

KETEL UAP

**PERENCANAAN RUANG BAKAR DAN DAYA GUNA FLUE GAS
PADA KETEL UAP KAPASITAS 20 TON TBS / JAM
TEKANAN KERJA 21 KG / CM²**

SKRIPSI

**Diajukan Untuk Melengkapi Tugas-tugas dan
Memenuhi Syarat-Syarat Untuk Mencapai
Gelar Sarjana Teknik**

O l e h :

ANDY USMAN PANE

NIM : 948130013



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
2002**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

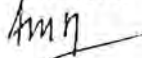
Document Accepted 28/12/23

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)28/12/23

UNIVERSITAS MEDAN AREA
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN

Agenda No. : 389/FTJM/TA/2001

Diterima Tanggal : 28-07-2001

Paraf : 

TUGAS AKHIR

N A M A : ANDI USMAN PANE

NO. STAMBUK : 948130013

MATA KULIAH : KETEL UAP

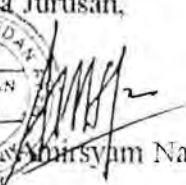
JUDUL TUGAS : PERENCANAAN RUANG BAKAR & DAYA GUNA FLUE GAS PADA KETEL UAP KAPASITAS 20 TBS / JAM TEKANAN KERJA 21 TBS / JAM TEKANAN KERJA 21 KG/CM²

SPEKIFIKASI : RANCANGLAH SATU UNIT RUANG BAKAR KETEL UAP UNTUK KAPASITAS 20 TON TBS/JAM DIGUNAKAN PADA KILANG PENGOLAHAN KELAPA SAWIT, RANCANGAN MELIPUTI SURVEY, STUDI LITERATUR, PERHITUNGAN PANAS DAN LAIN YANG DIANGGAP PERLU. GAMBAR KONSTRUKSI / PENAMPANG RUANG BAKAR TERSEBUT.

Diberikan Tanggal : 28 Juli 2001

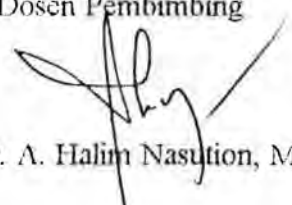
Selesai Tanggal : 28 Maret 2002

Ketua Jurusan,


Ir. H. Amirsyam Nasution, MT

Medan, 28 Juli 2001

Dosen Pembimbing


Ir. A. Halim Nasution, MSc.

Koordinator Rencana Tugas


Ir. H. Amirsyam Nasution, MT

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 28/12/23

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)28/12/23

KATA PENGANTAR

Terlebih dahulu penulis mengucapkan puji dan syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan Karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang sederhana ini dalam rangka memenuhi gelar Sarjana Teknik Mesin pada Fakultas Teknik UMA.

Adapun judul Tugas Sarjana ini adalah : Perencanaan Ruang Bakar dan Daya Gas Flue Gas Pada Ketel Uap Kapasitas 20 Ton TBS / Jam Tekanan Kerja 21 kg/cm².

Dalam menyelesaikan Tugas ini penulis telah berupaya semaksimal mungkin untuk kesempurnaan Tugas Sarjana ini, namun selaku manusia biasa tentu tidak terlepas dari kekurangan dan kesilapan.

Untuk itu dengan kerendahan hati, penulis menerima saran dan kritikan yang sifatnya membangun dari pembaca sekalian.

Demi terwujudnya kebaikan dan kesempurnaan Tugas ini.

Untuk penyusunan Tugas Sarjana ini penulis banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak, maka dalam hal ini dengan ketulusan hati penulis mengucapkan terima kasih. :

1. Bapak Dekan Fakultas Teknik UMA beserta stafnya.
2. Bapak Ketua dan sekretaris Jurusan Teknik Mesin UMA
3. Bapak Ir. A. Halim Nasution, MSc. selaku Dosen Pembimbing Utama yang telah banyak membantu dan membimbing penulis.
4. Bapak Ir. Surya Keliat. selaku Dosen Pembimbing II
5. Istri dan Anak yang tersayang
6. Orangtua dan keluarga tercinta
7. Rekan-rekan dan sahabat Mahasiswa FT. UMA.

Akhir kata penulis mengharapkan semoga Tugas Sarjana ini bermanfaat bagi penulis dan pembaca yang membutuhkan informasi tentang Tugas ini.

Medan, Februari 2002

Penulis,



ANDI USMAN PANE
948130013



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang Masalah.....	1
1.2. Pengertian Ketel Uap	2
1.3. Pengertian Dapur Ketel (Ruang Bakar)	3
1.4. Cara Pemindahan Panas Dalam Ketel.....	4
1.5. Proses Terbentuknya Uap	4
1.6. Topik Bahasan.....	6
BAB II ANALISA BAHAN BAKAR.....	7
2.1. Bahan Bakar Ketel Uap.....	7
2.2. Heating Value (Nilai Kalor).....	8
2.3. Konsumsi Bahan Bakar.....	11
2.4. Konsumsi Udara Pembakaran.....	12
2.5. Produksi Gas Asap.....	15
2.6. Volume Gas Asap	20
2.7. Kalor Pembakaran.....	24
BAB III PERENCANAAN RUANG BAKAR.....	25
3.1. Bentuk Ruang Bakar	25
3.2. Volume Ruang Bakar	25

3.3. Kontruksi Dinding Ruang Bakar.....	28
3.3.1. Pipa Water Wall Bagian Kiri	32
3.3.2. Pipa Water Wall Bagian Depan	35
3.3.3. Pipa Water Wall Bagian Kanan	39
3.4. Analisa Bidang Pemanas Pada Ruang Bakar.....	42
3.5. Analisa Temperatur Pada Pipa Water Wall	44
3.6. Analisa Panas Yang Diserap Pipa Water Wall	48
3.7. Isolasi Pada Dinding Ruang Bakar	54
 BAB IV DAYA GUNA GAS ASAP	 62
4.1. Sistem Aliran Gas Asap	62
4.2. Kalor Yang Dibutuhkan Dari Gas Asap.....	63
4.2.1. Kalor Untuk Pembentukan Uap Saturasi	63
4.2.2. Kalor Untuk Pembentukan Uap Super Heater	64
4.2.3. Kalor Untuk Alat Pemanas Udara.....	65
4.3. Analisa Temperatur Gas Uap.....	66
4.3.1. Temperatur Gas Asap Meninggalkan Pipa Water Wall	66
4.3.2. Temperatur Gas Asap Meninggalkan Siper Heater	67
4.3.3. Temperatur Gas Asap Meninggalkna Air Heater	68

4.4. Kehilangan Kalor Terbawa Gas Asap Kecerobong Asap	69
4.5. Neraca Kalor	70
4.6. Effesiensi Ketel	70
BAB V KESIMPULAN	71
LITERATUR	74
LAMPIRAN	75



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Untuk memenuhi energi listrik dan kebutuhan bahan bakar yang tiap tahun terus meningkat, kita jangan mengharapkan dari sumber bahan bakar minyak saja. Untuk itu kita harus mencari sumber-sumber energi listrik yang lainnya. Diantaranya sumber energi yang dapat menjadi energi tersebut adalah dengan tenaga uap (ketel uap).

Pada pembangkit listrik tenaga uap menggunakan ketel uap sebagai pengkonversi panas dari hasil pembakaran bahan bakar menjadi energi kinetik uap yang dapat memutar sudu turbin uap yang selanjutnya turbin uap memutar generator.

Banyak hal-hal yang menguntungkan sehingga ketel uap banyak digunakan pada saat sekarang ini antara lain.

- Bahan bakar yang digunakan dapat berupa kayu, ampas, ampas, sampah, minyak bumi dan batu bara.
- Fluida kerja yang digunakan adalah air yang dapat diperoleh dengan mudah.
- Dampak timbul tidak merusak lingkungan disekitarnya.
- Dapat digunakan sebagai pembangkit tenaga listrik dengan skala besar.

Ketel uap tidak hanya digunakan sebagai pembangkit tenaga listrik tetapi dapat juga digunakan untuk merebus kelapa sawit dan mesin-mesin yang memerlukan uap juga dapat memanaskan air bagi keperluan Rumah Sakit dan perhotelan.

Pada penulisan Tugas Sarjana ini penulis hanya membahas perencanaan dapur pada Ketel Uap khususnya jenis Ketel Uap jenis pipa air dengan menggunakan bahan bakar sabut dan cangkang kelapa sawit. Sebagaimana diketahui dapur ketel uap adalah bagian penting dalam menghasilkan panas untuk memperoleh uap.

1.2. Pengertian Ketel Uap

Ketel uap berasal dari kata “Boiling” yang artinya sama dengan mendidih (menguap). dengan demikian ketel uap dapat diartikan sebagai suatu pesawat konversi energi yang mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi panas yang akan memanaskan air menjadi uap dengan temperatur dan tekanan tinggi.

Uap yang dihasilkan ketel mempunyai temperatur dan tekanan yang lebih besar dari tekanan udara luar sesuai yang direncanakan, sehingga uap tersebut dapat digunakan untuk berbagai keperluan antara lain :

- Pembangkit tenaga (power plant), misalnya penggerak turbin uap
- Proses pemanasan dan perebusan
- Proses pengolahan pada PKS
- Kombinasi dari pembangkit tenaga dan perebusan

memproduksi uap. Tarikan pembakaran dihembuskan oleh fan isap yang ditempatkan dibelakang dapur keter uap. Sebagai pengontrol api dalam ruang bakar, dibuat beberapa lubang intip yang ditempatkan pada dinding dapur.

1.4. Cara Pemindahan Panas dalam Ketel ✓

Di dalam ruang bakar terjadi hantaran kalor (heat transper) dari sumber panas (hasil pembakaran bahan bakar) terhadap bidang pemanas (Heating Surface) secara pancaran dan rambatan (radiasi dan konduksi). Dari heating surface panas dihantar lagi kepada air keter secara konveksi.

Jadi ada tiga (3) cara perpindahan panas didalam ketel, yaitu :

1. Konduksi : Perpindahan panas yang terjadi di dalam ketel, yaitu stasioner (diam dan seimbang) akibat perbedaan temperatur di dalamnya.
2. Konveksi : Perpindahan panas yang terjadi antara suatu permukaan dan fluida bergerak bila keduanya memiliki temperatur yang berbeda.
3. Radiasi : Semua permukaan akan menerima energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik.

1.5. Proses Terbentuknya Uap

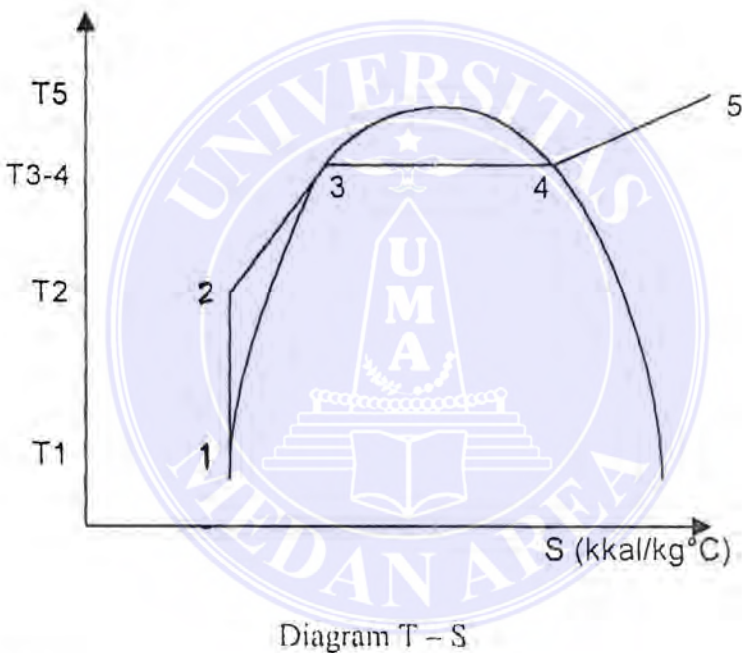
Untuk merubah energi panas menjadi energi mekanis diperlukan media kerja (working agent). Dalam hal ini media kerja yang digunakan adalah uap. Uap dalam

ketel adalah uap satu rasi yaitu uap yang timbul akibat perubahan air menjadi uap dengan cara pemanasan.

