | 51.047       | 7695.2         | 50.810       | 1100   |
| 1200   | 8451.4    | 52.916       | 10954.1         | 59.318       | 8269.6         | 36.823       | 9825.0           | 51.811       | 8420.2         | 51.440       | 1200   |
| 1300   | 9194.7    | 53.511       | 12135.2         | 60.263       | 8972.2         | 37.385       | 10719.0          | 52.526       | 9153.7         | 52.027       | 1300   |
| 1400   | 9947.9    | 54.069       | 13342.3         | 61.158       | 9677.0         | 37.907       | 11629.3          | 53.201       | 9896.2         | 52.578       | 1400   |
| 1600   | 11482.8   | 55.094       | 15824.6         | 62.814       | 11096.3        | 38.855       | 13499.2          | 54.449       | 11408.3        | 53.587       | 1600   |
| 1800   | 13052.4   | 56.018       | 18384.8         | 64.322       | 12531.1        | 39.700       | 15436.2          | 55.589       | 12954.5        | 54.497       | 1800   |
| 2000   | 14651.7   | 56.860       | 21007.9         | 65.703       | 13984.3        | 40.465       | 17441.0          | 56.645       | 14530.7        | 55.327       | 2000   |
| 2200   | 16276.9   | 57.635       | 23684.9         | 66.979       | 15458.4        | 41.168       | 19513.6          | 57.632       | 16134.4        | 56.092       | 2200   |
| 2400   | 17924.1   | 58.351       | 26406.7         | 68.163       | 16954.6        | 41.819       | 21649.5          | 58.561       | 17761.7        | 56.800       | 2400   |
| 2600   | 19590.3   | 59.018       | 29165.8         | 69.267       | 18473.6        | 42.426       | 23844.0          | 59.439       | 19409.2        | 57.459       | 2600   |
| 2800   | 21272.7   | 59.641       | 31955.9         | 70.301       | 20015.6        | 42.998       | 26093.0          | 60.273       | 21075.9        | 58.076       | 2800   |
| 3000   | 22968.9   | 60.226       | 34772.1         | 71.272       | 21580.3        | 43.537       | 28392.2          | 61.066       | 22753.4        | 58.655       | 3000   |
| 3200   | 24677.1   | 60.778       | 37610.3         | 72.188       | 23167.3        | 44.050       | 30737.7          | 61.823       | 24445.8        | 59.201       | 3200   |
| 3400   | 26395.5   | 61.298       | 40467.4         | 73.054       | 24775.6        | 44.537       | 33125.6          | 62.546       | 26149.3        | 59.717       | 3400   |
| 3600   | 28122.9   | 61.792       | 43341.0         | 73.875       | 26404.2        | 45.002       | 35552.3          | 63.240       | 27862.6        | 60.207       | 3600   |
| 3800   | 29858.2   | 62.261       | 46229.5         | 74.656       | 28051.8        | 45.448       | 38014.5          | 63.905       | 29584.7        | 60.673       | 3800   |
| 4000   | 31600.5   | 62.708       | 49131.4         | 75.400       | 29717.2        | 45.875       | 40509.0          | 64.545       | 31314.5        | 61.116       | 4000   |
| 4200   | 33349.1   | 63.135       | 52046.0         | 76.111       | 31399.1        | 46.285       | 43033.0          | 65.161       | 33051.5        | 61.540       | 4200   |
| 4400   | 35103.4   | 63.543       | 54972.2         | 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 <sub>2</sub> |              | 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         | 50.889       | 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       | 10922.1   | 43.619       | 11276.0   | 45.615       | 16816.6   | 61.028       | 2200   |
| 2400   | 18583.0        | 60.616       | 11914.9   | 34.836       | 11915.1   | 44.051       | 12272.6   | 46.049       | 18495.9   | 61.758       | 2400   |
| 2600   | 20314.3        | 61.309       | 12907.5   | 35.233       | 12908.2   | 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   | 37.843       | 21847.3   | 47.051       | 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 |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------------|------------------|
| <b>Oxidized surfaces</b>                                                         |           |                  |                  |
| Iron plate, pickled, then rusted red .....                                       | 68        | 0.61             | 25               |
| Iron plate, completely rusted.....                                               | 67        | 0.69             | 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               |
| <b>Sheet steel</b>                                                               |           |                  |                  |
| 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               |
| <b>Molten surfaces</b>                                                           |           |                  |                  |
| 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 | 0.47-0.53        | 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               |
| <b>Lead:</b>                                                                     |           |                  |                  |
| Pure (99.99%), unoxidized.....                                                   | 260-440   | 0.057-0.076      | 26               |
| Gray oxidized.....                                                               | 76        | 0.28             | 25               |
| Oxidized at 300°F.....                                                           | 390       | 0.63             | 23               |
| <b>Magnesium:</b>                                                                |           |                  |                  |
| Magnesium oxide.....                                                             | 530-1520  | 0.65-0.20        | 21               |
| Magnesium oxide.....                                                             | 1650-3100 | 0.20             | 10               |
| Mercury.....                                                                     | 32-212    | 0.09-0.12        | 11               |
| <b>Molybdenum:</b>                                                               |           |                  |                  |
| Filament.....                                                                    | 1340-4700 | 0.090-0.202      | 37               |
| Mamiva, polished.....                                                            | 212       | 0.071            | 1                |
| <b>Monel metal:<sup>a</sup></b>                                                  |           |                  |                  |
| 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  | 0.35-0.53        | 36               |



