

# **KARAKTERISTIK KETEL UAP PIPA AIR KAPASITAS 246 TON UAP/JAM**

## **TUGAS AKHIR**

**Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan  
Ujian Sarjana**

Oleh :

HAIRUL AMRI  
07.813.0044



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MEDAN AREA  
MEDAN  
2012**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 20/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

## **ABSTRACT**

*In the current energy crisis, Steam Power (power plant) is a thermal power plant that is widely used because it has good efficiency and can use various types of fuel according to its design. To produce steam energy conversion of the aircraft used steam boiler. Boiler is a combination of several components which work at high temperatures, such as on the inner walls of the waterwall and superheater tubes receiving heat from the smoke gases of combustion in the combustion chamber where in the circulating water. Besides boiler needs special attention because of working at high pressure so that pemiluhan material and the operation must comply with Standard Operating Procedure (SOP). Broadly speaking, the main part consists of the boiler combustion chamber, waterwall, drum and superheater tubes. In this design, the boiler has a capacity of 246 tons / hour with a working pressure of 89 bar and produced efficiencies of 89.8%.*

**Keywords: steam boiler, waterwall, superheater tubes**

## **ABSTRAK**

*Dalam kondisi krisis energi saat ini, Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan pembangkit termal yang banyak digunakan karena mempunyai efisiensi yang baik dan dapat menggunakan berbagai jenis bahan bakar sesuai rancangannya. Untuk memproduksi uapnya digunakan pesawat konversi energi yaitu ketel uap. Ketel uap merupakan gabungan dari beberapa peralatan yang bekerja pada temperatur tinggi, seperti waterwall pada dinding bagian dalam dan superheater tubes yang menerima panas dari gas asap hasil pembakaran di ruang bakar dimana di dalam bersirkulasi air. Disamping itu ketel uap perlu mendapat perhatian khusus karena bekerja pada tekanan tinggi sehingga pemiluhan materialnya dan pengoperasiannya harus sesuai dengan Standard Operating Procedure (SOP). Secara garis besar bagian utama ketel uap terdiri dari ruang bakar, waterwall, drum dan superheater tubes. Pada perancangan ini, ketel uap mempunyai kapasitas 246 ton/jam dengan tekanan kerja 89 bar dan menghasilkan efisiensi sebesar 89,8%.*

*Kata kunci : ketel uap, waterwall, superheater tubes*

## DAFTAR ISI

|                      |  |      |
|----------------------|--|------|
| LEMBAR PENGESAHAN    |  |      |
| KATA PENGANTAR ..... |  | i    |
| DAFTAR ISI .....     |  | iv   |
| DAFTAR GAMBAR .....  |  | vi   |
| DAFTAR TABEL .....   |  | vii  |
| DAFTAR NOTASI .....  |  | viii |
|                      |  |      |
| BAB 1                | PENDAHULUAN  |      |
| 1.1.                 | Latar belakang .....                                   | 1    |
| 1.2.                 | Tujuan Perencanaan .....                               | 3    |
| 1.3.                 | Batasan Masalah .....                                  | 3    |
| 1.4.                 | Metodologi Perencanaan .....                           | 4    |
| 1.5.                 | Sistematika Penulisan .....                            | 4    |
|                      |  |      |
| BAB 2                | TINJAUAN PUSTAKA                                       |      |
| 2.1.                 | Ketel Uap .....  | 6    |
| 2.2.                 | Klasifikasi Ketel Uap .....                            | 7    |
| 2.2.1.               | Ketel Pipa Api ( <i>fire-tube</i> ) .....              | 8    |
| 2.2.2.               | Ketel Pipa Air ( <i>water-tube</i> ) .....             | 9    |
| 2.3.                 | Bagian-bagian Utama Ketel Uap                          |      |
| 2.3.1.               | Ruang bakar .....                                      | 10   |
| 2.3.2.               | Bidang Pemanas .....                                   | 11   |
| 2.3.3.               | Air Pengisi .....                                      | 12   |
| 2.3.4.               | Ekonomiser .....                                       | 13   |
| 2.3.5.               | Alat Pemanas Lanjut ( <i>superheater</i> ) .....       | 13   |
| 2.3.6.               | Alat Pemanas Udara .....                               | 14   |
| 2.3.7.               | Pembuangan Gas Bekas .....                             | 14   |
| 2.3.8.               | Peralatan Asesoris .....                               | 15   |
| 2.4.                 | Perpindahan Panas pada Ketel Uap .....                 | 16   |
| 2.4.1.               | Radiasi (pancaran) .....                               | 17   |
| 2.4.2.               | Konveksi (aliran) .....                                | 17   |
| 2.4.3.               | Konduksi (rambatan) .....                              | 18   |
| 2.5.                 | Proses Pembakaran .....                                | 19   |
|                      |  |      |
| BAB 3                | PERHITUNGAN PERENCANAAN                                |      |
| 3.1.                 | Analisa Bahan Bakar .....                              | 21   |
| 3.1.1.               | Nilai kalor Bahan Bakar ( <i>heating value</i> ) ..... | 22   |
| 3.1.2.               | Kebutuhan Bahan Bakar .....                            | 23   |
| 3.1.3.               | Kebutuhan Udara Pembakaran .....                       | 24   |
| 3.1.4.               | Produksi Pembakaran .....                              | 26   |
| 3.1.5.               | Volume Gas Asap .....                                  | 29   |

|  |    |
|--|----|
| 3.1.6. Kalor Pembakaran .....  | 30 |
| 3.2. Perencanaan Ruang Bakar .....                                   | 31 |
| 3.2.1 Analisa Perpindahan Panas Ruang Bakar .....                    | 32 |
| 3.3. Perencanaan Pipa Waterwall .....                                | 35 |
| 3.3.1. Pemilihan Bahan Pipa Waterwall .....                          | 36 |
| 3.3.2. Perencanaan Jumlah Pipa Waterwall .....                       | 38 |
| 3.3.3. Perencanaan Panjang Pipa Waterwall.....                       | 40 |
| 3.4. Perencanaan Drum Ketel.....                                     | 41 |
| 3.4.1. Perhitungan Tebal Drum Berdasarkan Kemungkinan<br>Belah.....  | 42 |
| 3.4.2. Perhitungan Tebal Drum Berdasarkan Kemungkinan<br>Putus ..... | 45 |
| 3.4.3. Tebal Ujung Drum (tebal <i>front</i> ).....                   | 46 |
| 3.4.4. Dinding Drum Ketel .....                                      | 47 |
| 3.5. Perencanaan Pemanas Lanjut ( <i>superheater</i> ) .....         | 54 |
| 3.6. Perencanaan Dinding Ketel .....                                 | 55 |
| 3.6.1. Menggunakan Isolasi .....                                     | 55 |
| 3.6.2. Tanpa Isolasi .....   | 58 |
| 3.7. Neraca Kalor ( <i>heat balance</i> ) .....                      | 59 |
| 3.7.1. Panas yang dihasilkan .....                                   | 59 |
| 3.7.2. Konsumsi Panas .....  | 59 |
| 3.7.3. Kehilangan Panas .....  | 60 |
| <b>BAB 4</b> 4.1. KESIMPULAN .....                                   | 62 |
| 4.2. SARAN .....   | 65 |
| <b>DAFTAR PUSTAKA</b>  |    |
| <b>LAMPIRAN</b>  |    |

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Pada masa pembangunan dewasa ini, kebutuhan akan energi di Indonesia hari demi hari semakin meningkat. Usaha-usaha untuk memenuhinya dilakukan dengan berbagai macam cara, diantaranya dengan memanfaatkan aliran air ataupun air terjun maupun energi panas bumi (*geothermal*). Untuk itu diperlukan suatu kebijaksanaan dalam menyikapi penggunaannya.

Cara lain untuk memenuhi kebutuhan daya yang semakin meningkat tersebut ialah dengan mengkonversikan energi yang terkandung dalam bahan bakar konvensional menjadi daya yang dibutuhkan. Pemanfaatan bahan bakar konvensional ini, dapat menggunakan mesin torak disel ataupun turbin gas untuk skala kecil dan skala sedang. Namun untuk konversi energi dengan skala besar, dapat menggunakan kombinasi turbin gas dengan turbin uap (PLTGU) atau ketel uap dengan turbin uap (PLTU).

Ketel uap merupakan alat yang dapat mengubah fasa air menjadi fasa uap dengan cara memanfaatkan energi kimia yang terkandung pada bahan bakar yang kemudian dikonversikan menjadi energi panas di dalam ruang bakar. Pada umumnya ketel uap digolongkan dalam 2 jenis yaitu ketel api pipa dan ketel uap air. Ketel pipa api digunakan untuk memenuhi kebutuhan uap dengan kapasitas dan tekanan yang kecil sedangkan untuk pembangkit uap berskala besar dengan

UNIVERSITAS MEDAN AREA  
kegiatan yang sangat cocok dipakai ketel pipa air. Seperti di PT PLN (Persero)

Document Accepted 20/9/23

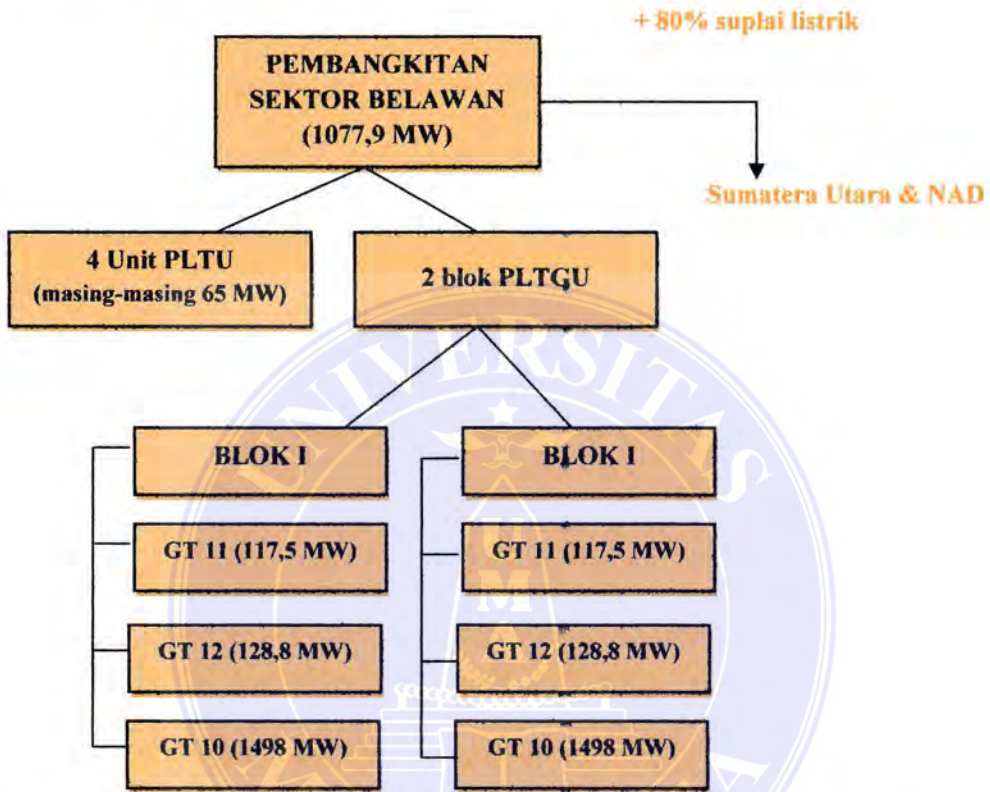
© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area  
Access From (repository.uma.ac.id)20/9/23

Unit Pembangkit Belawan yang mensuplai  $\pm 80\%$  kebutuhan listrik untuk daerah Sumbagat (Sumatera Bagian Utara).



Gambar 1.1. Bagan Daya Terpasang di PT PLN (Persero) Unit Pembangkitan Belawan

Untuk PLTU unit 3 & 4, menggunakan ketel jenis pipa air dengan tipe Radian, Natural Circulation dan pabrik pembuatannya Sulzer. Karena ketel uap merupakan bagian vital untuk mensuplai kebutuhan uap yang akan diteruskan ke turbin uap, penulis mencoba untuk merancang ulang sebuah ketel uap yang akan digunakan di PLTU unit 3 & 4 karena dari hasil survey ketel uap kapasitas 360 t/h dengan tekanan 105 bar hanya menghasilkan 26 t/h dengan tekanan kerja 89 bar.

## 1.2. Tujuan Perencanaan

Adapun tujuan dari karakteristik ini adalah sebagai berikut :

1. Memberikan gambaran tentang karakteristik dan analisa yang perlu dilakukan pada ketel uap.
2. Mengaplikasikan dari mata kuliah alat penukar kalor dan mesin konversi energi.