Keuntungan penggunaan air sebagai media kerja adalah :

- Diperoleh dari benda yang murah dan mudah didapat
- Mempunyai kemampuan untuk menerima kalor dalam jumlah yang besar
- Cepat menghantar panas

Proses perubahan air menjadi fasa uap dapat dilihat pada gambar di bawah ini



Keterangan Gambar

- 1 - 2 : proses pemasukan air melalui pompa
- 2 - 3 : proses pemanasan air hingga mencapai titik didih
- 3 - 4 : proses pembentukan uap basah sampai mencapai uap jenuh (uap satu rasi) tanpa mengalami perubahan temperatur (laten heat)

4 – 5 : proses pembentukan uap panas lanjut (adi panas)

Proses pembentukan uap dapat terjadi pada 3 (tiga) bagian keadaan uap yang dihasilkan yaitu :

1. Uap Basah : yaitu uap yang masih mengandung butiran-butiran air yang halus kadar air ($x < 1$).
2. Uap Jenuh : yaitu uap yang tidak mengandung butiran-butiran air yang halus kadar uap ($x = 1$).
3. Uap Adipanas : yaitu uap kering yang dihasilkan dari proses pemanasan lanjut (superheater) kadar uap ($x > 1$).

1.6. Topik Bahasan

Topik bahasan yang dibahas dalam Tugas Sarjana ini adalah :

- Bagaimana bentuk dan ukuran dapur Ketel Uap
- Bagaimana konstruksi dinding dapur
- Bagaimana menentukan dinding pipa water wall
- Bagaimana Heat Transfer dalam dapur Ketel Uap
- Bagaimana daya guna gas asap pada Ketel Uap.

BAB II

ANALISA BAHAN BAKAR

2.1. Bahan Bakar Ketel Uap

Dalam memproduksi uap dalam Ketel Uap dibutuhkan sejumlah panas yang diperoleh dari pembakaran bahan bakar.

Dalam hal pemilihan bahan bakar untuk suatu kebutuhan Ketel Uap didasarkan pada pertimbangan-pertimbangan sebagai berikut :

- a. Bahan bakar yang tersedia cukup
- b. Nilai kalor yang tinggi untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan
- c. Bahan bakar mudah didapat dan biayanya murah

Dalam perencanaan ini, Ketel Uap digunakan untuk proses pengolahan buah kelapa sawit, maka alternatif pemilihan bahan bakar cenderung untuk memilih cangkang dan serabut. Hal ini didasarkan pada :

- a. Nilai kalor bahan bakar cangkang dan sabut memenuhi persyaratan
- b. Cangkang dan sabut bila tidak digunakan akan menjadi limbah dan mengakibatkan pencemaran lingkungan
- c. Cangkang dan sabut tersedia di lokasi pabrik
- d. Sisa pembakaran bahan bakar dapat digunakan sebagai pupuk untuk tanaman kelapa sawit.

2.2. Heating Value (Nilai Kalor)

Nilai kalor bahan bakar (heating value) adalah banyaknya energi panas yang diperoleh (dilepas) pada proses pembakaran 1 (satu) kilogram bahan bakar.

Nilai kalor bahan bakar terbagi atas 2 (dua) bagian yaitu :

1. Nilai kalor atas (higher heating value)

Yaitu banyaknya panas yang diperoleh pada proses pembakaran dari satu kilogram bahan bakar dengan memperhitungkan panas kondisi air.

2. Nilai kalor bawah (lower heating value)

Yaitu banyaknya panas yang diperoleh pada proses pembakaran dari satu kilogram bahan bakar tanpa memperhitungkan panas kondisi air.

Tabel 2.1. Komposisi kimia cangkang dan sabut

Komposisi bahan bakar	Cangkang (%)	Sabut (%)
Carbon (C)	50,12	47,14
Hidrogen (H ₂)	5,91	5,79
Nitrogen (N ₂)	10,95	12,19
Oksigen (O ₂)	30,20	27,98
Sulfur (S)	0,18	0,30
Abu (A)	2,64	6,60
Jumlah	100	100

Dikutip dari : Laboratorium PT, PP London Sumatra Indonesia Tbk Rambong Sialang POM

Dengan memakai rumus Dulong dan Petit, maka dapat diperoleh nilai kalor atas (HHV) dan kalor bawah (LHV) dari bahan bakar sabut dan cangkang.

- Nilai kalor untuk sabut

$$\begin{aligned}
 (HHV)_S &= 8080 \cdot C + 33460 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) 2220 \cdot S \text{ (kkal/kg)} \\
 &= 8080 \cdot 0,4714 + 33460 \left(0,0579 - \frac{0,2798}{8} \right) 2220 \cdot 0,003 \\
 &= 4582,64 \text{ kkal/kg bb.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (LHV)_S &= (HHV)_S - 9 H_2 \cdot 586 \text{ (kkal/kg.bb)} \\
 &= 4582,64 - (9 \cdot 0,0578) \cdot 586 \\
 &= 4277,27 \text{ kkal/kg.bb}
 \end{aligned}$$

- Nilai kalor untuk cangkang

$$\begin{aligned}
 (HHV)_C &= 8080 \cdot C + 33460 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) 2220 \cdot S \text{ (kkal/kg)} \\
 &= 8080 \cdot 0,5012 + 33460 \left(0,0591 - \frac{0,3020}{8} \right) 2220 \cdot 0,0018 \\
 &= 4768,05 \text{ kkal/kg bb.} \\
 (LHV)_C &= (HHV)_C - 9 H_2 \cdot 586 \text{ (kkal/kg.bb)} \\
 &= 4768,05 - (9 \cdot 0,0591) \cdot 586 \\
 &= 4456,36 \text{ kkal/kg.bb}
 \end{aligned}$$

Dalam hal ini pemakaian kedua bahan bakar di atas ada beberapa pertimbangan yang harus diperhitungkan untuk menentukan perbandingan perbandingan pemakaian cangkang dan sabut antara lain :

* Ir. Syamsir A Muin "Pesawat-pesawat Konversi Energi I (Ketel Uap)" hal 160

1. Cangkang

Apabila hanya cangkang yang digunakan sebagai bahan bakar maka akan mengakibatkan terjadi Over Heating (kelebihan panas) sehingga akan merusak elemen-elemen yang dipanaskan.

2. Sabut

Apabila hanya sabut yang digunakan sebagai bahan bakar maka sisa pembakaran yang berupa abu semakin banyak terbangun bersama gas asap, sehingga akan menutupi atau melapisi bidang pemanas dan penyerapan panas semakin berkurang. Bahan bakar sabut akan cepat habis terbakar dan nilai kalor bahan bakar relatif rendah, sehingga memerlukan bahan bakar yang lebih banyak.

Maka untuk mengatasi masalah diatas diambil suatu kesimpulan yaitu dengan mencampurkan bahan bakar cangkang dan sabut. Dalam perencanaan ini perbandingan bahan bakar cangkang dan sabut 1 : 3 yaitu 25 % cangkang dan 75 % sabut maka HHV campuran dan LHV campuran dapat dihitung berdasarkan ketentuan sebagai berikut :

$$\text{HHV campuran} = m_c (\text{HHV})_c + m_s (\text{HHV})_s$$

$$\text{LHV campuran} = m_c (\text{LHV})_c + m_s (\text{LHV})_s$$

Dimana :

m_c = % cangkang dalam bahan bakar campuran
25%

m_s = % sabut dalam bahan bakar campuran
75%

Sehingga diperoleh :

$$(LHV) \text{ campuran} = 0,25 (4768,05) + 0,75 (4582,64)$$

$$4628,99 \text{ kkal/kg.bb}$$

$$(LHV) \text{ campuran} = 0,25 (4456,36) + 0,75 (4277,27)$$

$$= 4322,04 \text{ kkal/kg.bb}$$

Dalam perhitungan selanjutnya nilai kalor yang dipakai adalah nilai kalor bawah (LHV) campuran bawah cangkang dan sabut yaitu 4322,04 kkal/kg.bb.

2.3. Konsumsi Bahan Bakar

Untuk dapat memproduksi uap dengan kapasitas 10 Ton uap/jam dan tekanan 21 kg/cm² dengan temperatur 280°C (hasil survey) sehingga Ketel Uap tersebut membutuhkan sejumlah bahan bakar yang jumlahnya dapat diperkirakan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$W_f = \frac{W_s (H_{sup} - H_o)}{LHV \cdot \eta_k} \text{ kg/jam} \quad \dots\dots\dots$$

Dimana :

W_f = jumlah bahan bakar yang dibutuhkan (kg/jam)

W_s = massa aliran uap yang digunakan

$$= 10.000 \text{ kg/jam}$$

LHV = nilai kalor bawah

$$= 4322,04 \text{ kkal/kg.bb}$$

H_{sup} = entalpy uap super heater pada temperatur 280°C dan tekanan 21 kg.cm²

* Ir. Syamsir A Muin "Pesawat-pesawat Konversi Energi I (Ketel Uap)" hal 233

709,5 kkal/kg

Ha = entalpi air pengisian ketel pada temperatur 105°C

105 kkal/kg

ηk = efisiensi ketel (70 ÷ 90) **

→ 80 % (direncanakan)

maka:

$$Wf = \frac{10,000 \text{ kg/gram} (709,5 - 105) \text{ kkal/kg}}{(4322,04 \text{ kkal/kg.bb} \times 0,80)}$$

$$= 1748,30 \text{ kg/jam}$$

Jadi pembakaran bahan bakar adalah 1760,82 kg bb/jam dengan perbandingan 75% sabut dan 25% cangkang.

2.4. Konsumsi Udara Pembakaran

Pembakaran adalah reaksi kimia antara bahan bakar dengan udara dalam menentukan konsumsi udara pembakaran yang dibutuhkan, kita perlu mengetahui komposisi kimia dari bahan bakar yang digunakan. Perbandingan cangkang dan sabut direncanakan adalah 1:3, maka komposisi kimia yang terkandung dari bahan campuran tersebut adalah:

$$\begin{aligned} C &= 0,25 (50,12) + 0,75 (47,14) \\ &= 47,88 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_2 &= 0,25 (5,91) + 0,75 (5,75) \\ &= 5,82 \% \end{aligned}$$

** Ir. Syamsir A. Muin "Pesawat-pesawat Konversi Energi I (Ketel Uap)" hal 226

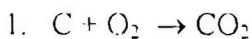
$$\begin{aligned} \text{O}_2 &= 0,25 (30,20) + 0,75 (27,98) \\ &= 28,53 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{S} &= 0,25 (0,18) + 0,75 (0,03) \\ &= 0,27 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{A} &= 0,25 (2,64) + 0,75 (6,60) \\ &= 5,61 \% \end{aligned}$$

Dalam proses pembakaran tidak semua unsur ikut bereaksi dengan oksigen (O_2), seperti Nitrogen (N_2). Unsur ini akan keuar bersama gas asap. Besarnya jumlah Nitrogen ini tergantung kepada jumlah udara pembakaran yang dibutuhkan dan jumlah Nitrogen yang tergantung didalam bahan bakar tersebut.