( Sumber :J. P. Holman, Heat Transfer, edisi 8, hal 651 )

Tabel 7. Dimensi Pipa-pipa Baja

| Ukuran<br>Nominal pipa | Diameter luar | Skedul | Tebal dinding | Diameter<br>dalam | Luas<br>penampang<br>logam | Luas<br>penampang<br>dalam |
|------------------------|---------------|--------|---------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|
| in                     | in            | no.    | in            | in                | in <sup>2</sup>            | ft <sup>2</sup>            |
| 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 <sup>2</sup> -°F | $q/A$ , Btu/hr-ft <sup>2</sup> |
|----------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| Horizontal surface<br>(in wide vessel) | $h_c = 151(\Delta T)^{1/4}$        | $q/A < 5000$                   |
|                                        | $h_c = (0.168)(\Delta T)^{1/4}$    | $5000 < q/A < 75,000$          |
| Vertical surface<br>(in wide vessel)   | $h_c = 87(\Delta T)^{1/4}$         | $q/A < 1000$                   |
|                                        | $h_c = (0.24)(\Delta T)^{1/4}$     | $1000 < q/A < 20,000$          |
| Vertical tube<br>(interior)            | $h_c = 189(\Delta T)^{1/4}$        | $q/A < 5000$                   |
|                                        | $h_c = (0.21)(\Delta T)^{1/4}$     | $5000 < q/A < 75,000$          |

( 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                    | 2880  |
| 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