## 1.3. Tujuan Khusus

1. Agar mahasiswa dapat mengetahui sistem dan cara kerja ketel uap dengan baik.
2. Agar mahasiswa dapat bekerja sama dengan instansi-instansi pemerintah maupun swasta dalam mengembangkan industri-industri khususnya yang menggunakan ketel uap.

## 1.4. Batasan Masalah

Dalam karakteristik ini, penulis merasa perlu untuk membatasi karakteristik ataupun analisa yang akan dibahas. Analisa pembahasan ini meliputi:

1. Analisa bahan bakar
2. Bagian-bagian utama ketel uap
3. Perpindahan panas yang terjadi pada drum ketel



## 1.5. Metodologi Perencanaan

Dalam perencanaan ini penulis melakukan dua metode antara lain ;

### 1. Metode observasi

Observasi atau peninjauan dilakukan untuk melihat keadaan dan situasi kerja sistem ketel uap untuk diambil data spesifikasi sebagai bahan perbandingan dalam karakteristik ini. Dalam hal ini dilakukan di PT PLN (Persero) Unit Pembangkitan Sektor Belawan.

### 2. Metode studi literatur

Penulis memperoleh materi-materi yang berkaitan dengan masing-masing topic yang akan dibahas sebagai acuan dari sebuah definisi, rumus dan penjelasan teoritis, serta mendapat data yang terperinci secara luas sebagai landasan teori penulisan ini. Informasi tersebut diperoleh melalui buku panduan tentang Pesawat-Pesawat Konversi Energi 1 (Ketel Uap) dan data spesifikasi Ketel Uap yang diberikan oleh perusahaan.

## 1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan mengikuti ketentuan yang diberikan oleh program studi teknik mesin. Adapun susunan penulisannya sebagai berikut :

### BAB 1 PENDAHULUAN

Tentang latar belakang dari suatu skripsi, permasalahan, pembatasan masalah, metodologi penulisan dan sistematika penulisan

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Tentang panduan yang diambil dari buku mengenai teori-teori ketel uap, jenis-jenisnya, db

## BAB 3 PERHITUNGAN PERENCANAAN

Tentang perhitungan dari data-data hasil survey yang telah dikumpulkan dan selanjutnya dianalisa

## BAB 4 KESIMPULAN

Tentang hasil akhir yang dapat dicapai pada suatu perencanaan



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

Dalam suatu siklus energi perlu diperhatikan bahan siklus yang dimanfaatkan seperti uap dan gas karena untuk menentukan pesawat konversi energi yang tepat untuk digunakan. Pembangkit tenaga listrik yang menggunakan bahan siklus uap adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) seperti di PT PLN (Persero) Sektor Pembangkit Belawan. Salah satu bagian yang terpenting di PLTU adalah ketel uap (*boiler*) yang terdiri dari beberapa komponen utama dan proses perpindahan panas didalamnya.

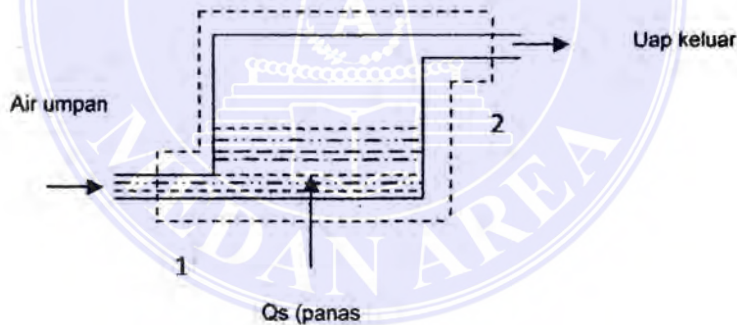
#### 2.1. Ketel Uap

Ketel uap adalah suatu pesawat konversi yang berfungsi untuk mengkonversikan energi kimia bahan bakar menjadi energi panas pembantuan uap. Pemindahan panas yang dihasilkan ke fluida kerja biasanya berupa air yang dipakai pada proses –proses bertemperatur tinggi ataupun untuk perubahan parsial menjadi energi mekanis di dalam sebuah turbin.

Uap dihasilkan pada sebuah *generator* uap atau *boiler* atau ketel uap. Sumber panasnya dapat diperoleh dari pembakaran suatu bahan bakar (padat, cair atau gas), energi nuklir, energi solar atau energi listrik. Disamping itu juga, penggunaan gas buang (*exhaust gas*) dari sebuah mesin termal dapat menjadi mungkin untuk menghasilkan uap atau untuk memanaskan air. Kondisi-kondisi

lanjut (*superheat*), atau superkritis. Pada beberapa stasiun pembangkit tenaga, uap superkritis diproduksi karena temperatur uap yang lebih tinggi, maka efisiensi lebih tinggi (sesuai prinsip carnot). Tetapi, pada temperature dan tekanan yang tinggi mempengaruhi masalah-masalah ketahanan bahan material dan tegangan yang harus memerlukan bagian metal yang lebih tebal dan menggunakan material-material yang mahal. Biaya-biaya yang jauh lebih tinggi sehubungan dengan uap superkritis jadi sangat dibatasi pemakaiannya walaupun memungkinkan efisiensi lebih tinggi.

Proses dasar produksi uap tidak begitu sulit dipahami, ditunjukkan secara sederhana pada Gambar 2.1. berikut ini



Gambar 2.1. Penghasil Uap

## 2.2. Klasifikasi Ketel Uap

Ketel uap merupakan peralatan penghasil uap, yang dibagi dalam 2 jenis yaitu :

1. Ketel pipa api (*fire-tube*)

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

2. Ketel pipa air (*water-tube*)

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

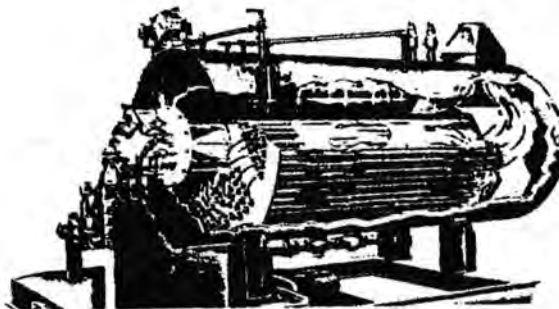
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

### 2.2.1. Ketel Pipa Api (*fire-tube*)

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

Ketel ini pada umumnya digunakan untuk memenuhi kebutuhan uap dengan tekanan dan kapasitas yang kecil. Yang termasuk kedalam golongan ketel pipa api adalah :

3. Ketel Cornwall dan Ketel Lancashire
4. Ketel Schorts tunggal dan ketel schots ganda
5. Ketel kombinasi antara silinder api, lorong api dan pipa-pipa api serta pipa uap dan beberapa variannya.
6. Ketel lokomotif dan lokomobil
7. Ketel-ketel tegak, ketel Cochran dan variannya



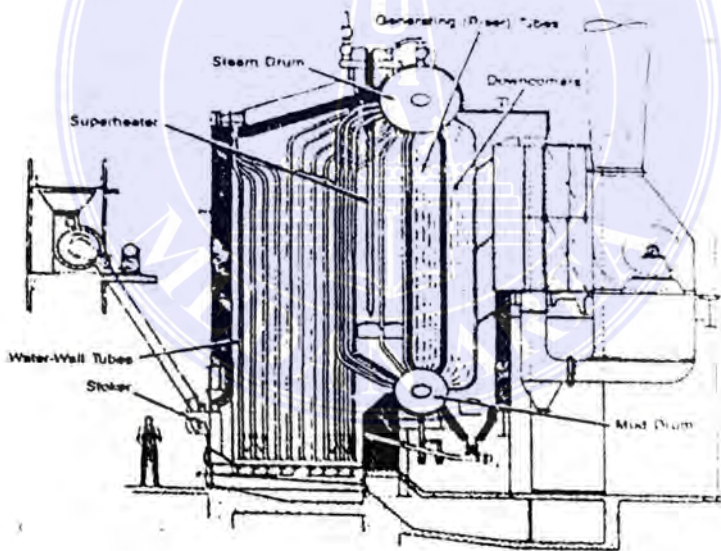
Gambar 2.2. Ketel Paket Scotch

### 2.2.2. Ketel Pipa Api (*water tube*)

Pada ketel pipa air, fluida yang mengalir dalam pipa adalah air, energi panas ditransfer dari luar pipa (yaitu ruang dapur) ke air ketel. Ketel pipa air sangat cocok dipakai untuk pembangkit uap berskala besar dengan tekanan tinggi.

Ketel pipa air dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

1. Ketel Babcock dan Wilcox
2. Section boiler
3. Ketel yarrow dan ketel-ketel berpipa terjal
4. Ketel benson



Gambar 2.3. Ketel Uap Pipa Air

### 2.3. Bagian-bagian Utama Ketel Uap

Dalam perancangannya melibatkan banyak variable seperti : sirkulasi air

dan uap, karakteristik bahan bakar, sistem pembakaran dan masukan energi panas,

UNIVERSITAS MEDAN AREA

serta perondahan panas.

Document Accepted 20/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

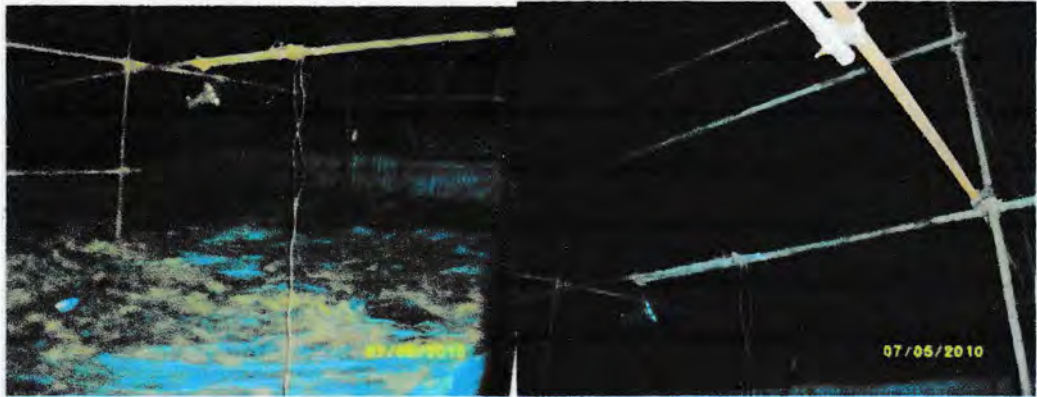
Bagian-bagian utama pada suatu ketel terdiri antara lain;

1. Ruang bakar (*furnance*)
2. Bidang Pemanas
3. Air Pengisi
4. Ekonomiser
5. Alat pemanas lanjut (*Superheater*)
6. Alat pemanas udara
7. Pembuangan gas bekas
8. Peralatan asesoris

### 2.3.1. Ruang Bakar (*furnace*)

Ruang bakar merupakan ruang terselubung dimana reaksi dan hasil pembakaran dari *burner* atau stoker terjadi, bergerak dinamis dan terkontrol. Ruang bakar merupakan salah satu komponen yang paling kritis dari suatu pembangkit uap dan harus dirancang secara konservatif. Konfigurasi ruang bakar dan ukurannya ditentukan oleh kebutuhan pembakaran, karakteristik bahan bakar, emisi standar, kebutuhan akan tersedianya aliran gas dan temperatur masuk bidang permukaan *convection heat-absorbing*, untuk mengurangi deposit abu dan temperatur berlebihan pada seksi *ekonomiser* atau *reheater* atau *superheater*.

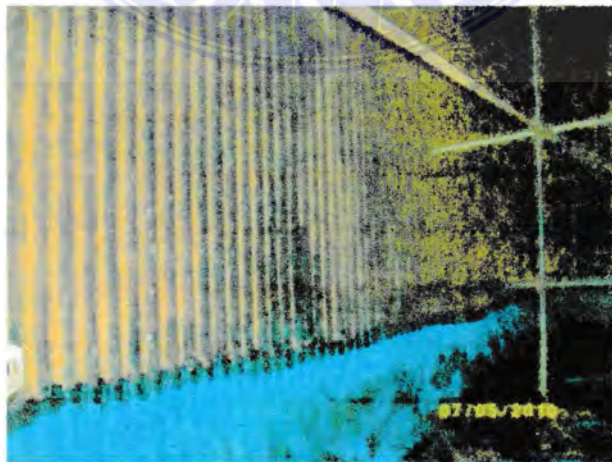
Volume ruang bakar adalah fungsi dari *furnace heat –release* yaitu berkaitan dengan maksimum *local absorption rates* dalam batas-batas yang aman. Pembatasan *heat release* pada ruang bakar misalnya akan mengurangi kehilangan karbon, control asap, dan mencegah abu beterbangan yang berlebihan.