Pada bahan bakar cangkang dan sabut, komposisi kimia yang bereaksi dengan oksigen pada pembakaran sempurna adalah:

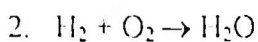


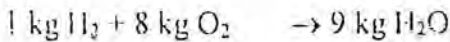
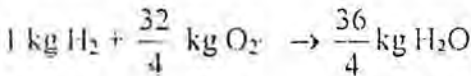
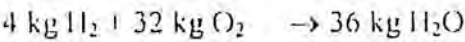
$$12 \text{ kgc} + 32 \text{ kg O}_2 \rightarrow 44 \text{ kg CO}_2$$

$$1 \text{ kg} + \frac{32}{12} \text{ kg O}_2 \rightarrow \frac{44}{12} \text{ kg CO}_2$$

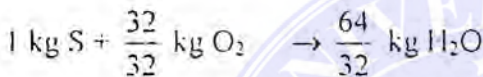
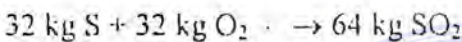
$$1 \text{ kg} + 2,67 \text{ kg O}_2 \rightarrow 3,67 \text{ kg CO}_2$$

Maka panas setiap pembakaran 1 kg C secara sempurna dibutuhkan sebanyak 2,67 kg O_2 dan menghasilkan 3,67 kg CO_2





Maka pada setiap pembakaran 1 kg H₂ secara sempurna dibutuhkan sebanyak 8 kg O₂ dan menghasilkan 9 kg H₂O



Maka pada setiap pembakaran 1 kg S secara sempurna dibutuhkan sebanyak 1 kg O₂ dan menghasilkan 2 kg SO₂

Maka banyaknya udara pembakaran yang dibutuhkan untuk pembakaran 1 kg bahan bakar dibutuhkan:

$$\begin{aligned} (W_a)_{th} &= \frac{2,66 c + 7,94 \text{ H}_2 + 0,998 \text{ S} - \text{O}_2}{0,232} \text{ kg. ud/kg. bb} \\ &= \frac{2,66 (0,4788) + 7,94 (0,0582) + 0,998 (0,0027) - 0,2853}{0,232} \end{aligned}$$

$$(W_a)_{th} = 6,263 \text{ kg ud/kg bb}$$

* Ir. Syamsir A. Muin "Pesawat-pesawat Konversi Energi I (Kejel Uap)" hal 163

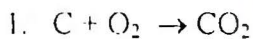
$$\begin{aligned} \text{O}_2 &= 0,25 (30,20) + 0,75 (27,98) \\ &= 28,53 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{S} &= 0,25 (0,18) + 0,75 (0,03) \\ &= 0,27 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{A} &= 0,25 (2,64) + 0,75 (6,60) \\ &= 5,61 \% \end{aligned}$$

Dalam proses pembakaran tidak semua unsur ikut bereaksi dengan oksigen (O_2), seperti Nitrogen (N_2). Unsur ini akan keuar bersama gas asap. Besarnya jumlah Nitrogen ini tergantung kepada jumlah udara pembakaran yang dibutuhkan dan jumlah Nitrogen yang tergantung didalam bahan bakar tersebut.

Pada bahan bakar cangkang dan sabut, komposisi kimia yang bereaksi dengan oksigen pada pembakaran sempurna adalah:

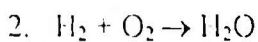


$$12 \text{ kg C} + 32 \text{ kg O}_2 \rightarrow 44 \text{ kg CO}_2$$

$$1 \text{ kg} + \frac{32}{12} \text{ kg O}_2 \rightarrow \frac{44}{12} \text{ kg CO}_2$$

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

Maka panas setiap pembakaran 1 kg C secara sempurna dibutuhkan sebanyak 2,67 kg O_2 dan menghasilkan 3,67 kg CO_2



$$2 \text{ H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{ H}_2\text{O}$$

Untuk mendapatkan pembakaran yang sempurna maka dibutuhkan faktor udara lebih (excess air). Faktor udara lebih ini berkisar antara (25 % - 50 %).

Dalam perencanaan ini excess air diambil 30 %
Maka kebutuhan udara untuk pembakaran aktual adalah

$$\begin{aligned}(W_a)_{act} &= (W_a)_{th} \times 30 \% + (W_a)_{th} \\ &= (6,263 \times 0,30) + 6,262 \\ &= 8,142 \text{ kg .ud/kg .bb}\end{aligned}$$

Jadi dengan demikian banyaknya udara pembakaran actual untuk setiap jamnya adalah :

$$\begin{aligned}(W_a)_{act} &= (W_a)_{act} \text{ kg .ud/kg .bb} \times W_f \text{ kg .bb/jam} \\ &= 8,142 \text{ kg .ud/kg .bb} \times 1748,30 \text{ kg .bb/jam} \\ &= 14234,65 \text{ kg .ud/jam}\end{aligned}$$

2.5. Produksi Gas Asap

Gas asap terbentuk dari hasil pembakaran dan gas-gas sisa pembakaran, berat gas asap yang terbentuk dari pembakaran bahan bakar adalah sama dengan jumlah berat bahan bakar yang ditambah dengan jumlah berat udara pembakaran yang dibutuhkan dikurangi dengan persentase abu, yaitu dirumuskan dengan:

$$W_g = \frac{1 + (2,666 + 7,94 H_2 + 0,999 S - O_2)}{0,232} R - A$$

Dimana:

R = angka kelipatan udara

$$R = \frac{(Wa)_{act}}{(Wa)_{th}}$$

$$= \frac{8,147}{6,263}$$

$$R = 1,30$$

A = persentase abu (ASH)

$$= 5,61 \%$$

maka diperoleh:

$$(Wg) = \frac{1 + 2,66(0,4788) + 7,94(0,0582) + 0,998(0,0027) - 0,2853}{0,232} 1,30 - 0,0561$$

$$= 9,39 \text{ kg gas asap/kg . bb}$$

jadi berat gas asap dari hasil pembakaran bahan bakar tiap jamnya adalah:

$$(Wg)_{tot} = W_f \times W_g$$

$$= 1748,30 \text{ kg . bb/jam} \times 9,39 \text{ kg gas asap/kg . bb}$$

$$= 16416,53 \text{ kg gas asap/jam.}$$

Dari persamaan reaksi kimia ditentukan susunan kimia gas. gas Asap dari pembakaran 1 kg bahan bakar yaitu:

1. Berat kandungan karbon dioksida

$$\begin{aligned} W(\text{CO}_2) &= 3,67 \text{ kg CO}_2/\text{kg} \cdot \text{bb} \times C \\ &= 3,67 \text{ kg CO}_2/\text{kg} \cdot \text{bb} \times 0,4788 \\ &= 1,76 \text{ kg CO}_2/\text{kg} \cdot \text{bb} \end{aligned}$$

2. Berat kandungan air

$$\begin{aligned} W(\text{H}_2\text{O}) &= 9 \text{ kg H}_2\text{O}/\text{kg} \cdot \text{bb} \times \text{H}_2 \\ &= 9 \text{ kg H}_2\text{O}/\text{kg} \cdot \text{bb} \times 0,0582 \\ &= 0,5238 \text{ kg H}_2\text{O}/\text{kg} \cdot \text{bb} \end{aligned}$$

3. Berat kandungan sulfur dioksida

$$\begin{aligned} W(\text{SO}_2) &= 2 \text{ kg SO}_2/\text{kg} \cdot \text{bb} \times S \\ &= 2 \text{ kg SO}_2/\text{kg} \cdot \text{bb} \times 0,027 \\ &= 0,0054 \text{ kg SO}_2/\text{kg} \cdot \text{bb} \end{aligned}$$

4. Berat kandung excess air

$$\begin{aligned} W(\text{O}_2) &= \text{faktor udara lebih} \times 23 \% (W_a)_{th} \\ &= 0,30 \times 0,23 \times 6,263 \text{ kg O}_2/\text{kg} \cdot \text{bb} \\ &= 0,4321 \text{ kg O}_2/\text{kg} \cdot \text{bb} \end{aligned}$$

5. Berat kandungan Nitrogen

$$\begin{aligned} W(\text{N}_2) &= \text{Weigh analite N}_2 \times (W_a)_{act} + \text{N}_2 \\ &= 77 \% \times 8,142 \text{ kg.ud}/\text{kg} \cdot \text{bb} + 0,1188 \\ &= 6,3881 \text{ kg N}_2/\text{kg} \cdot \text{bb} \end{aligned}$$

Berat gas asap basah (Wg)b

$$\begin{aligned}(Wg)b &= 1 + (Wa)_{act} - A \\&= 1 + 8,142 - 0,0561 \\&= 9,086 \text{ kg.gas/kg.bb}\end{aligned}$$

Analisa beras gas asap basah adalah sebagai berikut :

$$Aw = \frac{WA}{(Wg)b} \times 100\%$$

Dengan menggunakan rumus-rumus diatas didapat harga-harga :

$$\begin{aligned}(CO_2)_w &= \frac{1,76}{9,086} \times 100\% \\&= 19,37 \%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(H_2O)_w &= \frac{0,5238}{9,086} \times 100\% \\&= 5,76 \%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(SO_2)_w &= \frac{0,0054}{9,086} \times 100\% \\&= 0,059 \%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(O_2)_w &= \frac{0,4321}{9,086} \times 100\% \\&= 4,76 \%\end{aligned}$$

$$(N_2)_w = \frac{6,3719}{9,086} \times 100\% = 70,13 \%$$

¹ Ir. Syamsir A Muin "Pesawat-pesawat Konversi Energi I (Ketel Uap)" hal 182

² Ir. Syamsir A Muin "Pesawat-pesawat Konversi Energi I (Ketel Uap)" hal 197

Berat gas asap kering (tidak mengandung uap air)

$$\begin{aligned}(W_g)_k &= (W_g)_b - W(H_2O) \\ &= 9,086 - 0,5238 \\ &= 8,5622 \text{ kg.gas/kg.bb}\end{aligned}$$

Untuk pembakaran bahan bakar selama satu jam, maka berat gas asap kering total yang dihasilkan adalah :

$$\begin{aligned}(W_g)_{ku} &= Wf \times (W_g)_k \\ &= 1748,30 \times 8,5622 \\ &= 14969,29 \text{ kg.gas/jam}\end{aligned}$$

Analisa gas asap kering adalah :

$$\begin{aligned}(CO_2)_w &= \frac{1,76 \times 100\%}{8,5622} \\ &= 20,55 \%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(H_2O)_w &= \frac{0,5238}{8,5622} \\ &= 6,11 \%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(SO_2)_w &= \frac{0,0054}{8,5622} \times 100\% \\ &= 0,063\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(O_2)_w &= \frac{0,4321}{8,5622} \times 100\% \\ &= 5,046 \%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(N_2)_{\text{u}} &= \frac{6,3719}{8,5622} \times 100\% \\ &= 74,42 \%\end{aligned}$$

2.6. Volume Gas Asap

Volume gas asap (sisa pembakaran) dapat ditentukan dari susunan kimia gas-gas asap dari pembakaran, 1 kg bahan bakar yaitu :

1. Volume (CO_2) adalah ;

$$\begin{aligned}V(\text{CO}_2) &= \frac{5,63}{3} \cdot C \text{ (m}^3/\text{kg.bb)} \\ &= \frac{5,63}{3} \cdot 0,4788 \\ &= 0,90 \text{ m}^3/\text{kg.bb}\end{aligned}$$

2. Volume SO_2 adalah ;

$$\begin{aligned}V(\text{SO}_2) &= \frac{5,63}{8} \cdot S \text{ (m}^3/\text{kg.bb)} \\ &= \frac{5,63}{8} \cdot 0,0027 \\ &= 0,0019 \text{ m}^3/\text{kg.bb}\end{aligned}$$

3. Volume (H_2O) adalah ;

$$\begin{aligned}V(\text{H}_2\text{O}) &= 1,24 (9 \cdot \text{H}_2) \text{ (m}^3/\text{kg.bb)} \\ &= 1,4 (9 \cdot 0,0582) \\ &= 0,65 \text{ m}^3/\text{kg.bb}\end{aligned}$$

* Ir. Syamsir A Muin "Pesawat-pesawat Konversi Energi I (Ketel Uap)" hal 184

4. Volume oksigen excess (VO_2)

$$\begin{aligned} V(O_2)_{ex} &= f_a (1,865 \cdot C + 0,69878 \cdot S) \text{ m}^3/\text{kg.bb} \\ &= 0,30 \{(1,865 \cdot 0,4788 + 0,69878 \cdot 0,0027)\} \text{ m}^3/\text{kg.bb} \\ &= 0,268 \text{ m}^3/\text{kg.bb} \end{aligned}$$