| $T, K$                | $\rho$<br>kg/m <sup>3</sup> | $c_p,$<br>kJ/kg · °C | $\mu,$ kg/m · s         | $\nu,$ m <sup>2</sup> /s | $k,$<br>W/m · °C | $\alpha,$ m <sup>2</sup> /s | Pr    |
|-----------------------|-----------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|------------------|-----------------------------|-------|
| <b>Carbon dioxide</b> |                             |                      |                         |                          |                  |                             |       |
| 220                   | 2.4733                      | 0.783                | $11.105 \times 10^{-6}$ | $4.490 \times 10^{-6}$   | 0.010805         | $0.05920 \times 10^{-4}$    | 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 |
| <b>Water vapor</b>    |                             |                      |                         |                          |                  |                             |       |
| 380                   | 0.5863                      | 2.060                | $12.71 \times 10^{-6}$  | $2.16 \times 10^{-5}$    | 0.0246           | $0.2036 \times 10^{-4}$     | 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  |
| <b>Seamless carbon steel</b>                   |        |                     |                  |              |                                          |        |        |            |        |        |        |        |        |        |        |       |       |       |       |       |
| 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  | --    | --    | --    | --    | --    |
| <b>Seamless alloy steel</b>                    |        |                     |                  |              |                                          |        |        |            |        |        |        |        |        |        |        |       |       |       |       |       |
| 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    | 1½ 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    | 2½ 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 | --         | 15,000 | 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 |
| <b>Seamless low-alloy steel</b>                |        |                     |                  |              |                                          |        |        |            |        |        |        |        |        |        |        |       |       |       |       |       |
| 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  | --    | --    | --    | --    | --    |
| <b>Electric-resistance welded carbon steel</b> |        |                     |                  |              |                                          |        |        |            |        |        |        |        |        |        |        |       |       |       |       |       |
| 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         |
| <b>Carbon steel</b>    |       |                     |                  |       |                                          |        |        |        |              |               |              |              |
| SA-285 A               |       | —                   | 45,000           | (1)   | 11,250                                   | 10,900 | 9,700  | 8,300  | <i>6,600</i> | <i>5,000</i>  | —            | —            |
| SA-285 B               |       | —                   | 50,000           | (1)   | 12,500                                   | 12,100 | 11,000 | 9,400  | <i>7,300</i> | <i>5,000</i>  | —            | —            |
| SA-285 C               |       | —                   | 55,000           | (1)   | 13,750                                   | 13,250 | 12,050 | 10,200 | <i>7,800</i> | <i>5,000</i>  | —            | —            |
| SA-515 55              |       | C-Si                | 55,000           | (1)   | 13,750                                   | 13,250 | 12,050 | 10,200 | <i>7,800</i> | <i>5,000</i>  | <i>3,000</i> | <i>1,500</i> |
| SA-515 60              |       | C-Si                | 60,000           | (1)   | 15,000                                   | 14,350 | 12,950 | 10,800 | <i>7,800</i> | <i>5,000</i>  | <i>3,000</i> | <i>1,500</i> |
| SA-515 65              |       | C-Si                | 65,000           | (1)   | 16,250                                   | 15,500 | 13,850 | 11,400 | <i>7,800</i> | <i>5,000</i>  | <i>3,000</i> | <i>1,500</i> |
| SA-515 70              |       | C-Si                | 70,000           | (1)   | 17,500                                   | 16,600 | 14,750 | 12,000 | <i>7,800</i> | <i>5,000</i>  | <i>3,000</i> | <i>1,500</i> |
| <b>Low-alloy steel</b> |       |                     |                  |       |                                          |        |        |        |              |               |              |              |
| SA-302 A               |       | Mn-½ Mo             | 75,000           | (2)   | 18,750                                   | 18,750 | 18,300 | 17,700 | 16,800       | <i>13,700</i> | <i>8,200</i> | <i>4,800</i> |
| SA-302 B               |       | Mn-½ Mo             | 80,000           | (2)   | 20,000                                   | 20,900 | 19,600 | 18,800 | 17,900       | <i>13,700</i> | <i>8,200</i> | <i>4,800</i> |

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 II. Values of C<sup>1</sup>

| Type of pipe                                            | Value of C, in. |
|---------------------------------------------------------|-----------------|
| Threaded pipe:                                          |                 |
| 3/8 in. and smaller.....                                | 0.05            |
| 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           |

<sup>1</sup> 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 formula.