Gambar 2.4. Ruang bakar

### 2.3.2. Bidang Pemanas

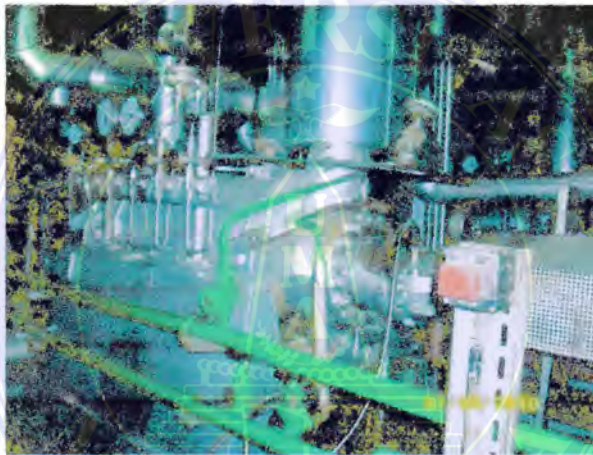
Bidang pemanas adalah suatu bidang yang menyerap atau menerima panas dari hasil pembakaran *burner*. Bidang pemanas berfungsi sebagai alat pemindah panas kepada fluida air. Alat pemindahan panas dapat berupa pipa air dan pipa api. Perpindahan panas pada bidang pemanas dengan 3 (tiga) cara yaitu secara konduksi, konveksi dan radiasi.

Gambar 2.5. Bidang pemanas pipa air (*water wall*)



### 2.3.3. Air Pengisi

Air pengisi ketel dipompakan masuk kedalam ketel dengan menggunakan pompa air pengisi ketel (*boiler feed pump*) dari tekanan 7,2 bar hingga mencapai tekanan kerja 126 bar di dalam ketel. Sebaiknya air yang dipergunakan adalah air bersih dan sudah mengalami proses pelunakan dengan tingkat keasaman pH netral.

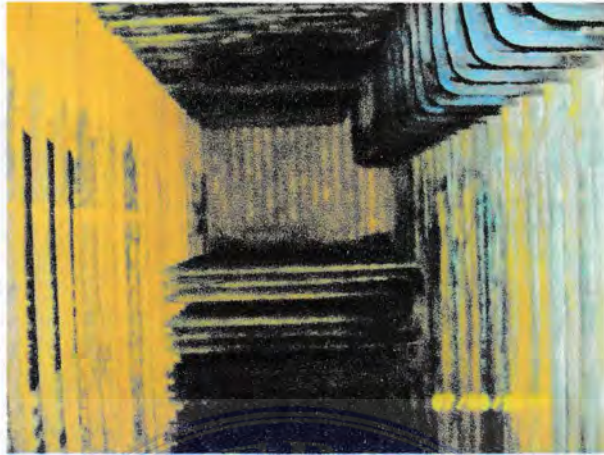


Gambar 2.6. *Boiler Feed Pump*

### 2.3.4. Ekonomiser

Ekonomiser berupa pipa-pipa air, berfungsi sebagai pemanas mula air pengisian ketel. Sumber energi panas ekonomiser diperoleh dari aliran gas asap sebelum dibuang ke cerobong. Gas asap sebelum dibuang masih mempunyai temperatur relatif tinggi sehingga dapat dimanfaatkan untuk menaikkan temperatur air pengisian ketel. Dengan demikian perbedaan temperatur air pengisian dengan temperatur penguapan di dalam ketel tidak terlalu besar

sehingga tidak mengganggu sirkulasi, terutama bila air pengisian dalam jumlah besar.



Gambar 2.7. Pipa – pipa *economizer*

### 2.3.5. Alat Pemanas Lanjut (*Superheater*)

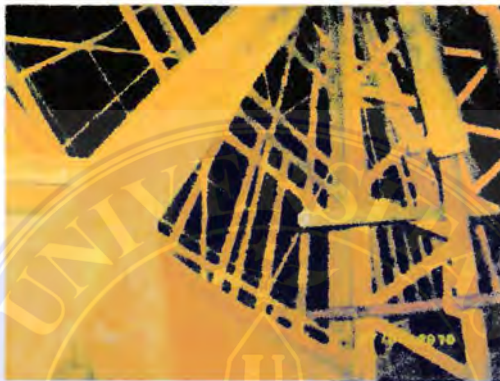
Untuk mendapatkan uap kering maka uap jenuh yang dihasilkan ketel uap disalurkan ke ruang bakar, sehingga temperatur uap naik. Tetapi kenaikan tekanan tidak lagi proporsional seperti pada kenaikan tekanan uap temperatur dalam kondisi uap jenuh.



Gambar 2.8. Pipa *Superheater*

### 2.3.6. Alat Pemanas Udara

Untuk memperbaiki reaksi pembakaran di ruang bakar, udara pembakaran biasanya dilewatkan melalui aliran gas asap untuk menaikkan temperatur udara. Tetapi tidak semua ketel uap selalu menggunakan alat pemanas udara.



Gambar 2.9. Pemanas Udara (*Air Heater*)

### 2.3.7. Pembuangan Gas Bekas

Pembuangan gas bekas berfungsi sebagai saluran buang gas bekas yang dihasilkan dari ruang pembakaran.





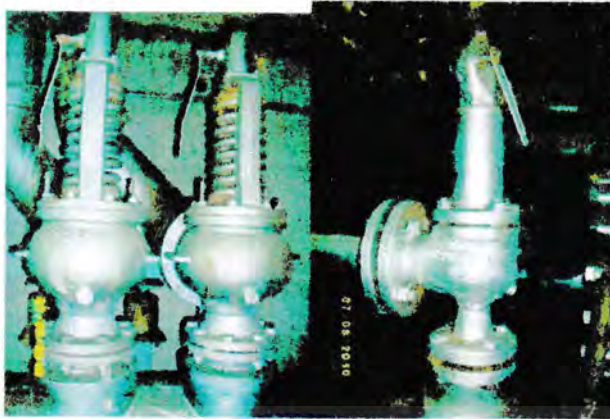
Gambar 2.10. Cerobong Asap PLTU Unit 4 Belawan

### 2.3.8. Peralatan Asesoris

Alat-alat asesoris terdiri dari alat-alat ukur, pengatur permukaan air, katup pengaman (*safety valve*), gelas penduga (*sight glass*), pengukur tekanan, dll



Gambar 2.11. Contoh Gambar *valve*

Gambar 2.12. *Safety Valve*

Gambar 2.13. Pengukur Tekanan

#### 2.4. Perpindahan Panas pada Ketel Uap

Panas yang dihasilkan karena pembakaran bahan bakar dan udara yang berupa api (yang menyala) dan gas asap (yang tidak menyala) dipindahkan kepada air, uap ataupun udara, melalui bidang yang dipanaskan atau Heating Surface pada suatu insulasi ketel uap dengan tiga cara, diantaranya :

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 20/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repository.uma.ac.id)20/9/23

1. Radiasi (pancaran)
2. Konveksi (aliran)
3. Konduksi (rambatan)

### 1. Radiasi (pancaran)

Pemindahan panas secara pancaran atau radiasi adalah perpindahan panas antara suatu benda ke benda yang lain melalui gelombang-gelombang elektro magnetis tanpa tergantung kepada ada atau tidak adanya media atau zat diantara benda yang menerima pancaran tersebut.

Banyaknya panas yang diterima secara radiasi dapat ditentukan berdasarkan persamaan Stephen – Boltzman :

$$Q_r = c. F \left[ \left( \frac{T_{api}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{benda}}{100} \right)^4 \right]$$

Tabel 2.1. Nilai konstanta Stephen – Boltzman

| Cz                      | $\text{kJ/m}^2 \text{ jam K}^4$ | $\text{W/m}^2 \text{ K}^4$ |
|-------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Benda hitam absolute    | 20,726                          | 5,575                      |
| Jelaga yang licin       | 18,004                          | 5,000                      |
| Baja yang dipols        | 5,569                           | 5,477                      |
| Baja berkarat           | 18,423                          | 5,117                      |
| Besi tuang berkarat     | 16,748                          | 4,652                      |
| Pasangan batu tahan api | 19,260                          | 5,350                      |

### 2. Konveksi (aliran)

Perpindahan panas secara aliran atau konveksi adalah perpindahan panas yang dilakukan oleh molekul-molekul suatu fluida (cair ataupun gas). Molekul-molekul fluida tersebut dalam gerakannya melayang-layang kesana keamri

Bila gerakan dari molekul-molekul yang melayang-layang kesana kemari tersebut disebabkan karena perbedaan temperatur didalam fluida itu sendiri maka perpindahan panasnya disebut konveksi bebas (*free convection*) atau konveksi alamiah (*natural convection*). Bila gerakan molekul-molekul tersebut sebagai akibat dari kekuatan mekanis (karena dipompa atau karena dihembus dengan fan) maka perpindahan panasnya disebut Konveksi paksa (*force convection*).

Banyaknya panas yang diberikan secara konveksi dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$Q_k = hA (T_w - T_\infty)$$

### 3. Konduksi (rambatan)

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

Didalam dinding ketel tersebut, panas akan dirambatkan oleh molekul-molekul dinding ketel sebelah luar yang berbatasan dengan api, menuju ke molekul-molekul dinding ketel sebelah dalam yang berbatasan dengan air, uap ataupun udara. Panas yang dibawa merambat oleh dinding ketel tersebut akan diterima oleh molekul-molekul air, uap ataupun udara dengan cara konveksi pula yaitu penyerahan sebagian panas dari molekul-molekul dinding ketel kepada

molekul-molekul air, uap ataupun udara. Molekul-molekul air, uap ataupun udara tersebut dalam keadaan mengalir/bergerak, bukan dalam kondisi diam.

Dengan demikian penyerapan panas secara konveksi dan konduksi bersama-sama melalui proses sebagai berikut :

1. Panas dialihkan dari fluida (api atau gas asep) kepada benda padat (dinding ketel).
2. Panas dirambat didalam benda padat (dinding ketel) atau didalam benda padat berlapis-lapis (jelaga – dinding ketel – kerak ketel).
3. Panas dialihkan dari benda padat (dinding ketel atau kerak ketel) kepada fluida (air, uap ataupun udara).

Jumlah panas yang akan dikonduksikan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan :

$$c = \frac{kA}{x} (T_{d1} - T_{d2})$$

## 2.5. Proses Pembakaran

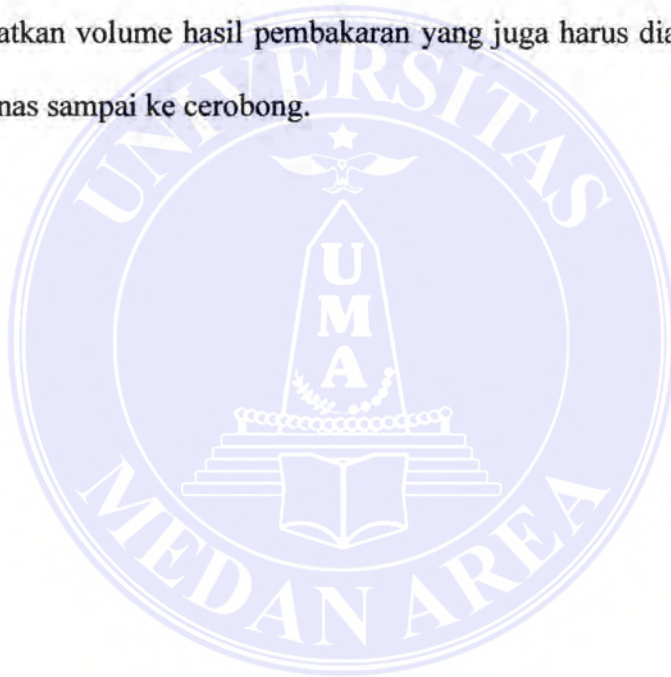
Pembakaran merupakan proses oksidasi komponen bahan bakar dengan produksi panas. Pembakaran sempurna bahan bakar terjadi hanya jika ada pasokan oksigen yang cukup.

Oksigen (O<sub>2</sub>) merupakan salah satu elemen dalam yang paling umum, volumenya mencapai 20,9% dari udara. Bahan bakar padat atau cair harus diubah ke bentuk gas sebelum dibakar. Biasanya diperlukan panas untuk mengubah cairan atau padatan menjadi gas. Bahan bakar gas akan terbakar pada keadaan normal jika terdapat udara yang cukup. Hampir 79% volume udara (tanpa adanya



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

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



## BAB III

### PERHITUNGAN PERENCANAAN

Setelah melakukan observasi dan mendapatkan data-data yang diperlukan untuk melakukan perencanaan ketel uap, maka analisa perhitungan dapat dilakukan sesuai dengan hukum-hukum termodinamika. Analisa ini dimulai dari bahan bakar yang digunakan sampai dengan neraca kalornya (*heat balance*).