5. Volume oksigen dalam bahan bakar $V(O_2)_{bb}$

$$\begin{aligned} V(O_2)_{bb} &= \frac{0,2853}{32} \cdot 22,4 \text{ (m}^3/\text{kg.bb)} \\ &= 0,196 \text{ m}^3/\text{kg.bb} \end{aligned}$$

6. Volume oksigen dalam bahan asap $V(O_2)_{gas\ asap}$

$$\begin{aligned} V(O_2)_g &= V(O_2)_{bb} + V(O_2)_{ex} \\ &= 0,268 + 0,196 \\ &= 0,464 \text{ m}^3/\text{kg.bb} \end{aligned}$$

7. Volume N_2 adalah :

$$\begin{aligned} V(N_2) &= \frac{79}{21} \times 3 \times V(O_2)_{ex} \text{ (m}^3/\text{kg.bb)} \\ &= \frac{79}{21} \times 3 \times 0,268 \\ &= 3,025 \text{ m}^3/\text{kg.bb} \end{aligned}$$

Dengan demikian volume gas asap basah dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} (V_g)_b &= \frac{1,866 \cdot C + 0,75}{0,11} + 1,24 (9 \cdot H_2) \\ &= \frac{1,866 \times 0,4778 + 0,75}{0,11} + 1,24 (9 \cdot 0,0579) \\ &= 8,79 \text{ m}^3/\text{kg.bb} \end{aligned}$$

Volume gas asap basah untuk bahan bakar selama satu jam adalah :

$$\begin{aligned} (V_g)_b \text{ tot} &= WF \times (V_g)_b \\ &= 1748,30 \times 8,79 \\ &= 15367,55 \text{ m}^3/\text{jam} \end{aligned}$$

Analisa persentase volume gas asap basah

$$= \frac{V}{(V_g)_b} \times 100 \%$$

Dengan menggunakan rumus diatas didapat harga-harga :

$$\begin{aligned} (CO_2)_v &= \frac{0,90}{8,79} \times 100 \% \\ &= 10,239 \% \\ (H_2O)_v &= \frac{0,65}{8,79} \times 100 \% \\ &= 7,395 \% \\ (SO_2)_v &= \frac{0,0019}{8,79} \times 100 \% \\ &= 0,022 \% \end{aligned}$$

* Ir. Syamsir A Muin "Pesawat-pesawat Konversi Energi I (Ketel Uap)" hal 184

$$\begin{aligned}(N_2)_v &= \frac{3,025}{8,79} \times 100 \% \\ &= 34,414 \%\end{aligned}$$

Volume gas asap kering (gas asap yang tidak mengandung air) adalah :

$$\begin{aligned}(V_g)_k &= (V_g)_b - V (H_2O) \\ &= 1748,30 \times 8,14 \\ &= 14231,16 \text{ m}^3/\text{jam}\end{aligned}$$

Analisa persentase volume gas asap kering

$$\begin{aligned}(CO_2)_v &= \frac{V(CO_2)}{(V_g)_k} \times 100 \% \\ &= \frac{0,90}{8,14} \times 100 \% \\ &= 11,057 \%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(SO_2)_v &= \frac{0,0019}{8,14} \times 100 \% \\ &= 0,0233 \%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(N_2)_v &= \frac{3,025}{8,14} \times 100 \% \\ &= 37,162 \%\end{aligned}$$

2.7. Kalor Pembakaran

Kalor pembakaran yang dihasilkan oleh bahan bakar yang terbakar di dalam ruang bakar (dapur ketel) adalah :

$$Q_f = W_f \cdot LHV \cdot \eta_f \text{ (kkal/jam)}$$

Dimana :

W_f = konsumsi bahan bakar

$$= 1748.30 \text{ kg/jam}$$

LHV = nilai kalor bawah (lower heating value)

$$= 4322,04 \text{ kkal/kk.bb}$$

η_f = efisiensi dapur

$$= (0,90 - 0,97)$$

$$= 0,95 \text{ (diambil)}$$

maka :

$$\begin{aligned} Q_f &= 1748,30 \times 4322,04 \times 0,95 \\ &= 7178411,3 \text{ kkal/jam.} \end{aligned}$$

1. Ir. Syamsir A Muin "Pesawat-pesawat Konversi Energi | (Ketel Uap)" hal 47

BAB III

PERENCANAAN RUANG BAKAR

3.1. Bentuk Ruang Bakar

Ruang bakar (furnace) adalah suatu ruangan dimana terjadi proses pembakaran bahan bakar untuk mendapatkan kalor (panas) yang mengubah air menjadi uap. Kedudukan ruang bakar pada ketel harus direncanakan sedemikian rupa sehingga panas yang dihasilkan dari pembakaran sempurna, sehingga proses perubahan air menjadi uap dapat berlangsung dengan baik. Dan kemudian kerugian-kerugian panas di dalam ruang bakar harus dibuat sekecil mungkin. Bentuk ruang bakar direncanakan berbentuk kubus dan pada dinding dapur terletak pipa-pipa pemanas (water wall) yang dilalui air.

3.2. Volume Ruang Bakar

Volume ruang bakar dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$V_f = \frac{W_f \cdot LHV \cdot \eta_f}{H_{rf}}$$

Dimana :

W_f = jumlah bahan bakar
 = 1748,30 bb/jam

* Power Station Engineering & Economy, Mc Graw H.P. Co, hal 170

LHV = nilai kalor bawah

$$= 4322,04 \text{ kkal/kg.bb}$$

η_f = efisiensi dapur (0,90 – 0,97)

$$= 0,95 \text{ (diambil)}$$

Hrf = laju kalor yang dihasilkan ruang bakar untuk bahan bakar padat

$$= (133500 - 222500) \text{ kkal/m}^3 \cdot \text{jam} \dots$$

$$= 178000 \text{ kkal/m}^3 \cdot \text{jam (diambi)}$$

Maka :

$$V_f = \frac{1748,30 \cdot 4322,04 \cdot 0,95}{17800}$$

$$= 40,32 \text{ m}^3$$

Direncanakan ruang bakar berbentuk persegi panjang dengan dimensi sebagai berikut :

- Panjang ruang bakar (P) = 4000 mm
- Lebar ruang bakar (L) = 2800 mm

Sehingga tinggi ruang bakar (h) dapat diperoleh yaitu :

$$h = \frac{V_f}{P \cdot L}$$

$$= \frac{40,32 \text{ m}^3}{4 \text{ m} \cdot 2,8 \text{ m}}$$

$$= 3,60 \text{ m}$$

* ESM Tambunan, Fajar H. Karo-karo BE, "Ketel Uap" hal 171

Untuk mencari volume pada dinding diperoleh dengan persamaan berikut :

$$V_r = \frac{L \cdot \Delta h}{2} \cdot P \cdot (m^3)$$

Dimana :

Δh = selisih tinggi ruang bakar

$$= \tan \alpha \cdot L$$

α = sudut kemiringan

$$= (10^\circ - 20^\circ)$$

$$= (\text{diambil } 15^\circ)$$

maka :

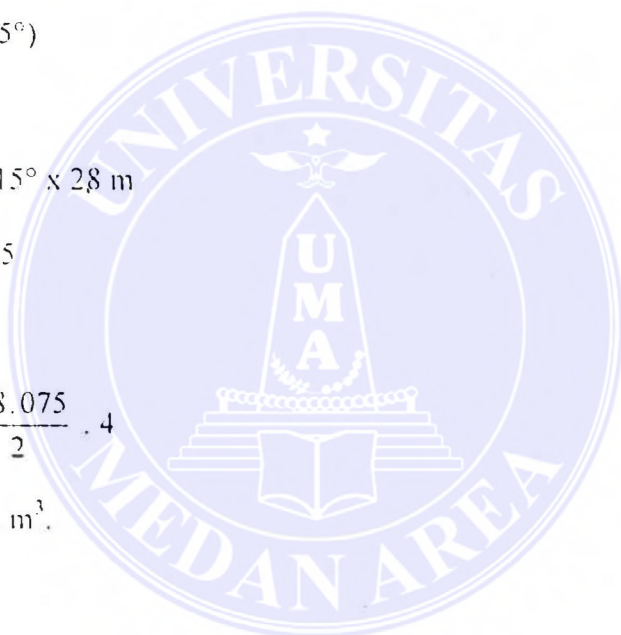
$$\Delta h = \tan 15^\circ \times 28 \text{ m}$$

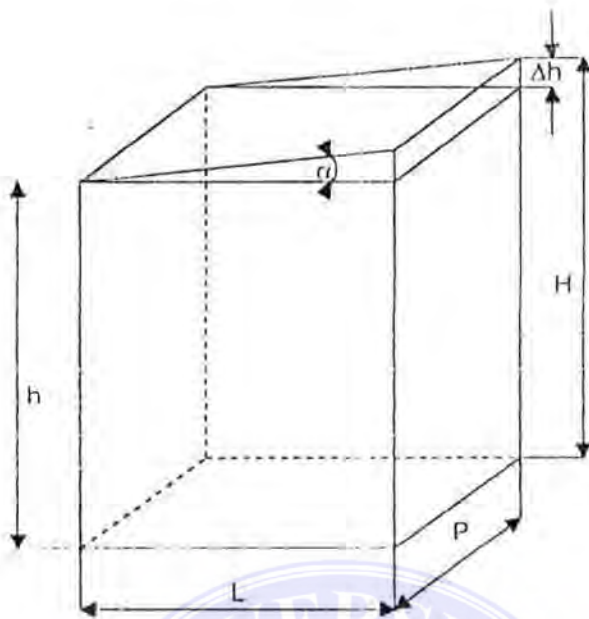
$$= 0,75$$

Sehingga :

$$V_r = \frac{2,8 \cdot 0,75}{2} \cdot 4$$

$$= 4,2 \text{ m}^3$$





Gambar 3.1. Bentuk Ruang Bakar

Dengan demikian volume total ruang bakar adalah :

$$\begin{aligned} V &= V_f + V_r \\ &= 40,32 + 4,2 \\ &= 44,52 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

3.3. Konstruksi Dinding Ruang Bakar

Konstruksi dinding dapur dilapisi oleh pipa-pipa water wall bersirip yang ditampalkan pada sisi sebelah dalam ruang bakar. Bagian atas pipa water wall dihubungkan ke dalam drum atas dan ujung pipa bagian bawah disambungkan ke header dengan sistem sambungan las dan bisa juga dilakukan dengan expanded.

Bahan dari pipa water wall direncanakan dari ASME 1956 Power Boiler Code^{*} dengan Seamless Carbon Steel A 53 Grade A untuk kondisi :

- Tekanan kerja uap (P) = 21 kg/cm^2
= 298,6 psi
- Temperatur uap saturasi (Tsat) = $214,85 \text{ }^\circ\text{C}$
= $416,45 \text{ }^\circ\text{F}$

maka untuk temperatur $(20 \div 650) \text{ }^\circ\text{F}$ dan bahan steel diperoleh dari Allowable stress, Sa = 12000 psi.

maka : Schedule Number (Sn) adalah :

$$Sn = \frac{1000 \cdot P}{S_a}$$

Dimana :

P = tekanan kerja ketel
= 298,6 psi

Sa = allowable stress
= 12.000 psi

maka :

$$Sn = \frac{1000 \cdot 298,6}{12.000}$$

$$= 24,88$$

^{*} Power Station Engineering & Ekonomik hal 130

Dimana S_n yang didapat berdasarkan hasil perhitungan tidak tertera dalam tabel, maka dalam hal ini Schdule Number yang diambil lebih besar dari Schdule Number yang terjadi, yaitu $S_n = 40$.