( 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 <sub>m</sub> F) | ρ (lb <sub>m</sub> /ft <sup>3</sup> ) | α (ft <sup>2</sup> /h) |
|-------------------------------------|-----------------|-------|-------|-------|---------------------------|---------------------------------------|------------------------|
|                                     | 32 F            | 212 F | 572 F | 932 F | 32 F                      | 32 F                                  | 32 F                   |
| <b>Logam</b>                        |                 |       |       |       |                           |                                       |                        |
| Alumina .....                       | 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                   |
| <b>Paduan</b>                       |                 |       |       |       |                           |                                       |                        |
| Logam admiralti .....               | 65              | 64    | ..... | ..... | .....                     | .....                                 | .....                  |
| Kuningan 70% Cu,<br>30% Zn .....    | 56              | 60    | 66    | ..... | 0,092                     | 532                                   | 1,14                   |
| Perunggu 75% Cu,<br>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,<br>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                      | 400                                   | 0,49                   |

( Sumber :J. P. Holman, Heat Transfer, edisi 8, hal 641 )



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

No: 419 FT USD TM April 2004

NAMA : Bram Prasetyo  
NIM : 995214049  
NIRM : 990051123109120049  
Program Studi : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik , Univ. Sanata Dharma Yogyakarta  
Judul TGA :  
Rancang & Gambar sebuah " Lokomotif Bolier " untuk perkebunan  
tebu di daerah Sumatra.  
Tekanan : 17 bar. Bahan bakar : Batu Bara.  
Daya yang dihasilkan 100 PK.

Tanggal dimulai : 14 April 2004

Pembimbing II

Ir. FX. Agus Unggul Santoso

Yogyakarta , 26 April 2004

Pembimbing I

Ir. YB. Lukiyanto, M.T.



**JURUSAN TEKNIK MESIN**  
**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS SANATA DHARMA**  
 Kampus III, Paingan Maguwoharjo, Sleman -Yogyakarta  
 Telp.(0274) 883037, 883968, 886530; Fax.(0274) 886529; Email : teknik@staff.usd.ac.id

**TUGAS AKHIR / SKIPSI PROGRAM S-1**  
**JURUSAN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK**  
**UNIV. SANATA DHARMA YOGYAKARTA**

No. 419 / FT / USD / TM / April 2004

NAMA : Bram Prasetyo  
 NIM : 995214049  
 NIRM : 990051123109120049  
 Program Studi : Teknik Mesin  
 Fakultas : Teknik , Univ. Sanata Dharma Yogyakarta  
 Judul TGA :

Rancang & Gambar sebuah " Lokomotive Bolier " untuk perkebunan tebu di daerah Sumatra.  
 Tekanan : 17 bar. Bahan bakar : Batu Bara.  
 Daya yang dihasilkan 100 PK.

Tanggal dimulai : 14 April 2004

Pembimbing I : Ir. YB. Lukiyanto, M.T.  
 Pembimbing II : Ir. FX. Agus Unggul Santoso



| No | Tgl      | Uraian                                       | Keterangan                       | Tanda Tangan       |
|----|----------|----------------------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| 1  | 20/4/04  | Perhitungan belum, referensi?                | revisi dan lanjutkan             | <i>[Signature]</i> |
| 2  | 07/5/04  | jumlah B.B & Oz / jam? abu? suhu gas?        | revisi lihat nasional! lanjutkan | <i>[Signature]</i> |
| 3  | 17/5/04  | celi lagi p.p. pd pipa api! ger. dilengkapin | lanjutkan: superheater           | <i>[Signature]</i> |
| 4  | 29/5/04  | Perbaiki/revisi dahulu & konsultasikan       |                                  | <i>[Signature]</i> |
| 5  | 26/8/04  | lengkapin sumbu tabel!                       | celi kesetun bagian Energy!      | <i>[Signature]</i> |
| 6  | 4/9/04   | celi. kesetun bagian Energy                  | lanjutkan!                       | <i>[Signature]</i> |
| 7  | 12/10/04 | Muap?                                        | tinggi cerobong?                 | <i>[Signature]</i> |
| 8  | 24/11/04 | revisi editorial                             | celi lagi kebaruan?              | <i>[Signature]</i> |
| 9  |          |                                              |                                  |                    |
| 10 |          |                                              |                                  |                    |