#### 3.1. Analisa Bahan Bakar

Pada umumnya bahan bakar yang digunakan pada ketel uap dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

1. Bahan bakar padat (*solid fuel*)
  - a. Bahan bakar alam (*natural fuel*) seperti : kayu, batu bara, dll
  - b. Bahan bakar cair (*prepared fuel*) seperti : arang kayu, kokas, briket dan cangkang.
2. Bahan bakar cair (*liquid fuel*) seperti minyak mintah yang kemudian diproses menjadi *solar*, *heavy fuel oil*, kerosin, bensin, dll.
3. Bahan bakar gas (*gas fuel*) yaitu gas alam seperti methane, propane, dll

Dalam pembahasan ini bahan bakar yang akan dianalisa adalah bahan bakar cair berupa *Heavy Fuel Oil* (HFO) yang digunakan di masing-masing burner ketel uap PLTU Unit 3 & 4 di Belawan.

### 3.1.1. Nilai Kalor Bahan Bakar (*heating value*)

Nilai kalor bahan bakar adalah banyaknya energi panas yang diperoleh atau dihasilkan dari proses pembakaran dari 1 kg bahan bakar.

Nilai kalor bahan bakar terbagi menjadi 2 bagian yaitu :

1. Nilai pembakaran tinggi (*hight heating value*)

Adalah banyaknya panas yang diperoleh dari pembakaran sempurna pada 1 kg bahan bakar tanpa memperhitungkan panas kondensasi uap air.

2. Nilai pembakaran rendah (*low heating value*)

Adalah banyaknya panas yang diperoleh dari pembakaran sempurna pada 1 kg bahan bakar dengan memperhitungkan panas kondensasi uap air.

Tabel 3.1. Komposisi Bahan Bakar Cair

| Fuel           | Specific<br>Gravity | Ultimate Analysis |          |        | Gross HV<br>Kcal/Kg |
|----------------|---------------------|-------------------|----------|--------|---------------------|
|                |                     | Carbon            | Hydrogen | Sulfur |                     |
| Gasoline       | 0,74                | 85,4              | 14,0     | -      | 11.200              |
| Parifne        | 0,79                | 86,3              | 13,3     | 0,1    | 11.100              |
| Diesel Oil     | 0,87                | 86,3              | 12,5     | 0,9    | 11.000              |
| Heavy Fuel Oil | 0,995               | 86,1              | 11,8     | 2,1    | 10.50               |

(Pesawat – Pesawat Konveksi Energi : Ir. Syamsir A. Muin)

Nilai pembayaran (HHV) dan nilai pembakaran rendah (LHV) dapat diperoleh dengan menggunakan rumus Dulong dan Petit:

$$HHV = 33950C + 144200\left(H_2 - \frac{O_2}{8}\right) + 9400S \left[\frac{kJ}{kg}\right] \dots\dots (\text{ref 5 hal 161})$$

$$= 33950.0,861 + 144200\left(0,118 - \frac{0}{8}\right) + 9400.0,021 \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

$$= 4491,2 \text{ [kJ/kg]}$$

$$= 10368,72 \text{ [kcal/kg]}$$

$$LHV = HHV - 2411(M + 9H_2) \left[\frac{kJ}{kg}\right] \dots\dots (\text{ref 5 hal 161})$$

$$= 44916,2 - 2411(0,75 + 9.0,188) \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

$$= 40547,468 \text{ [kJ/kg]}$$

$$= 9360,22 \text{ [kcal/kg]}$$

### 3.1.2. Kebutuhan Bahan Bakar

Dari hasil survey untuk ketel uap kapasitas 260 t/h dengan tekanan 105 bar hanya menghasilkan 246 t/h dengan tekanan 89.

Bahan bakar yang dibutuhkan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan :

$$W_f = \frac{W_s (h_{sat} - h_a)}{\eta_k (LHV)} \text{ kg bahan bakar jam}$$

Dimana :

$$hsat = \text{enthalpy uap saturasi pada tekanan 89 bar} = 2744,45 \text{ kJ/kg}$$

$$= 633,54 \text{ kkal/kg}$$

UNIVERSITAS MEDAN AREA

ha = enthalpy air pada suhu saturasi 100°C = 419,06 kJ/kg Document Accepted 20/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area  
Access From (repository.uma.ac.id)20/9/23

$$= 96,74 \text{ kkal/kg}$$

$$\eta_k = \text{efisiensi ketel (70-90\%)}$$

diambil 80%

$$\text{maka : } W_f = \frac{246000(633,54 - 96,74)}{0,8(9360,22)}$$

$$= 17832,94 \text{ kg } \frac{\text{bakar}}{\text{jam}}$$

### 3.1.3. Kebutuhan Udara Pembakaran

Kebutuhan udara pembakaran ditentukan dalam 2 hal yaitu :

1. Kebutuhan udara pembakaran teoritis  $(W_a)_{th}$
2. Kebutuhan udara pembakaran actual  $(W_a)$

Kebutuhan udara pembakaran teoritis  $(W_a)_{th}$  dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned} (W_a)_{th} &= \frac{2,66C + 7,94H_2 + 0,998S - O_2}{0,232} \left[ \frac{\text{kg udara}}{\text{kg bahan bakar}} \right] \cdot (\text{ref 5 hal 163}) \\ &= \frac{2,66 \cdot 0,861 + 7,94 \cdot 0,0118 + 0,998 \cdot 0,21 - 0}{0,232} \left[ \frac{\text{kg udara}}{\text{kg bahan bakar}} \right] \\ &= 14,0006 \left[ \frac{\text{kg udara}}{\text{kg bahan bakar}} \right] \end{aligned}$$

Kebutuhan udara pembakaran actual  $(W_a)_{act}$  dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan :

$$\text{Excess}_{air} = \frac{(W_a)_{act} - (W_a)_{th}}{(W_a)_{th}} \dots\dots\dots(\text{ref 5 hal 186})$$

Dimana :

$$\text{Excess}_{\text{air}} = \text{udara lebih untuk minyak bakar beragam } (0,210 - 0,20) \\ \text{diambil} = 0,15$$

Dari persamaan diatas diperoleh :

$$\begin{aligned} (w_a)_{\text{act}} &= \text{Excess}_{\text{air}} (w_a)_{\text{th}} + (w_a)_{\text{th}} \\ &= 0,15 + 14,0006 + 14,0006 \\ &= 16,10069 \left[ \frac{\text{kg udara}}{\text{kg bahan bakar}} \right] \end{aligned}$$

Kebutuhan udara pembakaran tiap jam :

$$\begin{aligned} W_a &= (W_a)_{\text{act}} \times W_f \left[ \frac{\text{kg bakar}}{\text{jam}} \right] \\ &= 16,10069 \cdot 17634,84 \left[ \frac{\text{kg bakar}}{\text{jam}} \right] \\ &= 287122,6387 \left[ \frac{\text{kg bakar}}{\text{jam}} \right] \end{aligned}$$

### 3.1.4. Produksi Pembakaran

Pada umumnya gas asap terbentuk dari hasil pembakaran dan gas-gas sisa pembakaran. Pada pembakaran yang sempurna gas asap terbentuk dari :

#### 1. Hasil pembakaran

##### a. Karbondioksida (CO<sub>2</sub>)



$$12 \text{ kg C} + 32 \text{ kg O}_2 = 44 \text{ kg CO}_2$$

$$1 \text{ kg C} + \frac{32}{12} \text{ kg O}_2 = \frac{44}{12}$$

$$1 \text{ kg C} + 2,67 \text{ kg O}_2 = 3,67 \text{ kg CO}_2$$

Artinya setiap pembakaran 1 kg karbon (C) dibutuhkan 2,678 kg oksigen (O<sub>2</sub>) sehingga menghasilkan 3,67 kg CO<sub>2</sub>.

Maka :

$$\begin{aligned} W_{\text{co}_2} &= 3,67 \cdot C \\ &= 3,67 \cdot 0,861 \\ &= 3,15987 \frac{\text{kg}}{\text{kg bahan bakar}} \end{aligned}$$

##### b. Air (H<sub>2</sub>O)



$$4 \text{ kg C} + 32 \text{ kg O}_2 = 36 \text{ kg H}_2\text{O}$$

$$1 \text{ kg C} + \frac{32}{4} \text{ kg O}_2 = \frac{44}{4}$$

$$1 \text{ kg C} + 8 \text{ kg O}_2 = 9 \text{ kg H}_2\text{O}$$

Jadi setiap 1 kg H dibutuhkan 8 kg O<sub>2</sub>, sehingga menghasilkan 9 kg

H<sub>2</sub>O

Maka :

$$W_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{36}{4} \cdot H_2$$

$$= \frac{36}{4} \cdot 0,118$$

$$= 1,106 \frac{\text{kg}}{\text{kg bahan bakar}}$$

c. Belerang dioksida (SO<sub>2</sub>)



$$32 \text{ kg S} + 32 \text{ kg O}_2 = 64 \text{ kg SO}_2$$

$$1 \text{ kg S} + 1 \text{ kg O}_2 = 2 \text{ kg SO}_2$$

Jadi setiap pembakaran 1 kg S dibutuhkan 1 kg O<sub>2</sub>, sehingga menghasilkan 2 kg SO<sub>2</sub>.

$$W_{\text{SO}_2} = 2 \cdot S$$

$$= 2 \cdot 0,021$$

$$= 1,042 \frac{\text{kg}}{\text{kg bahan bakar}}$$





## 2. Gas Sisa udara Pembakaran

### a. Nitrogen ( $N_2$ )

$$\begin{aligned} W_{N_2} &= 77\% (W_a)_{act} \\ &= 0,77 \cdot 16,10069 \\ &= 12,398 \frac{kg}{kg \text{ bahan bakar}} \end{aligned}$$

### b. Oksigen ( $O_2$ )<sub>excess</sub>

$$\begin{aligned} (W_{O_2})_{excess} &= (\text{excess}_{udara} \cdot 23,2\% (W_a)_{th}) + O_2 \\ &= (0,15 \cdot 0,232 \cdot 14,0006) + 0 \\ &= 0,487 \frac{kg}{kg \text{ bahan bakar}} \end{aligned}$$

Berat gas asap basah ( $W_g$ )<sub>basah</sub>:

$$\begin{aligned} (W_g)_{basah} &= CO_2 + W_{SO_2} + W_{H_2O} + (W_{O_2})_{excess} + W_{N_2} \\ &= 3,15987 + 0,042 + 1,062 + 0,487 + 12,398 \\ &= 17,149 \frac{kg}{kg \text{ bahan bakar}} \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh gas asap per jam adalah :

$$\begin{aligned} (W_g) &= (W_g)_{basah} \cdot W_f \\ &= 17,149 \cdot 17832,94 \\ &= 305817,09 \frac{kg}{jam} \end{aligned}$$

Berat gas asap kering (W<sub>g</sub>)<sub>kering</sub>:

$$\begin{aligned}
 (W_g) &= (W_g)_{\text{basah}} \cdot W_{H_2O} \\
 &= 17,149 \cdot 1,062 \\
 &= 16,087 \frac{\text{kg}}{\text{kg bahan bakar}}
 \end{aligned}$$

**Tabel 3.2. Analisa hasil pembakaran**

| Unsur            | Berat gas asap x jumlah bahan bakar<br>(kg/jam) | Persentase |
|------------------|---|------------|
| CO <sub>2</sub>  | 3,15987 x 17832,94 = 56349,77                   | 18,5       |
| H <sub>2</sub> O | 1,062 x 17832,94 = 18189,6                      | 5,96       |
| SO <sub>2</sub>  | 0,042 x 17832,94 = 748,9835                     | 0,25       |
| O <sub>2</sub>   | 0,487 x 17832,94 = 8684,642                     | 2,85       |
| N <sub>2</sub>   | 12,398 x 17832,94 = 221092,8                    | 72,5       |
| <b>Jumlah</b>    | <b>305065,8</b>                                 | <b>100</b> |

**3.1.5. Volume Gas Asap**

Menurut Syamsir A. Muin (1988) volume gas asap dari hasil pembakaran dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan :

$$\begin{aligned}
 V_g &= \frac{1,866C + 0,7S}{0,11} + 1,24(9H_2 + M) \left[ \frac{m^3}{kg} \right] \dots\dots\dots (\text{ref 5 hal 184}) \\
 &= \frac{1,866 \cdot 0,8161 + 0,7 \cdot 0,021}{0,11} + 1,24(9 \cdot 0,118 + 0,75) \left[ \frac{m^3}{kg} \right]
 \end{aligned}$$