Dari Schdule Number tersebut direncanakan ukuran pipa dengan diameter nominal $D_n = 2$ in, maka dari tabel dimensi pipa baja diperoleh :

- Diameter nominal pipa (D_n) = 2 in = 50,80 mm
- Diameter luar (D_o) = 2,375 in = 60,32 mm
- Diameter dalam (D_i) = 2,067 in = 52,50 mm
- Tebal pipa (t) = 0,154 in = 3,91 mm

Tebal minimum pipa (t_m) dicari dengan rumus

$$t_m = \frac{D_o \cdot P}{2 (S_a + Y \cdot P)} + C \text{ (in)}$$

Dimana :

- P = tekanan kerja = 298,6 psi
- D_o = diameter luar = 2,375 in
- Y = koefisien yang tergantung pada temperatur kerja 214,85°C (416,5)°F
 = yaitu 0,4 (untuk dibawah temperatur 900°F)
- C = konstanta penambahan
 = 0,065 in untuk diameter pipa $D > 1$ in
 = 0,05 in untuk diameter pipa $D < 1$ in

* Bernhardy G.A Skrotziki and Willian A Vapor "Power Station Engineering and Economic" hal 318

Tabel 3.1. Allowable S. Value for pipe Power Piping System

Material	Spesification and grade	Maximum S for given temperature, Psi				
		-20-650 F	800 F	900 F	1000 F	1100 F
Electrics-resistance weldle steel	A53, A135, A	10,200	7,650	4,250		
Electrics-fucion welded Steel.....	A53, A135, B	12,750	9,200	4,250		
	A155, A285, B	10,100	7,500			
Seamleass carbon steel	A155, A285, B	11,250	8,450			
	A53, A106, A	12,000	9,000	5,000	1,500	
	A53, A106, B	15,000	10,800	5,000	1,500	
Seamlees alloy steel						
1% Cr, ½% Mo	A335, P12	15,000	14,750	13,100	7,500	2,800
1¼ % Cr, ¼ % Mo	A335, P11	15,000	15,000	13,100	7,800	4,000
3% Cr, 15% Mo	A335, P21	15,000	13,000	12,000	7,000	4,000
18% Cr, 8% Mo	A312, 1p317		16,000	16,000	14,000	10,400

Adapted from ASA B31 1-1955 and ASME 1956 Power Boiler Code

Tabel 3.2. Dimensi Pipa Baja

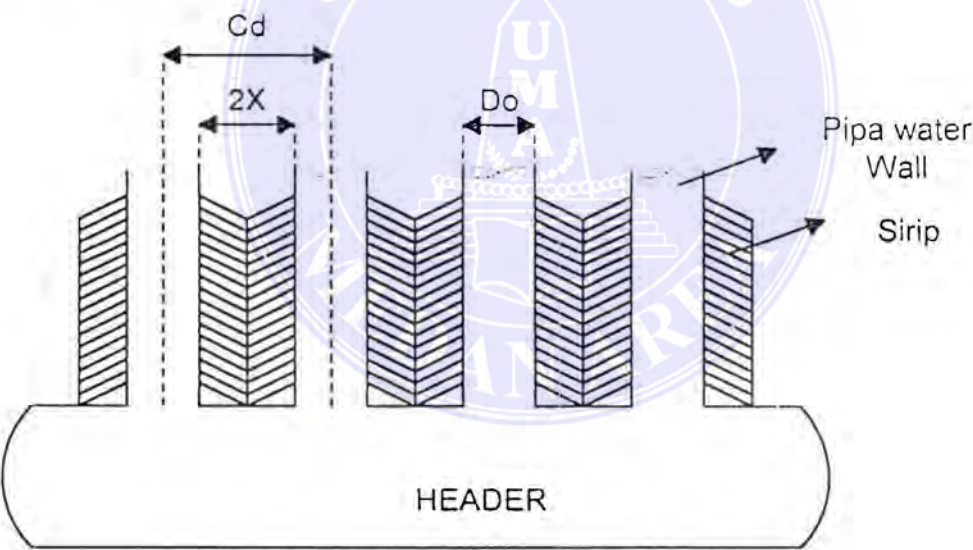
Ukuran Nominal Pipa	diameter luar	Skedul	Tebal dinding	Diameter dalam	Luas penampang logam	luas penampang dalam
in	in	no.	in	in	in	in
1/8	0.405	40	0.068	0.269	0.072	0.00040
		80	0.095	0.215	0.093	0.00025
1/4	0.540	40	0.088	0.364	0.125	0.00072
		80	0.119	0.302	0.157	0.00050
3/8	0.675	40	0.019	0.493	0.167	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	0.724	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	0.789	0.01414
		80	0.200	1.500	1.069	0.01225
		160	0.281	1.338	1.429	0.00976
2	2.375	40	0.154	2.067	1.075	0.02330
		80	0.218	1.939	1.477	0.02050
3	3.500	40	0.216	3.068	2.228	0.05130
		80	0.300	2.900	3.016	0.04587
4	4.500	40	0.237	4.026	3.173	0.08840
		80	0.337	3.826	4.407	0.79860
		120	0.258	5.047	4.304	0.13900
5	5.563	40	0.258	5.047	4.304	0.13900
		80	0.375	4.813	6.112	0.12630
		160	0.500	4.563	7.953	0.11360
6	6.625	40	0.625	4.313	9.696	0.10150
		80	0.280	6.065	5.584	0.20060
		160	0.432	5.761	8.405	0.18100
10		40	0.365	10.020	11.900	0.54750
		80	0.500	9.750	16.100	0.51850

Maka :

$$\begin{aligned} t_m &= \frac{2,375 \times 298,6}{2(12000 + 0,4 \times 298,6)} + 0,065 \\ &= 0,0942 \text{ in} \\ &2,39 \text{ mm} \end{aligned}$$

3.3.1. Pipa Water Wall bagi kiri ruang bakar (Side Wall Furnace)

Untuk menentukan jumlah pipa water wall bagian kiri harus disesuaikan dengan panjang ruang bakar, untuk memperluas penampang water wall yang akan menerima panas direncanakan pipa memakai sirip pada kedua sisinya.



Gambar 3.2. Susunan pipa-pipa water wall

Dari gambar di atas jarak antara sumbu pipa (Cd) dapat dicari yaitu

$$Cd = 2 \cdot r_o + 2 \cdot X$$

Dimana :

$$r_o = D_o/2$$

$$\frac{60,32}{2}$$

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

X = lebar sirip

$$= 15 \text{ mm (direncanakan)}$$

maka :

$$C_d = 2 \times 30,16 + 2 \times 15$$

$$= 90,32 \text{ mm}$$

Sehingga jumlah pipa water wall bagian kiri dapur (side wall furnace) dapat dihitung sebagai berikut :

$$n_s = \frac{P}{C_d}$$

dimana :

P = panjang dapur

$$= 4000 \text{ mm}$$

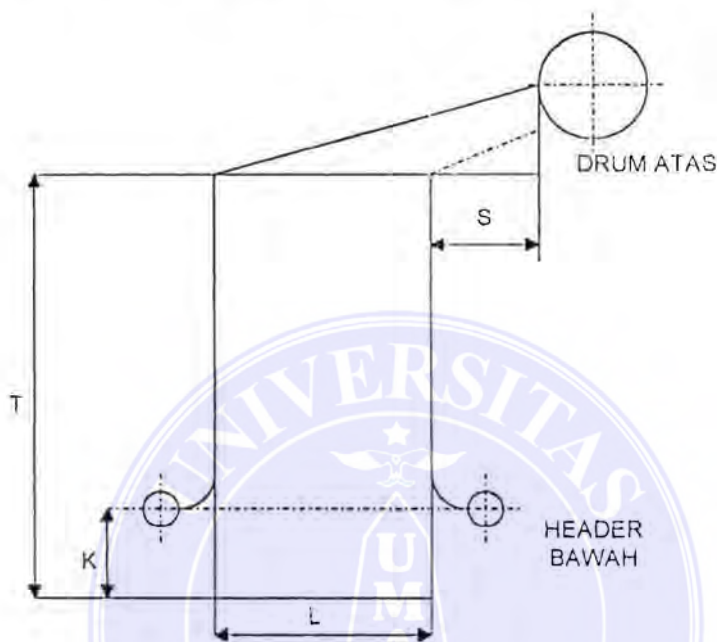
$$C_d = 90,32 \text{ mm}$$

Maka :

$$n_s = \frac{4000 \text{ mm}}{90,32 \text{ mm}}$$

$$= 44 \text{ buah pipa}$$

Untuk mencari panjang pipa bagian atas dapat dicari dengan cara pendekatan yaitu dengan cara Trigonometri. Dalam hal ini kemiringan pipa direncanakan 15°, sedangkan lebar laluan gas asap (s) direncanakan 1500 mm



Gambar 3.3. Pipa Water Wall dan Drum Atas

Sehingga panjang pipa mulai dari header sampai drum atas adalah :

$$L_s = \left[T + \frac{L + S}{\cos \alpha} \right] - K$$

Dimana :

T = tinggi ruang bakar

= 3600 mm

L = lebar ruang bakar

= 2800 mm

S = lebar laluan gas asap

$$= 1500 \text{ mm}$$

α = sudut kemiringan pembakaran pipa

$$= 15^\circ$$

K = tinggi header kiri ke lantai dapur

$$= 1500 \text{ mm}$$

maka :

$$L_s = \left[3600 + \frac{3800 + 1500}{\cos 15} \right] - 1500$$

$$= 6552 \text{ mm}$$

$$= 6,552 \text{ m}$$

Sehingga panjang keseluruhan pipa water wall adalah :

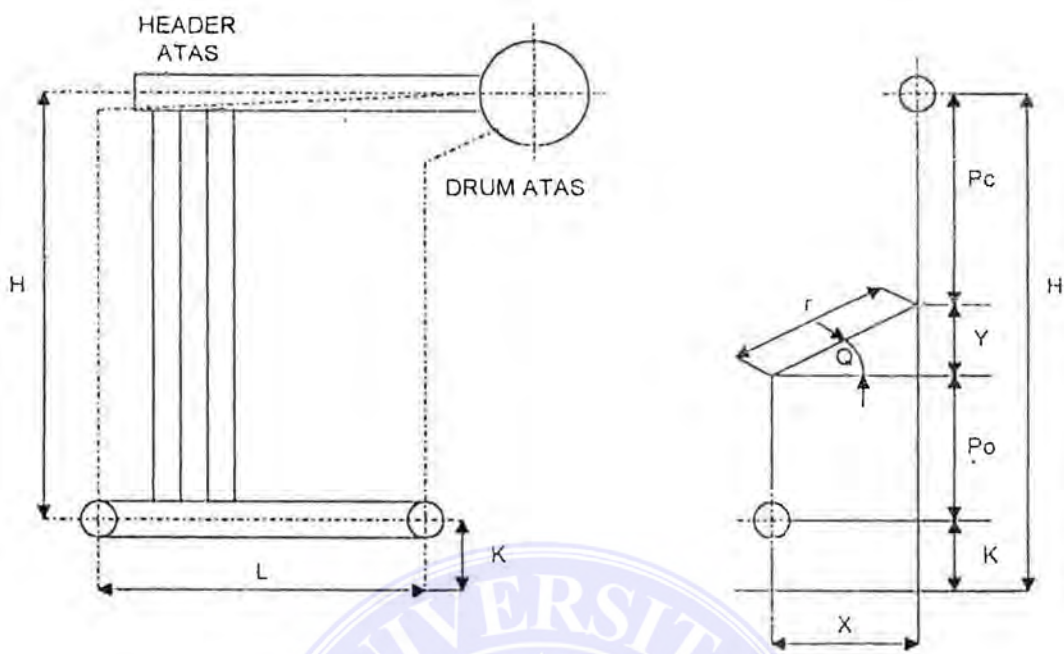
$$L_{\text{tot}} = N_s \cdot L_s$$

$$= 44 \times 6552$$

$$= 288,28 \text{ mm}$$

3.3.2. Pipa Water Wall bagian depan ruang bakar (Real Wall Furnace)

Menurut arah memanjang bagian depan ruang bakar adalah merupakan pipa-pipa yang tersusun sejajar, begitu juga pipa water wall bagian belakang seperti terlihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 3.4. Pipa Water Wall bagian Depan

Untuk menentukan jumlah pipa water wall bagian depan dan belakang sama yaitu :

$$N_r = \frac{L}{C_d}$$

Dimana :

L = lebar ruang bakar
= 2800 mm

Cd = jarak antara sumbu pipa
= 90,32

maka :

$$N_r = \frac{2800 \text{ mm}}{90,32 \text{ mm}} = 31 \text{ buah}$$

Untuk mencari pipa memanjang bagian depan adalah ;

$$L.R = Pa + r$$

Dimana :

L.R = panjang pipa bagian depan

Pa = panjang pipa dari header bawah ke pipa pembengkokan.