Volume gas asap perjam adalah :

$$\begin{aligned} V_f &= 16,986 \cdot W_f \\ &= 16,986 \cdot 17832,94 \\ &= 302910,3 \frac{m^3}{jam} \end{aligned}$$

### 3.1.6 Kalor Pembakaran

Kalor pembakaran adalah kalor yang dihasilkan dari proses pembakaran di dalam ruang bakar, dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan :

$$Q_f = W_f \cdot LHV \cdot n_f \left[ \frac{kkal}{jam} \right] \dots\dots\dots (\text{ref 5 hal 47})$$

dimana :  $n_f = (0,90 \div 0,97)$  diambil 0,95

maka :

- Panjang, P : 14 m
- Lebar, L : 6,5 m
- Sudut kemiringan,  $\alpha$  :  $10^0$

Untuk menentukan tinggi ruang bakar digunakan persamaan sebagai

berikut :

$$H = h_1 + h_2$$

Dimana :

$$\begin{aligned} h_1 &= \tan \alpha \cdot l \\ &= \tan 10 \cdot 14 \\ &= 2,47 \text{ m} \end{aligned}$$

Untuk volume ruang bakar,  $V_{rb}$  ditentukan dengan persamaan :

$$V_{tot} = V_{rb}^1 + V_{rb}^2$$

Dimana :

$$\begin{aligned} V_{rb1} &= \frac{pI}{2} \cdot h_1 \\ &= \frac{14,6,5}{2} \cdot 2,47 \\ &= 11,2385 \text{ m} \end{aligned}$$

Untuk  $V_{rb2}$  :

$$V_{rb2} = \frac{W_f \cdot LHV \cdot n_f}{H_{rv}}$$

Dimana :

$H_{rv}$  = laju panas yang diserap dapur 85000 – 120000 kkal/m<sup>3</sup> jam  
direncanakan = 95000 kkal/m<sup>3</sup> jam

Maka :

$$\begin{aligned} V_{rb2} &= \frac{W_f \cdot LHV \cdot n_f}{H_{rv}} \\ &= \frac{17634,84 \cdot 9360,22 \cdot 0,95}{95000} \\ &= 1669,22 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

sehingga :

$$\begin{aligned} V_{tot} &= V_{rb}^1 + V_{rb}^2 \\ &= 112,385 + 1669,202 \\ &= 1781,587 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 20/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Jumlah pipa *waterwall* sisi depan dan belakang:

$$\begin{aligned} N_d &= \frac{\text{lebar ruang bakar}}{\text{jarak antara sumbu pipa}} \\ &= \frac{6500}{166,67} \\ &= 38,99 \approx 39 \text{ buah} \end{aligned}$$

### 3.3.3. Perencanaan Panjang Pipa *Waterwall*

Panjang pipa *waterwall* pada sisi depan tidak sama dengan sisi belakang tetapi untuk sisi kiri dan kanan adalah sama.

Panjang pipa *waterwall* bagian depan ;

Jumlah pipa *waterwall* samping kiri dan kanan :

$$L_{pd} = (H - h_1 - (p_1 \cdot \text{tg} \cdot \alpha_{1b})) + \left( \frac{p_1}{\cos \alpha_{1b}} \right) + \left( \frac{p_1}{\cos \alpha_{1b}} \right)$$

Dimana :

$$H = 20,61 \text{ m}$$

$$h_1 = 2,47 \text{ mm}$$

$$p_1 = \text{panjang ruang bakar (area burner)} = 7,8 \text{ (direncanakan)}$$

$$p_2 = \text{panjang ruang bakar (area superheater)} = 5 \text{ (direncanakan)}$$

$$\alpha_{1a} = \text{sudut bengkokan pipa atas} = 10^0 \text{ (direncanakan)}$$

$$\alpha_{1b} = \text{sudut bengkokan pipa bawah} = 5^0 \text{ (direncanakan)}$$

menentukan  $h_2$  :

$$h_2 = \frac{1669,202}{14,6,5}$$

$$= 18,34\text{m}$$

Tinggi ruang bakar total, H :

$$H = 2,47 + 18,34$$

$$= 20,81 \text{ m}$$

### 3.2.1 Analisa Perpindahan Panas pada Ruang Bakar

Untuk mengetahui besarnya panas yang dilepaskan dari ruang bakar, terlebih dahulu harus ditentukan besarnya temperature pembakaran yang terjadi di ruang bakar.

Besarnya temperatur pembakaran dapat diketahui dengan menggunakan persamaan :

$$T_b = \frac{LHV \cdot n_f}{V_8 \cdot C_p} + 273K \dots\dots\dots (\text{ref 5 hal 51})$$

Untuk memperoleh nilai  $C_p$  dari gas asap, dari data survey diketahui temperature gas asap meninggalkan ruang bakar adalah  $1135^{\circ}\text{C}$ . Karena gas asap terdiri dari  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  dan  $\text{O}_2$ , maka diperoleh panas jenis rata-rata gas asap pada temperature ( $T_g - 1135^{\circ}\text{C} = 1408^{\circ}\text{K}$ ) dari tabel panas jenis rata-rata gas asap.

$$C_p = \frac{cpCO_2 + cpN_2 + cpH_2O + cpO_2}{4}$$

$$= \frac{0,5374 + 0,338 + 0,417 + 0,357}{4}$$

$$= 0,41235 \frac{kcal}{m^3} C$$

Maka :

$$T_b = \frac{LHV \cdot n_f}{V_g \cdot C_p} + 273K$$

$$= \frac{9360,22 \cdot 0,95}{16,986 \cdot 0,41235} + 273K$$

$$= 1542,58 K$$

$$= 1269,58^{\circ}C$$

Suhu nyala efektif,  $T_f$  :

$$T_f = \sqrt[4]{T_4^2 \cdot T_g^2} \dots\dots\dots (\text{ref 5 hal 49})$$

$$= \sqrt[4]{1542,58^2 \cdot 1408^2}$$

$$= 1473,75K$$

Luas bidang radian ruang bakar,  $A_r$  :

$$A_r = \pi d L + 2 \frac{\pi}{4} d^2$$

dari data survei diperoleh ;

$$d = 60,325 \text{ m}$$

$$L = 5078,091 \text{ m}$$

Maka :

$$Ar = \pi d L + 2 \frac{\pi}{4} d^2$$

$$Ar = \pi 0,060325 \cdot 5078,091 + 2 \frac{\pi}{4} \cdot 0,060325^2$$

$$= 962,388 \text{ m}^2$$

Radiasi panas dari ruang bakar sekitarnya,  $Q_{fr}$  :

$$Q_{fr} = \epsilon_f \cdot \epsilon_r \cdot Bo \cdot Ar \left[ \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \dots\dots\dots \text{(ref 5 hal 48)}$$

Dimana :

$$\epsilon_f = 0,60$$

$$\epsilon_r = 0,90$$

$$Bo : 4,97$$

$$T_w = (5 : 25) ^0C + T_{sat}$$

$$= 15 + 283 = 531 \text{ K}$$

Maka :

$$Q_{fr} = \epsilon_f \cdot \epsilon_r \cdot Bo \cdot Ar \left[ \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \dots\dots\dots \text{(ref 5 hal 52)}$$

$$Q_{fr} = 0,60 \cdot 0,90 \cdot 4,97 \cdot 962,388 \left[ \left( \frac{1472,75}{100} \right)^4 - \left( \frac{531}{100} \right)^4 \right]$$

$$= 119788184,4 \frac{\text{kkal}}{\text{jam}}$$



Radiasi karena permukaan radian :

$$Q_r = \epsilon_r \cdot Bo \cdot Ar \frac{T_f}{100} \text{ dimana :}$$

$$T_r = T_u + T_{\text{sat}}$$

$$= 30 + 302,48$$

$$= 332,48^{\circ}\text{C} = 605,48 \text{ K}$$

Maka :

$$Q_r = \epsilon_r \cdot Bo \cdot Ar \left( \frac{T_f}{100} \right)^4$$

$$Q_r = 0,90 \cdot 4,97 \cdot 962,388 \left( \frac{605,48}{100} \right)^4$$

$$= 5785598,7 \frac{\text{kkal}}{\text{jam}}$$

Sehingga jumlah panas yang dilepaskan dari ruang bakar adalah :

$$Q_f = Q_{\text{fr}} - Q_r$$

$$= 119788184,4 - 5785598,7$$

$$= 114002585,7 \frac{\text{kkal}}{\text{jam}}$$

### 3.2. Perencanaan Pipa *Waterwall*

Pipa *waterwall* adalah susunan pipa-pipa dengan diameter tertentu yang terdapat dibagian dalam ruang bakar. Untuk memperluas bidang pemanas, pada jarak tertentu antara pipa di pasang sirip dengan cara dilas dari sisi luar pipa

UNIVERSITAS MEDAN AREA *Waterwall* menerima panas secara langsung dari hasil

pembakaran bahan bakar dari udara maka harus dipilih material yang tahan terhadap tekanan dan temperatur tinggi.

### 3.3.1. Pemilihan Bahan Pipa *Waterwall*

Bahan pipa *waterwall* dilih dari ASME POWER BOILER CODE dengan karakteristik sebagai berikut :

- No. Spesifik Pipa : SA 213 – TP316
- Material : 36 Cr-12 Ni and 2 Mo (seamless)
- Temperature izin : -20 : 500<sup>0</sup>F = -29 : 260<sup>0</sup>C
- Aloonable stress : 1800 psi = 1241,06 bar

**Tabel 3.3. Stel tube material, allowable stress per section 1 of ASME code in thousand of pounds per square inchi**

| Spec no                           | Composition          | Form     | Ultimate | Allowable stress at temperatures of |        |        |
|-----------------------------------|----------------------|----------|----------|-------------------------------------|--------|--------|
|                                   |                      |          |          | -20 to 650 °F                       | 750 °F | 800 °F |
| <b>A. Carbon steel - tube</b>     |                      |          |          |                                     |        |        |
| SA 192                            | C-Si                 | Seamless | 47.0     | 18.8                                | 11.5   | 9.9    |
| SA 178A                           | C                    | Welded   | 47.0     | 11.8                                | 11.5   | 7.7    |
| SA 226                            | C-Si                 | Welded   | 47.0     | 11.8                                | 11.5   | 7.7    |
| SA 210 A-1                        | C                    | Seamless | 60.0     | 15.0                                | 14.4   | 10.8   |
| SA 178 C                          | C                    | Welded   | 60.0     | 15.0                                | 14.4   | 9.2    |
| SA 210 C                          | C-Mn                 | Seamless | 70.0     | 17.5                                | 16.6   | 12.0   |
| <b>B. Low alloy steel - tube</b>  |                      |          |          |                                     |        |        |
| SA 209 T1b                        | C- ½ Mo              | Seamless | 53.0     | 15.1                                | 15.2   | 11.1   |
| SA 250 T1b                        | C- ½ Mo              | Welded   | 53.0     | 11.3                                | 11.2   | 11.1   |
| SA 250 T1                         | C- ½ Mo              | Welded   | 55.0     | 11.7                                | 11.7   | 11.7   |
| SA 209 T1                         | C- ½ Mo              | Seamless | 55.0     | 13.8                                | 13.8   | 13.7   |
| SA 213 T2                         | ½ Cr- ½ Mo           | Seamless | 60.0     | 15.0                                | 15.0   | 14.4   |
| SA 423-1                          | ½ Cr- ½ Ni-Cu        | Seamless | 60.0     | 15.0                                | 15.0   |        |
| SA-213-T12                        | 1 Cr-Mo              | Seamless | 60.0     | 15.0                                | 15.0   | 14.8   |
| SA-213-T11                        | 1 ½ Cr- ½ Mo-Si      | Seamless | 60.0     | 15.0                                | 15.0   | 15.0   |
| SA-213-T3b                        | 2 Cr- ½ Mo           | Seamless | 60.0     | 15.0                                | 15.0   | 14.7   |
| SA-213-T22                        | 2 ½ Cr-1 Mo          | Seamless | 60.0     | 15.0                                | 15.0   | 15.0   |
| <b>- 20 to 100 °F</b>             |                      |          |          |                                     |        |        |
| SA 213-T21                        | 3 Cr-1 Mo            | Seamless | 60.0     | 15.0                                | 15.0   | 13.0   |
| SA 213-T5                         | 5 Cr- ½ Mo           | Seamless | 60.0     | 15.0                                | 15.0   | 13.4   |
| SA 213-T7                         | 7 Cr- ½ Mo           | Seamless | 60.0     | 15.0                                | 15.0   | 14.5   |
| SA 213-T9                         | 9 Cr- ½ Mo           | Seamless | 60.0     | 15.0                                | 15.0   | 14.5   |
| <b>100 °F</b>                     |                      |          |          |                                     |        |        |
| SA 213-T21                        | 3 Cr-1 Mo            | Seamless | 60.0     | 15.0                                | 15.0   | 14.8   |
| SA 213-T5                         | 5 Cr- ½ Mo           | Seamless | 60.0     | 15.0                                | 15.0   | 12.6   |
| SA 213-T7                         | 7 Cr- ½ Mo           | Seamless | 60.0     | 15.0                                | 15.0   | 12.5   |
| SA 213-T9                         | 9 Cr- ½ Mo           | Seamless | 60.0     | 15.0                                | 15.0   | 12.8   |
| <b>C. High alloy steel - tube</b> |                      |          |          |                                     |        |        |
| SA 268-TP905                      | 12 Cr-1Al            | Seamless | 60.0     | 15.0                                | 13.3   | 11.7   |
| SA 268-TP946                      | 22 Cr                | Seamless | 70.0     | 17.5                                | 13.6   | 14.1   |
| SA 213-TP304                      | 18 Cr-8 Ni           | Seamless | 75.0     | 18.8                                | 16.6   | 15.9   |
| SA 213-TP316                      | 16 Cr-12 Ni and 2 Mo | Seamless | 75.0     | 18.8                                | 18.4   | 16.2   |
| SA 213-TP321                      | 18 Cr-10 Ni and Ti   | Seamless | 75.0     | 18.8                                | 17.2   | 15.8   |
| SA 213-TP347                      | 18 Cr-10 Ni          | Seamless | 75.0     | 18.8                                | 15.5   | 14.7   |

Untuk diameter pipa, penulis memilih diameter nominal 2 inchi dengan spesifikasi

- Diameter luar (Do) : 2,375 inchi = 60,3 mm
- No. Schedule : 80
- Tebal (t) : 0,218 inchi = 5,5 mm

**Tabel 3.4. Dimensi Pipa Baja**

| Ukuran Nominal Pipa | Diameter Luar (in) | Schedule Number | Tebal Dinding (in) | Diameter dalam (in) | Luas Penampang Logam (in <sup>2</sup> ) | Luas Penampang Dalam (in <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                                   | 0,00093                                 |
| 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              | 0,133              | 0,824               | 0,333                                   | 0,00371                                 |
|                     |                    | 80              | 0,154              | 0,742               | 0,433                                   | 0,00300                                 |
| 1                   | 1,325              | 40              | 0,133              | 1,049               | 0,494                                   | 0,00600                                 |
|                     |                    | 80              | 0,179              | 0,957               | 0,639                                   | 0,00499                                 |
| 1/8                 | 1,900              | 40              | 0,145              | 1,610               | 0,799                                   | 0,01414                                 |
|                     |                    | 80              | 0,200              | 1,500               | 1,068                                   | 0,01225                                 |
|                     |                    | 40              | 0,281              | 1,338               | 1,429                                   | 0,00976                                 |
| 2                   | 2,375              | 160             | 0,154              | 2,067               | 1,075                                   | 0,02230                                 |
|                     |                    | 40              | 0,218              | 1,939               | 1,477                                   | 0,02050                                 |
|                     |                    | 80              | 0,216              | 3,068               | 2,228                                   | 0,05130                                 |
| 3                   | 3,500              | 40              | 0,300              | 2,900               | 3,016                                   | 0,04587                                 |
|                     |                    | 80              | 0,237              | 4,026               | 3,173                                   | 0,08840                                 |
| 4                   | 4,500              | 40              | 0,237              | 3,826               | 4,407                                   | 0,79860                                 |
|                     |                    | 80              | 0,256              | 5,047               | 4,304                                   | 0,13900                                 |
| 5                   | 4,563              | 40              | 0,375              | 4,813               | 6,112                                   | 0,12630                                 |
|                     |                    | 120             | 0,500              | 4,563               | 7,953                                   | 0,11360                                 |
| 6                   | 6,675              | 160             | 0,625              | 4,313               | 9,696                                   | 0,10150                                 |
|                     |                    | 40              | 0,280              | 6,605               | 5,584                                   | 0,20060                                 |
| 10                  | 10,76              | 80              | 0,432              | 5,761               | 8,405                                   | 0,18100                                 |
|                     |                    | 40              | 0,365              | 10,021              | 11,90                                   | 0,54750                                 |
|                     |                    | 80              | 0,500              | 9,750               | 16,10                                   | 0,51850                                 |

Pemeriksaan kelayakan pemilihan piap dari tebal minimumnya :

$$t_m = \frac{P.D_0}{2S + 0,8P} + C$$

Dimana :

$$P = 89 \text{ bar} = 1290,84 \text{ psi}$$

$$D_0 = 2,375 \text{ inchi} = 60,3 \text{ mm}$$

$$S = 18000 \text{ psi} = 1251,06 \text{ bar}$$

$$C = 0,065$$

Maka :

$$\begin{aligned} t_m &= \frac{P.D_0}{2S + 0,8P} + C \\ &= \frac{1290,84 \cdot 2,375}{2 \cdot 18000 + 0,8 \cdot 1290,84} + 0,065 \\ &= 0,148 / \text{inchi} = 3,76 \text{ mm} \end{aligned}$$

Tebal pipa minimum < tebal pipa yang diizinkan ( $0,148 < 0,218$  inchi =  $3,76 < 5,54$  mm), maka pipa layak untuk digunakan.

### 3.3.2. Perencanaan Jumlah Pipa *Waterwall*

Jumlah pipa *waterwall* dapat ditentukan berdasarkan bentuk dan ukuran ruang bakra yang direncanakan. Untuk memperluas bidang pemanas, direncanakan pipa memakai sirip pada kedua sisinya diaman sirip tersebut disambung dengan menggunakan las.

Gambar 3.2. Susunan Pipa *Waterwall*

Untuk mengetahui jarak antara sumbu pipa digunakan persamaan :

$$C = 2r_0 + 2x$$

Dimana :

$$r_0 = \frac{D_0}{2}$$

$$= \frac{60,325}{2}$$

$$= 30,16 \text{ mm}$$

$$x = \text{lebar sirip} = 53,175 \text{ mm}$$

maka :

$$C = 2r_0 + 2x$$

$$= 2 \cdot 30,16 + 2 \cdot 53,175 \text{ mm}$$

$$= 166,67 \text{ mm}$$

Jumlah pipa *waterwall* samping kiri dan kanan :

$$N_d = \frac{\text{panjang ruang bakar}}{\text{jarak antara sumbu pipa}}$$

$$= \frac{14000}{166,67}$$

$$= 83,99 \approx 84 \text{ buah}$$

maka :

$$\begin{aligned} L_{pd} &= (H - h_1 - (p_1 \cdot \text{tg} \alpha_{1b})) + \left( \frac{p_1}{\cos \alpha_{1a}} \right) + \left( \frac{p_1}{\cos \alpha_{1b}} \right) \\ &= (2081, -2,47 - (7,8 \cdot \text{tg} 5)) + \left( \frac{7,8}{\cos 10} \right) + \left( \frac{7,8}{\cos 5} \right) \\ &= 33,36 \text{ m} \end{aligned}$$

Panjang pipa *waterwall* bagian belakang :

$$\begin{aligned} L_{pb} &= \left( H - \left( \frac{h_1}{2} \right) \right) + \left( \frac{p_2}{\cos \alpha_{1a}} \right) \\ &= \left( 20,81 - \left( \frac{2,47}{2} \right) + \left( \frac{5}{\cos 10} \right) \right) \\ &= 24,655 \text{ m} \end{aligned}$$

Panjang pipa *waterwall* bagian samping kiri dan kanan :

$$\begin{aligned} L_{ps} &= H - h_1 \\ &= 20,81 - 2,47 \\ &= 18,34 \text{ m} \end{aligned}$$

### 3.4. Perencanaan Drum Ketel

Bahan drum ketel yang dipilih adalah SA-240 316 dengan karakteristik sebagai berikut :

- Temperature izin bahan :  $50^0 \text{ OF} = 260^0 \text{ C}$
- Tegangan izin bahan :  $1700 \text{ psi} = 1185,9 \text{ bar}$
- Diameter dalam x ketebalan drum :  $1680 \times 60 \text{ mmm (data survey)}$
- Panjang drum :  $8500 \text{ mm (data survey)}$

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 20/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

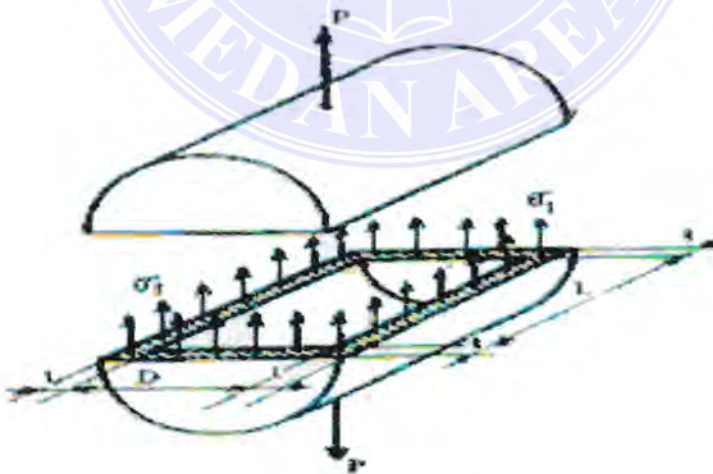
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

**Tebal 3.5 Sone maximum allowable stress values for palte of ferrous material in pounds per square inch for different as stipulated by ASME code**

| Spec number and grade | Nominal Composition | Spe min tensile | Allowable stress for metal temperature, max °F |        |        |        |        |        |
|-----------------------|---------------------|-----------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
|                       |                     |                 | 20 to + 400                                    | 500    | 600    | 650    | 700    | 750    |
| Plate steels :        |                     |                 |  |        |        |        |        |        |
| Carbon steel :        |                     |                 |  |        |        |        |        |        |
| SA = 30 flange        | .....               | 55,00           | 13,750   | 13,750 | 13,750 | 13,750 | 13,250 | 12,050 |
| SA-30 Firebox A       | .....               | 55,000          | 13,750   | 13,750 | 13,750 | 13,750 | 13,250 | 12,050 |
| SA-30 Firebox B       | .....               | 12,00           | 12,000   | 12,000 | 12,000 | 12,000 | 11,650 | 10,700 |
| Low-alloy steel :     |                     |                 |  |        |        |        |        |        |
| SA-2002 A.....        | Cr-Mn-Si            | 75,000          | 18,750   | 18,750 | 18,750 | 18,750 | 17,700 | 15,650 |
| SA-2002 B.....        | Cr-Mn-Si            | 85,000          | 21,250   | 21,250 | 21,250 | 21,250 | 19,800 | 17,70  |
| High-alloy steel :    |                     |                 |  |        |        |        |        |        |
| SA-240 304...         | 18 Cr-8 Ni          | 75,000          | .....  | 15,100 | 14,900 | 14,850 | 14,800 | 14,700 |
| SA-240 304...         | 18 Cr-8 Ni          | 75,000          | .....  | 12,500 | 11,600 | 10,800 | 10,800 | 10,400 |
| SA-240 316...         | 18 Cr-8 Ni-2 Mo     | 75,000          | .....  | 17,200 | 17,100 | 17,000 | 17,000 | 16,900 |
| SA-240 321...         | 18 Cr-8 Ni-Ti       | 75,000          | .....  | 15,200 | 14,900 | 14,800 | 14,800 | 14,700 |
| SA-240 347...         | 18 Cr-8 Ni0Cb       | 75,000          | .....  | 15,200 | 14,900 | 14,800 | 14,800 | 14,700 |

**3.4.1 Perhitungan Tebal Drum Berdasarkan Kemungkinan Belah**



Gambar 3.3. Tegangan Tarik di dalam Dinding Drum Ketel

Perhitungan tebal drum berdasarkan kemungkinan belah dapat diketahui dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$t_b = \frac{Dxp}{2\sigma_t(1 + D/L)}$$

Dimana :

$$D = 1680 \text{ mm}$$

$$p = 89 \text{ bar} = 90,75 \text{ kg/cm}^2 = 1290,84 \text{ psi}$$

$$L = 8500 \text{ mm}$$

$$\sigma_t = 17200 \text{ psi} = 1185,9 \text{ bar}$$

maka

$$\begin{aligned} t_b &= \frac{Dxp}{2\sigma_t(1 + D/L)} \\ &= \frac{1680 \times 1290,84}{2 \cdot 17200 \left(1 + \frac{1680}{8500}\right)} \\ &= 52,64 \text{ mm} \end{aligned}$$