= 430 mm (direncanakan)

r = panjang pipa pembengkokan

$\theta = 15^\circ$

Dengan pendekatan Trigonometri didapat panjang pipa dari pembengkokan

$\theta = 15^\circ$ adalah :

$$r = \frac{X}{\cos \theta}$$

Dimana :

θ = pembengkokan pipa

= 15°

X = panjang untuk saluran gas asap

= $\frac{1}{2} P$

P = panjang dapur

= 4000 mm

jadi

X = $\frac{1}{2} \cdot 4000 \text{ mm}$

= 2000 mm

Sehingga diperoleh :

$$r = \frac{2000}{\cos 15^\circ}$$

$$= 2070,55 \text{ mm}$$

maka panjang pipa bagian depan :

$$L.R = 430 \text{ mm} + 2070,55 \text{ mm}$$

$$= 2500,55 \text{ mm}$$

Untuk mencari panjang pipa bagian belakang :

$$P.C = [H - (K + P_a + Y)]$$

$$H = \text{tinggi dari lantai dapur drum atas}$$

$$= 6580 \text{ mm}$$

$$K = \text{tinggi header dari lantai dapur}$$

$$= 1500 \text{ mm}$$

$$P_a = \text{panjang pipa dari header bawah ke pembengkokan pipa}$$

$$= 430 \text{ mm}$$

$$Y = \text{panjang pipa dari pembengkokan } \theta = 15^\circ$$

$$= \sin \theta \cdot r$$

$$= \sin 15^\circ \cdot 2070 \cdot 55 \text{ mm}$$

$$= 535,9 \text{ mm}$$

maka panjang pipa bagian belakang adalah :

$$P_c = [6580 - [1500 + 430 + 535,9]]$$

$$= 4114 \text{ mm} = 4,114 \text{ m}$$

Sehingga panjang pipa depan dan belakang adalah :

$$L_{WR} = L_R + P_c$$

Dimana :

L_R = panjang pipa bagian depan

$$= 2500,55$$

P_c = 4114 mm

Maka : $L_{WR} = 2500,55 \text{ mm} + 4114 \text{ mm}$

$$= 6614,55 \text{ mm}$$

$$= 6,61455 \text{ m}$$

Dengan demikian panjang Total pipa water wall bagian depan adalah :

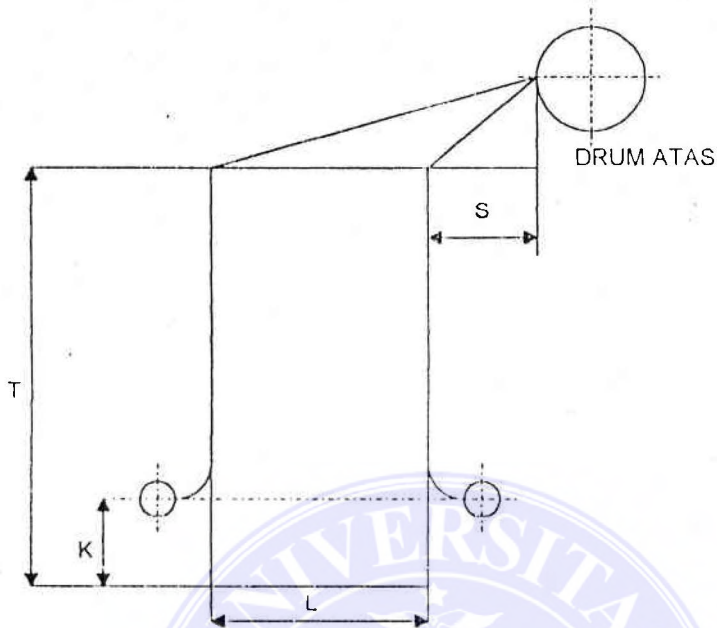
$$L_{WR \text{ Tot}} = N_r \cdot L_{WR}$$

$$= 31 \cdot 6,61455$$

$$= 205,05 \text{ m}$$

3.3.3. Pipa Water Wall Samping Kanan (Devision Wall Furnace)

Untuk menentukan jumlah pipa water wall samping kanansama caranya dengan menentukan jumlah pipawater wall samping kiri, disesuaikan dengan panjang dapur.



Gambar : 3.5. Piapa Water Wall Samping Kanan

Dengan demikian jumlah pipa water wall samping kanan adalah :

$$N_w = \frac{P}{cd}$$

Dimana :

N_w = Jumlah pipa water wall samping kanan

P = Panjang dapur

$$= 4000 \text{ mm}$$

cd = Jarak antara sumbu pipa

$$= 90,32 \text{ mm}$$

$$\text{maka : } N_w = \frac{4000 \text{ mm}}{90,32 \text{ mm}}$$

$$= 44 \text{ buah}$$

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

Document Accepted 28/12/23

Sedangkan panjang pipa water wall samping kanan adalah :

$$L_w = \left[h + \frac{s}{\cos \alpha} \right] - k$$

Dimana :

L_w = Panjang pipa water wall samping kanan

h = Tinggi dapur

= 3600 mm

s = Lebar laluan gas asap

= 1500 mm

α = Sudut kemiringan pipa

= 15°

k = Tinggi header ke lantai dasar

= 1500 mm

maka :

$$L_w = \left[3600 + \frac{1500}{\cos 15^\circ} \right] - 1500$$

= 3652,9 mm

= 3,6529 m

Sehingga panjang keseluruhan pipa water wall samping kanan adalah :

$$L_{WR \text{ Tot}} = N_w \cdot L_w$$

= 44 x 3,6529 m

= 160,72 m

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 28/12/23

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)28/12/23

3.4. Analisa Bidang Pemanas Pada Ruang Bakar

Bidang pemanas ruang bakar adalah bidang yang menerima panas dari nyala atau gas asap pembakaran pada ruang bakar yang terdiri dari pipa water wall (dinding pipa air).

Dan untuk mencari luas bidang yang menerima panas (ΔP) pada ruang bakar adalah sebagai berikut :

$$\Delta P = (\Delta SW + \Delta SSW) + (\Delta WR + \Delta SWR) + (\Delta WD + \Delta SWD)$$

Dimana :

ΔP = Luas bidang yang menerima panas (m^2)

ΔSW = Luas pipa samping kiri

$$= n_{sw} \cdot \pi \cdot d \cdot L_{sw}$$

$$= 44 \cdot \pi \cdot 0,06032 \cdot 6,552$$

$$= 54,60 \text{ m}^2$$

ΔSSW = Luas total sirip pada pipa samping kiri

$$= 2 \cdot x \cdot L_{sw} \cdot n_{sw}$$

$$= 2 \cdot 0,015 \cdot 6,552 \cdot 44$$

$$= 8,64 \text{ m}^2$$

ΔWg = Luas pipa depan dan belakang

$$= n_{WR} \cdot \pi \cdot d \cdot L_{WR}$$

$$= 31 \cdot \pi \cdot 0,06032 \cdot 6,61455$$

$$= 38,83 \text{ m}^2$$

ΔSWR = Luas total sirip pada pipa depan dn belakang

$$\begin{aligned} &= 2 \cdot \pi \cdot L_{WR} \cdot n_{WR} \\ &= 2 \cdot 0,015 \cdot 6,61455 \cdot 31 \\ &= 6,15 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

ΔWID = Luas pipa samping kanan

$$\begin{aligned} &= n_{WD} \cdot \pi \cdot d \cdot L_{WD} \\ &= 44 \cdot \pi \cdot 0,06032 \cdot 3,6529 \\ &= 30,44 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Δswd = Luas total sirip pada pipa samping kanan

$$\begin{aligned} &= 2 \cdot \pi \cdot L_{WD} \cdot n_{WD} \\ &= 2 \cdot 0,015 \cdot 3,6529 \cdot 44 \\ &= 4,82 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

maka :

$$\begin{aligned} AP &= (54,60 + 8,64) + (38,83 + 6,15) + (30,44 + 4,82) \\ &= 139,48 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Sedangkan luas bidang pemanas pada ruang ketel yang dipengaruhi oleh faktor torak (slagging faktor) dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$Ar = S \cdot \Delta A \cdot AP \cdot (\text{m}^2)$$

Dimana :

AP = Luas bidang yang menerima panas = 139,48 m²

S = Slagging faktor

= 0,9 (untuk pipa kurang bersih)

= 1,0 (untuk pipa bersih)

= 0,9 (diambil)

δA = Faktor luasan

= $\frac{1}{2} \cdot \pi$

Sehingga diperoleh :

$$Ar = 0,9 \times \frac{1}{2} \pi \times 139,48 \text{ m}^2$$

$$= 197,08 \text{ m}^2$$

3.5. Analisa Temperature pada Pipa Water Wall

Analisa temperatur pada pipa water wall dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\frac{cp \cdot \Delta T_x}{hfg \cdot Pr} = Csf \left[\frac{Q_{sat/r}}{\mu \cdot hfg} \sqrt{\frac{g \cdot \sigma}{g \cdot (\rho^l - \rho^v)}} \right]^{0,33}$$

dimana :

cp = panas jenis air ($\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$)

ΔT_x = Beda suhu water wall dengan suhu uap satu rasi ($^{\circ}\text{C}$)

= $(T_w - T_{sat})$

hfg = Entalpy penguapan (J/kg)

Pr = Angka prandal zat cair jenuh

$Q_{sat/Ar}$ = fluks kalor persatuan luas (W/m^2)

- μ = viskositas zat cair (kg/ms)
- σ -- Tegangan permukaan maka batas zat cair uap (N/m)
- g -- percepatan grafitasi (m/s^2)
- ρ^l -- Densitas uap jenuh (kg/m^3)
- ρ_v -- Densitas uap jenuh (kg/m^3)
- Csf -- Konstanta, ditentukan dari data eksperimen
- S -- 1,0 untuk air dan 1,7 untuk zat cair lain
- Q_{sat} -- panas untuk membentuk uap satu rasi (watt)

Dari tabel sifat-sifat air pada temperatur 2148 C diperoleh :

- ρ^l = 954,65 kg/m^3
- c_p = 4,217 kJ/kg^0C
- μ = $2,66 \times 10^{-4} kg/m.s$
- pr = 1,62

Tabel 3.3 Tegangan permukaan uap zat cair untuk air

Suhu Jenuh		Tegangan Permukaan	
0F	0C	$\sigma \times 10^{-4}$ lb _f /ft	σ mN/m
32	0	51.8	75.6
60	15.56	50.2	73.3
100	37.78	47.8	69.8
140	60	45.2	66.0
200	93.33	41.2	60.1
212	100	40.3	58.8
320	160	31.6	46.1
440	226.67	21.9	32.0
560	293.33	11.1	16.2
680	360	1.0	1.46
705.4	374.1	0	0

Tabel 3.4. Nilai Koefisien Csf untuk berbagai gabungan fluida-permukaan

Gabungan fluida permukaan pemanas	Csf
Air-Tembaga (11)	0,013
Air-Platina (12)	0,013
Air-Kuningan (13)	0,006
Air-Tembaga Diupam Amril (29)	0,0128
Air-Baja Tahan Karat Digerenda Dan Diupam (29)	0,0080
Air-Baja Tahan Karat Diatas Kimia (29)	0,0133
Air-Baja Tahan Karat Diupam Mekanis (29)	0,0132
Air-Tembaga Dipam Amril Dan Diolah Parafin (29)	0,0147
Air-Tembaga Diskor (29)	0,0068
Air-Baja Tahan Karat Pakai Teflon (29)	0,0058
Karbon Tetraklorida-Tembaga (11)	0,013
Karbon Tetraklorida-Tembaga Diupam Amril (29)	0,007
Benzana –Krom (14)	0,010
N-Butil Alkohol-Tembaga (11)	0,00305
Etil alkohol-krom (14)	0,027
Isoprofil alkohol-tembaga (11)	0,00225
n-Pentana-krom (14)	0,015
n-Pentana-nikel diupam amril (29)	0,0154
n-Pentana-tembaga diupam lap (29)	0,0127
n-Pentana-tembaga digosok amril (29)	0,0049
35% K ₂ CO ₃ -tembaga (11)	0,0074
50% K ₂ CO ₃ -tembaga (11)	0,0054
	0,0027