Besarnya gaya untuk membelah drum, P :

$$\begin{aligned} P &= L \times D \times p \\ &= 850 \times 168 \times 90,75 \\ &= 12959100 \text{ kg} \end{aligned}$$

Gaya sebesar P tersebut ditahan oleh dinding drum ketel yang luas irisannya F (m<sup>2</sup>)

$$\begin{aligned} F &= [2 L.t + (d + 2t)] \\ &= [2.L.t + 2tD + 4t^2] \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$= [2.85,006 + 2.006. 1,68 + 3.0,062] \text{ m}^2$$



$$= 1,236 \text{ m}^2 = 12360 \text{ cm}^2$$

Dengan tegangan di dalam dinding drum sebesar  $\text{kg/cm}^2$  sehingga

$$\begin{aligned}\sigma_t &= \frac{Dxp}{2t(1 + D/L)} \\ &= \frac{168 \times 90,75}{2,6(1 + 68/850)} \\ &= 1060,83 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

Agar drum tidak belah dan layak digunakan, maka :

$$t \geq \frac{Dxp}{2\sigma_t(1 + D/L)}$$

Dimana :

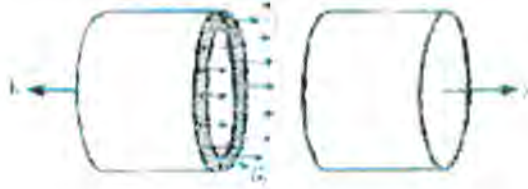
$$\begin{aligned}t &= \frac{Dxp}{2\sigma_t(1 + D/L)} \\ &= \frac{168 \times 90,75}{2 \cdot 1060,83(1 + 168/850)} \\ &= 6 \text{ cm} = 60 \text{ mm}\end{aligned}$$

Maka :

$$t \geq t_b = 60 \text{ mm} \geq 52,64 \text{ mm}$$

Tebal drum yang digunakan lebih tebal dibandingkan dengan tebal drum bila dihitung berdasarkan kemungkinan belah ( $60 \text{ mm} \geq 52,64 \text{ mm}$ ), maka drum aman terhadap kemungkinan belah dan layak digunakan.

### 3.4.2 Perhitungan Tebal Drum berdasarkan kemungkinan putus



Gambar 3.4. Tegangan yang timbul di dalam drum

Perhitungan tebal drum berdasarkan kemungkinan putus dapat diketahui dengan menggunakan persamaan :

$$\begin{aligned}
 t_b &= \frac{D \cdot p}{2\sigma_1} \text{ mm} \\
 &= \frac{1680 \cdot 90,75}{4.1060,83} \\
 &= 35,93 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Gaya yang dapat memutuskan drum, K :

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot p \text{ (kg)} \\
 &= \frac{\pi}{4} \cdot 168^2 \cdot 90,75 \\
 &= 2011662,31 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Gaya tersebut akan ditahan oleh dinding dengan luas, F :

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{\pi}{4} (4Dt + 4t^2) \\
 &= \frac{\pi}{4} (4 \cdot 168 \cdot 6 + 4 \cdot 6^2) \\
 &= 3279,82 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Bila harga  $4t^2$  diabaikan karena dianggap kecil terhadap  $4Dt$  maka

tegangan  $\sigma_t$  yang timbul adalah :

UNIVERSITAS MEDAN AREA

$$\begin{aligned}\sigma_t &= \frac{D \cdot p}{4t} \text{ kg/cm}^2 \\ &= \frac{168.90,75}{4.6} \\ &= 635,25 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

Agar drum tidak putus dan layak digunakan, maka :

$$t \geq \sigma_t = \frac{D \cdot p}{4t}$$

$$t > 60 \text{ mm}$$

maka

$$t \geq t_p = 60 \text{ mm} > 35,93 \text{ mm}$$

Tebal drum bila dihitung berdasarkan kemungkinan putus lebih kecil atau lebih tipis dibandingkan dengan bila dihitung berdasarkan kemungkinan belah,  $t_p < t_b$  ( $35,93 < 52,64 \text{ mm}$ ). dengan demikian untuk perhitungan tebal drum ketel cukup dihitung terhadap kemungkinan belah saja karena lebih tebal dan layak digunakan.

### 3.4.3. Tebal Ujung Drum (tebal front)



Gambar 3.5. Tebal ujung drum

Menurut Djokostyardjo, M.J (1989), tebal ujung drum dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan :

Direncanakan untuk  $R < 1,3 D$ , maka :

$$t_u = \frac{p.R.k}{2j.\sigma}$$

Dimana :

$$P = 90,75/\text{cm}^2$$

$$R = 1,3 D \\ = 1,3 \cdot 168 = 218,4 \text{ cm}$$

$$k = 1,5 \text{ (untuk baja)}$$

$$j = 1 \text{ (p dan } \sigma \text{ dinyatakan dalam kg/cm}^2\text{)}$$

$$\sigma = 17200 \text{ psi} = 1209,28 \text{ kg/cm}^2$$

maka :

$$t_u = \frac{p.R.k}{2j.\sigma}$$

$$t_u = \frac{90,75.218,4.1,5}{2.1.1209,28}$$

$$t_u = 12,29 \text{ cm} = 1229 \text{ mm}$$

### 3.4.4 Dinding Drum Ketel

Dinding drum ketel direncanakan memakai isolasi yang berfungsi untuk meminimalisasi panas yang dihasilkan di dalam drum terbuang secara percuma.

Oleh karena itu analisa perhitungan panas tanpa menggunakan isolasi perlu

UNIVERSITAS MEDAN AREA

diperhitungkan sebagai bahan perbandingan.

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 20/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

### A. Menggunakan Isolasi

Bahan isolasi yang digunakan harus tahan terhadap temperatur tinggi.

Bahan-bahan tersebut adalah sebagai berikut :

#### 1. Glass wol, direncanakan :

- Tebal ( $x_1$ ) : 3 inchi = 76,2 mm
- Konduktivitas thermal ( $k_1$ ) : 0,038 W/m<sup>0</sup>C

#### 2. Dinding luar (outer chasing), aluminium direncanakan :

- Tebal ( $x_2$ ) : 1/8 inchi = 3,17 mm
- Konduktivitas thermal ( $k_2$ ) : 204 W/m<sup>0</sup>C

Drum menggunakan bahan baja tahan karat dengan tebal 60 mm dan konduktivitas thermalnya 12-045 W/m<sup>0</sup>C (diambil 20 W/m<sup>0</sup>C)

Panas yang mengalir melalui dinding drum, Q :

$$Q = U_p \cdot A \cdot \Delta T$$

Koefisien perpindahan panas menyeluruh,  $U_o$  :

$$U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{A_1} \cdot \frac{1}{h_1} + \frac{A_o \ln(r_o / r_i)}{2\pi k L} + \frac{x_1}{k_1} + \frac{x_1}{k_1} + \frac{1}{h_1}}$$

Luas permukaan bagian luar drum,  $A_o$  :

$$\begin{aligned} A_o &= \pi \cdot D_o \cdot L \\ &= \pi \cdot 18,8,5 \\ &= 48,07 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Luas permukaan bagian dalam drum,  $A_i$  :

$$\begin{aligned} A_i &= \pi \cdot D_i \cdot L \\ &= \pi \cdot 1,68 \cdot 8,5 \\ &= 44,86 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Temperatur rata-rata di dalam drum,  $T_r$  :

$$\begin{aligned} T_r &= \frac{T_{sat} + T_{air}}{2} \\ &= \frac{30,48 + 100}{2} \\ &= 20124^{\circ}C \end{aligned}$$

Dari tabel sifat-sifat air pada temperatur  $201,24^{\circ}C$  dengan metode interpolasi diperoleh :

$$\rho_s = 962,7 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\mu_s = 3,03 \times 10^{-4} \text{ [kg/m.s]}$$

$$k_s = 0,678 \text{ [W/m}^{\circ}C\text{]}$$

$$Pr_s = 1,88$$

Kecepatan uap,  $v_s$  adalah :

$$\begin{aligned} v_s &= \frac{W_s}{\rho_s \cdot A_i} \\ &= \frac{246000}{962,7 \cdot 44,86} \\ &= 5,69 \text{ m/jam} = 0,0016 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Bilangan Reynolds untuk uap,  $Re$  :

$$\begin{aligned} Re &= \frac{vD_i \rho}{\mu_s} \\ &= \frac{0,0016 \cdot 1,68 \cdot 962,7}{3,03 \times 10^{-4}} \end{aligned}$$

(aliran turbulen)

Bilangan Nusselt,  $N_u$  uap di dalam drum :

$$\begin{aligned} N_u &= 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \\ &= 0,0023 \cdot 8540,39^{0,8} \cdot 1,88^{0,4} \\ &= 41,36 \end{aligned}$$

Koefisien perpindahan panas di dalam drum,  $h_i$  :

$$\begin{aligned} h_s &= Nu \frac{k}{D_i} \\ &= 41,36 \frac{0,678}{1,68} \\ &= 16,69 W / m^2 \text{ } ^\circ C \end{aligned}$$

Koefisien perpindahan panas di luar drum,  $h_o$  :

$$h_o = Nu \frac{k}{D_o}$$

Panas yang mengalir di luar drum adalah fasa gas dengan temperatur  $1136^\circ C$  (1408 K). Dari tabel sifat-sifat udara diperoleh :

$$\rho_{udara} = 0,25022 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

UNIVERSITAS MEDAN AREA  
 $\rho_{udara} = 3,19 \times 10^{-5} \text{ [kg/m.s]}$

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 20/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repository.uma.ac.id)20/9/23

$$kudara = 0,08954 \text{ [W/m}^0\text{C]}$$

$$Prudara = 0,705$$

Kecepatan gas asap,  $v_g$  adalah :

$$\begin{aligned} v_s &= \frac{W_g}{\rho_g \cdot A_0} \\ &= \frac{305817,09}{0,25022 \cdot 48,07} \\ &= 22425,2572 \text{ m / jam} = 7,06 \text{ m / s} \end{aligned}$$

Bilangan Reynodls untuk gas asap,  $Re$  :

$$\begin{aligned} R_s &= \frac{v D_0 \rho}{\mu_s} \\ &= \frac{7,065 \cdot 1,8 \cdot 0,25022}{5,19 \times 10^{-5}} \\ &= 61267,74 \end{aligned}$$

(aliran turbulen)

Bilangan Nusselt,  $Nu$  gas asap :

$$\begin{aligned} Nu &= 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \\ &= 0,023 \cdot 61267,74^{0,8} \cdot 0,705^{0,4} \\ &= 135,22 \end{aligned}$$

Maka :

$$\begin{aligned} h_0 &= Nu \frac{k}{D_0} \\ &= 135,22 \frac{0,08954}{1,8} \\ &= 6,73 \text{ W / m}^2\text{C} \end{aligned}$$



Sehingga koefisien perpindahan panas menyeluruh adalah :

$$U_0 = \frac{1}{\frac{A_0}{A_i} \cdot \frac{1}{h_i} + \frac{A_0 \ln(r_0/r_i)}{2\pi k L} + \frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \frac{1}{h_0}}$$

$$U_0 = \frac{1}{\frac{48,07}{44,68} \cdot \frac{1}{16,69} + \frac{48,07 \ln(0,9/0,84)}{2\pi k 20,8,5} + \frac{0,0762}{0,038} + \frac{0,003175}{204} + \frac{1}{6,73}}$$

$$= 0,45 \text{ W/m}^2\text{ }^0\text{C}$$

Beda temperatur,  $\Delta T$  :

$$\begin{aligned} \Delta T &= T_r - T_u \\ &= 201,24 - 30 \\ &= 171,24^0\text{C} \end{aligned}$$

Sehingga panas yang mengalir melalui dinding drum adalah :

$$\begin{aligned} Q &= U_o \cdot A \cdot \Delta T \\ &= 0,35 \cdot 48,07 \cdot 171,24 \\ &= 3704,1781 \text{ W} \\ &= 3185,0199 \text{ kkal / jam} \end{aligned}$$

Persentase kehilangan panas :

$$\begin{aligned} &= \frac{Q}{Q_f} \times 100 \\ &= \frac{3185,0199}{158574229,6} \times 100 = 0,002\% \end{aligned}$$

## B. Tanpa Isolasi

Koefisien perpindahan panas menyeluruh,  $U_0$  :

$$U_0 = \frac{1}{\frac{A_0}{A_i} \cdot \frac{1}{h_i} + \frac{A_0 \ln(r_o/r_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o}}$$

$$U_0 = \frac{1}{\frac{48,07}{44,68} \cdot \frac{1}{16,69} + \frac{48,07 \ln(0,9/0,84)}{2\pi k 20,8,5} + \frac{1}{6,73}}$$

$$= 4,5 \text{ U/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Panas yang mengalir melalui dinding drum :

$$Q = U_0 \cdot A \cdot \Delta T$$

$$= 4,64 \cdot 48,07 \cdot 171,24$$

$$= 38194,19155 \text{ W}$$

$$= 32841,938 \text{ kkal / jam}$$

Persentase kehilangan panas :

$$= \frac{Q}{Q_f} \times 100$$

$$= \frac{32841,0938}{158574229,6} \times 100 = 0,0207\%$$

Perbedaan panas yang mengalir melalui dinding drum,  $\Delta Q$  :

$$\Delta Q = 32841,0938 - 3704,1781$$

$$= 29136,9157 \text{ kkal / jam}$$

Dengan analisa perhitungan panas yang mengalir melalui dinding drum dapat disimpulkan bahwa panas yang terbangun pada dinding drum yang menggunakan isolasi lebih sedikit dibandingkan tanpa menggunakan isolasi ( $3704,1781 < 32841,0938$  kkal/jam) atau dengan kata lain dibandingkan drum yang menggunakan isolasi dapat meminimalisasi panas yang terbangun sebesar 29136,9157 kkal/jam

### 3.5. Pemanas Lanjut (*superheater*)

Pemanas lanjut (*superheater*) adalah susunan pipa-pipa yang berfungsi untuk pemanas lanjut uap saturasi hingga temperatur yang diinginkan pada tekanan konstan.

Spesifikasi pipa superheater berdasarkan ASME POWER BOILER CODE:

- No. spesifik pipa : SA 213-TP316
- Material : 36 Cr-12 Ni and 2 Mo (seamless)
- Temperatur izin :  $-20 \div 500$  °F =  $-29 \div 260$  °C
- Allowable stress : 18000 psi = 1241,06 bar

Diameter nominal pipa dipilih 1,5 inchi dengan spesifikasi :

- No. Skedul : 40
- Diameter luar : 1,900 inchi = 48,26 mm
- Diameter dalam : 1,610 inchi = 40,89 mm
- Tebal : 0,145 inchi = 3,8 mm

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 20/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repository.uma.ac.id)20/9/23

Pemeriksaan kelayakan pemilihan pipa dari tebal minimumnya :

$$t_m = \frac{P \cdot D_0}{2S + 0,8P} + C$$

maka :

$$\begin{aligned} t_m &= \frac{P \cdot D_0}{2S + 0,8P} + C \\ &= \frac{1290,84 \cdot 1,900}{2 \cdot 18000 + 0,8 \cdot 1290,84} + 0,065 \end{aligned}$$

Tabel pipa minimum < tebal pipa yang diizinkan (0,131 < 0,145 inchi = 3,33 < 3,68 mm), maka pipa layak digunakan.

### 3.6. Perencanaan Dinding Ketel

Dinding ketel direncanakan memakai isolasi yang berfungsi untuk meminimalisir panas yang dihasilkan ruang bakar terbuang secara percuma. Oleh karena itu analisa perhitungan panas tanpa menggunakan isolasi perlu dihitung juga sebagai bahan perbandingan.

#### 3.6.1. Menggunakan Isolasi

Bahan isolasi harus tahan terhadap tempertur tinggi. Bahan-bahan tersebut sebagai berikut :

1. Batu tahan api (*fire brick*), direncanakan :

UNIVERSITAS MEDAN AREA • Tebal ( $x_i$ ) : 3 inchi = 76,2 mm

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang • Konduktivitas thermal : 1,09 W/m<sup>0</sup>C

Document Accepted 20/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repository.uma.ac.id)20/9/23

2. Penyekat (insulating), direncanakan :

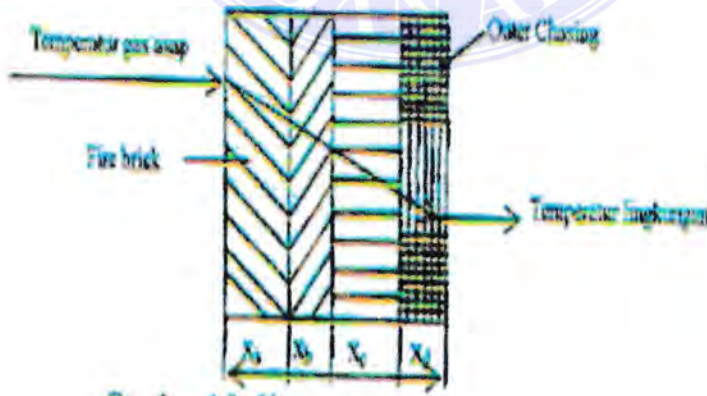
- Tebal ( $x_a$ ) : 1/8 inchi = 3,17 mm
- Konduktivitas thermal : 1,33 W/m<sup>0</sup>C

3. Glass woll, direncanakan :

- Tebal ( $x_a$ ) : 3 inchi = 76,2 mm
- Konduktivitas thermal : 0,038 W/m<sup>0</sup>C

4. Dinding luar (outler chasing) aluminium, direncanakan :

- Tebal ( $x_a$ ) : 1/8 inchi = 3,17 mm
- Konduktivitas thermal : 204 W/m<sup>0</sup>C



Gambar 3.6. Sketsa Pemasangan Isolasi

Panas yang mengalir melalui dinding ketel :

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

$Q_a = U \cdot A \cdot \Delta T$

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Luas isolasi, A :

$$\begin{aligned} A &= 2.p.l + 2.l.h. + 2.p.h \\ &= 2.14.6,5 + 2.6,5.20,18 + 2.14.20,81 \\ &= 1035,21\text{m}^2 \end{aligned}$$

Koefisien perpindahan panas total, U :

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{\frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \frac{x_3}{k_3} + \frac{x_4}{k_4}} \\ U &= \frac{1}{\frac{0,0762}{1,09} + \frac{0,003175}{1,33} + \frac{0,0762}{0,038} + \frac{0,003175}{204}} \\ &= 0,48 \text{ W/m}^2\text{ }^0\text{C} \end{aligned}$$

Beda temperatur,  $\Delta T$  :

$$\begin{aligned} \Delta T &= T_b - T_{\text{sat}} \\ T_r &= \frac{1269,58 + 302,48}{786,03\text{ }^0\text{C}} \end{aligned}$$

maka :

$$\begin{aligned} \Delta T &= T_r - T_K \\ &= 786,03 - 30 \\ &= 756,03\text{ }^0\text{C} \end{aligned}$$

Sehingga panas yang melalui dinding ketel adalah ;

$$\begin{aligned} Q_a &= U.A. \Delta T \\ Q_a &= 0,48 . 1035,21 . 756,03 \\ &= 375671,9118\text{W} \\ &= 375671,9118 \text{ kkal/jam} \end{aligned}$$

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Persentase kehilangan panas :

$$\frac{323019,9118}{158574229,6} \times 100 = 0,204\%$$

### 3.6.2. Tanpa Isolasi

Panas yang mengalir melalui dinding ketel :

$$Q_b = U_{fb} \cdot A \cdot \Delta T$$

Dimana :

$$\begin{aligned} U_{fb} &= \frac{1}{\frac{x_1}{k_1}} \\ &= \frac{1}{\frac{0,0762}{1,9}} \\ &= 14,304 \text{ W/m}^2 \text{ C} \end{aligned}$$

Maka :

$$Q_b = U_{fb} \cdot A \cdot \Delta T$$

$$Q_b = 14,304 \cdot 1035,21 \cdot 756,03$$

$$= 11195022,97 \text{ W}$$

$$= 9625987,214 \text{ kkal /jam}$$

Persentase kehilangan panas :

$$\frac{9625987,214}{15874229,6} \times 100 = 6,07\%$$

Selisih perbedaan panas yang mengalir melalui dinding ketel,  $\Delta Q$  :

$$\Delta Q = Q_b - Q_a$$

$$\Delta Q = 9625987,214 - 323019,7052$$

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang No. 17/1987  
040206759 kkal/jam

Document Accepted 20/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repository.uma.ac.id)20/9/23

Dari analisa perhitungan panas yang mengalir pada dinding ketel dapat disimpulkan bahwa panas yang terbuang melalui dinding ketel yang menggunakan isolasi lebih sedikit dibandingkan tanpa menggunakan isolasi ( $323019,7052 < 9625987,214$  kkal/jam) atau dengan kata lain dinding ketel yang menggunakan isolasi dapat meminimalisasi panas yang terbuang sebesar  $932967,509$  kkal/jam

### 3.7. Neraca Kalor (heat balance)

Neraca kalor adalah perbandingan antara kalor masuk atau energi panas yang dihasilkan dengan kalor berguna dan kehilangan panas (heat losses).

#### 3.7.1. Panas yang dihasilkan

Dari hasil perhitungan diperoleh :

$$Q_f = 158574229,6 \text{ [kkal/jam]}$$

#### 3.7.2. Konsumsi panas

Konsumsi panas terbagi menjadi 2 bagian yaitu :

1. Panas pembentukan uap saturasi
2. Panas pembentuk uap superheater

#### Panas Pembentuk Uap

Panas pembentuk uap adalah energi yang diserap air sampai terbentuknya uap saturasi, maka panas yang diserap dapat ditentukan dengan menggunakan



$$\begin{aligned}
 Q_{\text{sat}} &= W_s (h_{\text{sat}} - h_a) \text{ [kkal / jam]} \\
 &= 246000 (639,57 - 96,74) \text{ [kkal / jam]} \\
 &= 133536180 \text{ [kkal/jam]}
 \end{aligned}$$

### Panas pembentuk uap superheater

Panas pembentuk uap superheater dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$Q_{\text{sup}} = W_s (h_{\text{sup}} - h_{\text{sat}}) \text{ [kkal/jam]}$$

Dimana :

$$h_{\text{sup}} = \text{pada temperature } 350^{\circ}\text{C}$$

maka :

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{sup}} &= W_s (h_{\text{sup}} - h_{\text{sat}}) \text{ [kkal/jam]} \\
 &= 246000 (675,64 - 39,57) \text{ [kkal/jam]} \\
 &= 887322 \text{ [kkal/jam]}
 \end{aligned}$$

### 3.7.3. Kehilangan Panas

Kehilangan panas dihitung berdasarkan kehilangan panas akibat radiasi dan lain-lain ditentukan dengan menggunakan persamaan

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{out}} &= W_f (Q_{\text{sat}} - Q_{\text{sup}}) \text{ [kkal/jam]} \\
 &= 158574229,6 - (133536180 + 8873220) \text{ [kkal/jam]} \\
 &= 16164829,6 \text{ [kkal/jam]}
 \end{aligned}$$



Tabel 3.6 Neraca Panas

| Suplai Panas     | Kkal/jam           | %          | Distribusi Panas  | Kkal/jam                           | %                       |
|------------------|--------------------|------------|---|------------------------------------|-------------------------|
| Panas Pembakaran | 158574229,6        | 100        | Konsumsi Panas <ul style="list-style-type: none"> <li>• Panas pembentukan uap</li> <li>• Panas pembentukan uap superheater</li> </ul> Kehilangan panas akibat radiasi | 133536180<br>8873200<br>16164829,6 | 84,21<br>5,596<br>10,19 |
| <b>Jumlah</b>    | <b>158574229,6</b> | <b>100</b> | <b>Jumlah</b>   | <b>158574229,6</b>                 | <b>100</b>              |

Effisiensi Ketel,  $\eta_k$  :

$$\begin{aligned}
 \eta_k &= \left( 1 - \frac{Q_{lost}}{Q_f} \right) \times 100 \\
 &= \left( 1 - \frac{16164829,6}{158574229,6} \right) \times 100 \\
 &= 89,8\%
 \end{aligned}$$

## DAFTAR PUSTAKA

1. Djoko setyardja, M.J. 1989. Ketel Uap Cetakan Kedua. Pradnya Paramita. Jakarta.
2. El-Wakil, M.M. 1992. Instalasi Pembangkit Daya Jilid I. Erlangga. Jakarta.
3. Hariono, Edi.2 007. Perencanaan Ketel Uap Pipa Air Kapasitas 27 Ton Uap/Jam (Skripsi : tidak diterbitkan). Institut Teknologi Medan.
4. Holmon, J.P. 1993. Perpindahan Kalor Edisi Keenam. Erlangga. Jakarta.
5. Muin. A, Syamsir. 1988. Pesawat-pesawat Koversi Energi (Ketel Uap) edisi Pertama. Rajawali. Jakarta.
6. Salisbury, J. Kenneth. 1950. Mechanical Engineer's Handbook. Passaic-Clifton National Bank & Trust Co. New York.
7. Sulzer. 1988. Manual Book Belawan Steam Power Plant Unit 3 & 4. Mega Eltra BBC.