Sifat-sifat uap saturasi pada temperatur 214,85 °C dan tekanan 21 kg/cm², maka

$$h_{fg} = 1877,6 \text{ kJ/kg}$$

$$p_v = 12,073$$

$$\sigma = 33,06 \text{ N/m}$$

$$C_{sf} = 0,0133$$

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 28/12/23

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)28/12/23

Besar panas yang dibutuhkan untuk pembentukan uap saturasi adalah :

$$Q_{sat} = \mu \cdot (h_{sat} - h_a)$$

Dimana :

μ = massa uap

$$= 10000 \text{ kg.uap / jam}$$

h_{sat} = entalpi uap saturasi pada tekanan 21 kg/cm² dan temperatur 214,85 693,8 kkal/kg.

h_a = entalpy air pengisi ketel pada temperatur 105°C

$$= 105,5 \text{ kkal/kg}$$

maka :

$$Q_{sat} = 10000 (693,8 - 105,5)$$

$$= 5883000 \text{ kkal/jam}$$

$$= 6843819,05 \text{ watt}$$

sehingga :

$$Q_{sat} = \frac{68438191,05}{306,97}$$

$$= 2294,75 \text{ watt/m}^2.$$

Maka :

$$\frac{4217 \cdot \Delta T_x}{18776000 \cdot 1,62} = 0,0133 \left(\frac{2294,75}{2,66 \times 10^{-4} \cdot 18776000} \sqrt{\frac{9,81(33,06 \times 10^{-3})}{9,81(954,65 - 12,073)}} \right)^{0,33}$$

$$\Delta T_x = 7,8^\circ\text{C}$$

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 28/12/23

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)28/12/23

Jadi temperatur dinding dalam pipa water wall (T_w) adalah

$$\begin{aligned} T_w &= \Delta T_x + T_{sal} \\ &= (7,8 + 214,85) ^\circ\text{C} \\ &= 222,66 ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

3.6. Analisa Panas yang diserap Pipa Water Wall

Untuk mengetahui beberapa panas yang diserap oleh pipa water wall dalam menghasilkan uap saturasi kita harus mengetahui bagaimana sistem perpindahan panas yang terjadi terhadap pipa-pipa tersebut.

Dalam perpindahan panas yang terjadi dari pembakaran bahan bakar terhadap bidang pemanas di dalam ruang bakar (dapur) terjadi secara radiasi, konveksi, dan konduksi, gabungan dari ketiga sistem tersebut disebut "Complex Heat Exchanger" sehingga perpindahan panas yang terjadi dapat dicari dengan persamaan berikut :

$$\frac{Q_w}{A_r} = \frac{\lambda_{eff}}{\delta} (T_P - T_w) \quad \dots\dots\dots$$

Dimana :

$$\frac{Q_w}{A_r} = \text{complex heat exchanger (kkal/m}^2\text{.jam)}$$

$$\lambda_{eff} = \text{konduktifitas efektif (l kal/}^\circ\text{C.jam)}$$

$$T_P = \text{temperatur pembakaran (}^\circ\text{C)}$$

$$T_w = \text{temperatur water wall (}^\circ\text{C)}$$

$$\delta = \text{diameter ekuivalen lapisan gas asap yang memenuhi ruang bakar (m)}$$

- Konduktivitas efektif (λ_{eff})

$$\lambda_{\text{eff}} = \epsilon \epsilon_c \cdot \lambda + \alpha r \cdot \delta$$

- Emisivitas konveksi ($\epsilon \epsilon_c$)

$$\epsilon \epsilon_c = 0,81 (Gr \cdot Pr)^{0,25}$$

- Angka Grashof (Gr)

$$Gr = \frac{\beta \cdot G \cdot \delta^3 \cdot \Delta T}{\nu^2}$$

- Koefisien ekspansi volume (β)

$$\beta = \frac{1}{t_m}$$

- Diameter ekivalen lapisan gas asap yang memenuhi ruang bakar (δ)

$$\delta = \frac{2}{3} \sqrt[3]{V_s} \text{ (m)}$$

- Koefisien radiasi (αr)

$$\alpha r = 0,04 \cdot E \cdot Bo \left[\frac{T_m}{100} \right]^4$$

- Temperatur rata-rata sekeliling ruang bakar (T_m)

$$T_m = \frac{T_p - T_w}{2}$$

- Besarnya temperatur pembakaran dapat dicari dalam persamaan berikut :

$$T_p = \frac{LHV \cdot \eta_f}{V_g \cdot C_p} + 273 \text{ (}^\circ\text{K)}$$

Dimana :

LHV – nilai kalor bawah

$$= 4332,04 \text{ kkal/kg}$$

* Ir. Syamsir A Muin "Pesawat-Pesawat Konversi Energi I (Ketel Uap)" hal 89.

** Ibid, hal 91

*** Kent's "Mechanical Engineering hand book Power" hal 891.

**** Ir. Syamsir A Muin "Pesawat-Pesawat Konversi Energi I (Ketel Uap)" hal 92

$$\eta_f = \text{efisiensi dapur}$$

$$= 0,90 - 0,97 = 0,95 \text{ diambil}$$

$$V_g = \text{volume gas asap}$$

$$= 8,79 \text{ m}^3/\text{kg.bb}$$

$$C_p = \text{panas jenis gas asap (kkal/m}^3\text{ }^\circ\text{C)}$$

Dalam menentukan panas jenis gas asap perlu diketahui besarnya temperatur nyala (T_f) maka :

$$T_f = 100 \left(\frac{Q_f}{\epsilon_f \cdot \epsilon_r \cdot A_r \cdot B_o} + \frac{T_r}{100} \right)^{1/4}$$

Dimana :

$$Q_f = \text{kalor pembakaran}$$

$$= 7178411,3 \text{ kkal/jam}$$

$$\epsilon_f = \text{emisivitas nyala}$$

$$= 0,7 \text{ (untuk nyala bersinar dengan bahan terbang yang banyak, dan terbakar dalam bongkah atau serbuk.)}$$

$$\epsilon_r = \text{emisivitas radiasi}$$

$$= 0,90$$

$$A_r = \text{luas penampang pemans radiasi}$$

$$= 197,08 \text{ m}^2$$

$$B_o = \text{konstanta Boltzman}$$

$$= 4,95 \text{ kkal/m}^2 \cdot \text{jam } ^\circ\text{K}$$

T_r = temperatur permukaan yang mengalami radiasi

$$= (T_{\text{su}} + 30) + 273$$

$$= (214,85 + 30) + 273$$

$$= 517,85 \text{ } ^\circ\text{K}$$

maka :

$$T_r = 100 \left[\frac{7178411,3}{(0,7 \cdot 0,9 \cdot 1977,08 \cdot 4,95)} + \left(\frac{517,85}{1000} \right)^4 \right]^{1/4}$$

$$= 1055,23 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$= 1056 \text{ } ^\circ\text{K}$$

Karena gas asap terdiri dari CO_2 , N_2 , O_2 dan SO_2 , maka diperoleh panas jenis gas asap pada temperatur 1055 $^\circ\text{K}$ adalah : 1056 $^\circ\text{K} = 783 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$C_p = \frac{0,511 + 0,326 + 0,0346 + 0,521}{4}$$

$$= 0,426 \text{ kkal/m}^3\text{ } ^\circ\text{C}$$

sehingga :

$$T_P = \frac{4322,04 \cdot 0,95}{8,79 \cdot 0,426} + 273 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$= 1369,52 \text{ } ^\circ\text{K}$$

maka :

$$T_m = \frac{T_p - T_w}{2} \quad \text{Dimana } T_w = 214,85 \text{ } ^\circ\text{C} = 487,85 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$= \frac{1369,52 - 487,85 \text{ } ^\circ\text{K}}{2} = 440 \text{ } ^\circ\text{K}$$

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

Document Accepted 28/12/23

Access From (repository.uma.ac.id)28/12/23

$$\begin{aligned}\beta &= \frac{1}{tm} \\ &= \frac{1}{440} \\ &= 2,273 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{K}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta &= 2/3 \cdot \sqrt[3]{Vf} \\ &= 2/3 \cdot \sqrt[3]{40,32} \\ &= 2,29 \text{ m}\end{aligned}$$

Untuk perbedaan temperatur (ΔT)

$$\begin{aligned}\Delta T &= T_p - T_w \\ &= 1369,52 - 487,85 \\ &= 881,67 \text{ } ^\circ\text{K}\end{aligned}$$

Maka dari tabel udara pada temperatur 881,67 °K adalah :

$$\begin{aligned}V &= \text{viscositas kinematikan udara} \\ &= 96,222 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{det}\end{aligned}$$

$$Pr = 0,694$$

$$g = 9,81 \text{ m/det}^2$$

Maka diperoleh :

$$\begin{aligned}Gr &= \frac{\beta \cdot g \cdot \delta^3 \cdot \Delta T}{V^2} \\ &= \frac{(2,273 \times 10^{-3}) \cdot (9,81) \cdot (2,29)^3 \cdot (881,67)}{(96,222 \times 10^{-6})^2}\end{aligned}$$

Emisitas konveksi

$$\begin{aligned}\epsilon_c &= 0,81 (Gr \cdot Pr)^{0,25} \\ &= 0,81 [(2,54 \times 10^{10}) \cdot (0,694)]^{0,25} \\ &= 295,11\end{aligned}$$

untuk :

λ = faktor konduktivitas panas

$$= 4,9 \times 10^{-2} \text{ kkal/m.jam}^\circ\text{K}$$

ϵ = emisitas nyala api = $0,87 \div 0,95$

$$= \text{diambil } 0,90$$

B_o = konstanta Boltzman

$$= 4,95 \text{ kkal/m}^2\text{jam}^\circ\text{K}$$

maka :

$$\begin{aligned}\alpha_r &= 0,04 \cdot \epsilon \cdot B_o \left(\frac{T_m}{100} \right)^3 \\ &= 0,04 \cdot 0,90 \cdot 4,95 \cdot \left(\frac{440}{100} \right)^3 \\ &= 15,18 \text{ kkal/m.jam}^\circ\text{K}\end{aligned}$$

Sehingga diperoleh :

$$\begin{aligned}\lambda_{eff} &= \epsilon_c \cdot \lambda + \alpha_r \cdot \delta \\ &= 295,11 (4,9 \times 10^{-2}) + 15,18 \cdot 2,29 \\ &= 49,22 \text{ kkal/m.jam}^\circ\text{K}\end{aligned}$$

Dengan demikian perpindahan panas yang terjadi diruang bakar adalah :

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

Document Accepted 28/12/23

Access From (repository.uma.ac.id)28/12/23

- Emisitas konveksi

$$\begin{aligned} \epsilon_c &= 0,81 (Gr \cdot Pr)^{0,25} \\ &= 0,81 [(2,54 \times 10^{10}) \cdot (0,694)]^{0,25} \\ &= 295,11 \end{aligned}$$

untuk :

λ = faktor konduktivitas panas

$$= 4,9 \times 10^{-2} \text{ kkal/m.jam}^\circ\text{K}$$

ϵ = emisitas nyala api = $0,87 \div 0,95$

$$= \text{diambil } 0,90$$

Bo = konstanta Boltzman

$$= 4,95 \text{ kkal/m}^2\text{jam}^\circ\text{K}$$

maka :

$$\begin{aligned} \alpha_r &= 0,04 \cdot \epsilon \cdot Bo \left(\frac{T_m}{100} \right)^3 \\ &= 0,04 \cdot 0,90 \cdot 4,95 \cdot \left(\frac{440}{100} \right)^3 \\ &= 15,18 \text{ kkal/m.jam}^\circ\text{K} \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh :

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{eff}} &= \epsilon_c \cdot \lambda + \alpha_r \cdot \delta \\ &= 295,11 (4,9 \times 10^{-2}) + 15,18 \cdot 2,29 \\ &= 49,22 \text{ kkal/m.jam}^\circ\text{K} \end{aligned}$$

Dengan demikian perpindahan panas yang terjadi di ruang bakar adalah :

$$\begin{aligned} \text{maka } \frac{Q_w}{A_r} &= \frac{49,22}{2,29} (1369,52 - 487,85^\circ\text{K}) \\ &= 18947,08 \text{ kkal/m}^2\cdot\text{jam.} \end{aligned}$$

Jadi besar panas yang diserap bidang pemanas (water wall) adalah :

$$\begin{aligned} Q_w &= A_r \times 18957,08 \\ &= 197,08 \times 18947,08 \\ &= 3734092,16 \text{ kkal/jam} \end{aligned}$$

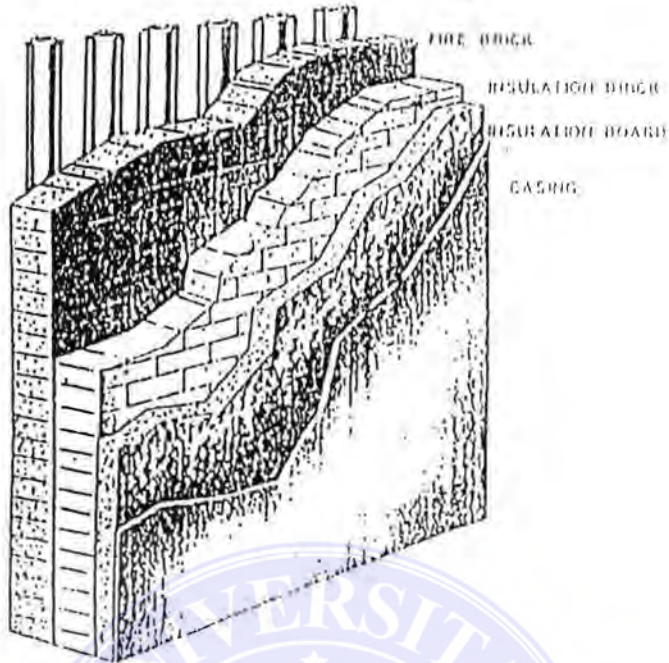
3.6. Isolasi Pada Dinding Ruang Bakar

Untuk menghindari terjadinya kehilangan panas yang besar melalui dinding dapur ke udara luar, maka dinding dapur tersebut perlu diisolasi. Sehingga kehilangan panas dapat ditekan sekecil mungkin.

Karena pada dapur temperaturnya sangat tinggi maka isolasi yang dibutuhkan mempunyai konduktivitas yang rendah dan tahan terhadap panas yang tinggi.

Maka direncanakan isolasi yang digunakan adalah :

1. Fire Brick (Batu Tahan Api)
 $X_1 = 9 \text{ inchi} = 228,6 \text{ mm}$
2. Insulating Brick (Batu Penyekat)
 $X_2 = 4,5 \text{ inchi} = 114,3 \text{ mm}$
3. Insulating Board (Glass Wall)
 $X_3 = 4,5 \text{ inchi} = 114,3 \text{ mm}$
4. Cosing Plate (Plat Aluminium)
 $X_4 = 1/8 \text{ inchi} = 3,175 \text{ mm}$



Gambar 3.6 Isolasi dinding dapur

Konduktivitas bahan isolasi adalah :

- Fire Brick (Batu Tahan Api)
 $k_1 = 1,04 \text{ w/m } ^\circ\text{C}$
- Insulating Brick (Batu Penyekat)
 $k_2 = 0,69 \text{ w/m } ^\circ\text{C}$
- Insulating Board
 $k_3 = 0,038 \text{ w/m } ^\circ\text{C}$
- Casing Plate (Plat Aluminium)
 $k_4 = 204 \text{ w/m } ^\circ\text{C}$

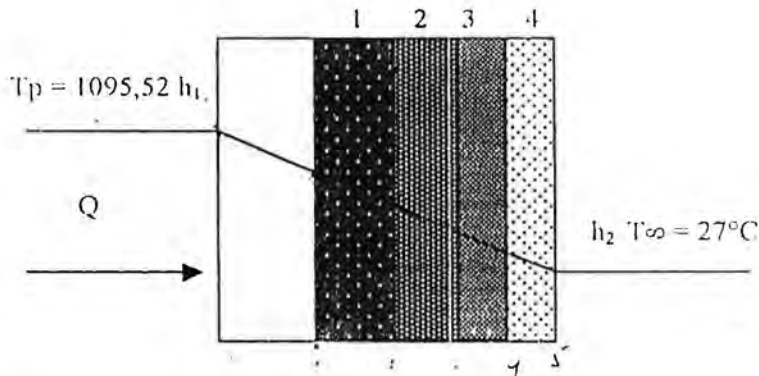
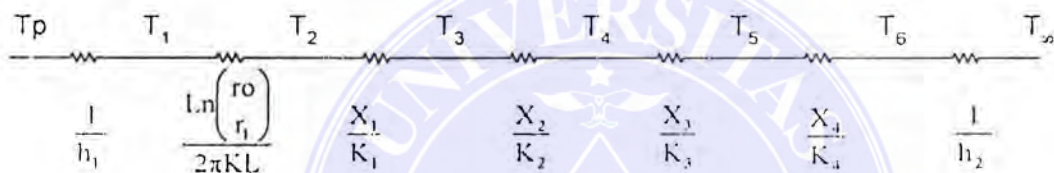


Diagram Tahanan :



Panas yang mengalir melalui dinding isolasi ruang bakar adalah :

$$Q = \frac{T_p - T_\infty}{\frac{1}{h_1 \cdot A} + \ln \left[\frac{r_o}{r_i} \right] \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} + \frac{X_1}{k_1 \cdot A} + \frac{X_2}{k_2 \cdot A} + \frac{X_3}{k_3 \cdot A} + \frac{X_4}{k_4 \cdot A} + \frac{1}{h_2 \cdot A}}$$

atau :

$$Q_{iso} = U \cdot A_{iso} \cdot \Delta T$$

Dimana :

A = Luas permukaan yang diisolasi

$$= 2 (P \cdot h) + 2 (L \cdot h) + (P \cdot L) + (P \cdot \Delta h) + 2 (\frac{1}{2} \cdot L \cdot \Delta h)$$

Dimana :

P = Panjang ruang bakar

$$= 4 \text{ mm}$$

L = Lebar ruang bakar

$$= 2,8 \text{ m}$$

h = Tinggi ruang bakar

$$= 3,60 \text{ m}$$

Δh = Selisih tinggi

$$= 0,75 \text{ m}$$

Maka :

$$\begin{aligned} A &= 2 (4,0 \cdot 3,60) + 2 (2,8 \cdot 3,60) + (4,0 \cdot 2,8) + (4,0 \cdot 0,75) + 2 \left(\frac{1}{2} \cdot 2,8 \cdot 0,75 \right) \\ &= 28,8 + 20,18 + 11,2 + 3 + 2,1 \\ &= 65,28 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Sedangkan :

Koefisien perpindahan panas menyeluruh (U)

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \ln \left[\frac{r_0}{r_1} \right] + \frac{X_1}{k_1} + \frac{X_2}{k_2} + \frac{X_3}{k_3} + \frac{X_4}{k_4} + \frac{1}{h_2}$$

Dimana Koefisien perpindahan panas dalam ruang bakar :

$$h_1 = \frac{k}{d} \cdot Nu$$

Dari temperatur rata-rata sekitar ruang bakar :

$$\begin{aligned} T_T &= \frac{T_p + T_{SAT}}{2} \\ &= \frac{1096,52 + 214,8}{2} \\ &= 655,68 ^\circ\text{C} \\ &= 928,68 ^\circ\text{K} \end{aligned}$$

Untuk mencari rapat jenis (ρ) gas asap pada temperatur 1,2 atmosfer diperoleh :

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T}$$

Dimana :

P = tekanan

R = konstanta gas

T = temperatur lingkungan

$$= 27^\circ\text{C} (300^\circ\text{K})$$

$$1 \text{ atm} = 1,0132 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$$

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{10132 \times 10^5 \times 1,2 \text{ atm}}{(277) (300)} \\ &= 14,63 \text{ kg/cm}^3. \end{aligned}$$

Dari temperatur rata-rata sekitar ruang bakar pada temperatur 928,68 °K yaitu :

$$Pr = 0,6977$$

$$K = 0,0642 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\mu = 3,97 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$$

UNIVERSITAS MEDAN AREA

Jadi bilangan Reynold adalah :

$$\begin{aligned} Re &= \frac{\rho \cdot V \cdot d}{\mu} \\ &= \frac{14,63 \cdot (10) \cdot (0,0525)}{3,97 \times 10^{-5}} \\ &= 193469,77 \end{aligned}$$

Dari jenis aliran diluar pipa diperoleh angka Nusselt :

$$Nu = C \cdot Re^n \cdot Pr^{1/3}$$

Dari tabel daftar konstanta C dan n diperoleh

Re	C	n
0,4 – 4	0,989	0,330
4 – 40	0,911	0,385
40 – 4000	0,683	0,466
4000 – 40000	0,193	0,618
40000 – 400000	0,0266	0,805

Maka :

$$\begin{aligned} Nu &= 0,0266 \cdot (194527,70)^{0,805} \cdot (0,6977)^{1/3} \\ &= 426,97 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} h_1 &= \frac{K}{d} \cdot Nu \\ &= \frac{0,0642}{0,0525} \cdot 426,97 \\ &= 552,12 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Koefisien perpindahan panas diluar ruang bakar

$$h_2 = \frac{k}{X} \cdot (0,17) (Gr \cdot Pr)^{1/3}$$

Sifat-sifat udara pada temperatur 27°C (300°K) adalah :

$$V = 15,69 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{S}$$

$$K = 0,0262 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$pr = 0,708$$

Dimana :

$$Gr = 5,95 \times 10^{10}$$

Maka :

$$\begin{aligned} h_2 &= \frac{0,02624}{0,52} (0,17) [(5,95 \times 10^{10} \cdot 0,708)]^{1/4} \\ &= 3,88 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Sehingga :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{552,12} + \frac{\ln\left[\frac{0,03016}{0,02625}\right]}{2\pi(0,02624)(2,81)} + \frac{0,2286}{1,04} + \frac{0,1143}{0,69} + \frac{0,1143}{0,03} + \frac{0,003175}{204} + \frac{1}{3,89}}$$

$$= 0,224 \text{ W/m}^2\text{C}$$

maka :

$$\begin{aligned} Q_{\text{iso}} &= U \cdot A \cdot \Delta T \\ &= (0,224) \cdot (65,28) \cdot (1096,52 - 27) \\ &= 15639,29 \text{ watt} \\ &= 13448,22 \text{ kkal/jam} \end{aligned}$$

Jadi persentase kehilangan panas dari isolasi ruang bakar Q (losses) adalah :

$$\begin{aligned} Q_{\text{loss}} &= \frac{Q_{\text{iso}}}{Q_f - Q_{\text{iso}}} \times 100 \% \\ &= \frac{13448,22}{7178411,1 - 13448,22} \times 100 \% \\ &= 0,18 \% \end{aligned}$$

Faktor kehilangan panas pada isolasi dinding ruang bakar sangat kecil sekali tidak sampai 1 %.

BAB V

KESIMPULAN

Dari Rencana yang telah didapat maka disimpulkan sebagai berikut :

1. Ketel Uap

- Jenis : Ketel Uap Pipa Air
- Kapasitas : 10.000 Uap/ Jam
- Tekanan Kerja : 21 kg/ cm²
- Temperatur saturasi : 214, 85⁰ C

2. Bahan Bakar

- Jenis : Cangkang Dan Sarabut
- Nilai Kalor Bawah (LHV) : 1 ÷ 3
- Nilai Kalor Atas (HHV) : 4628, 99 Kkal/ kg. Bb
- Konsumsi : 1748, 30 Kg bb/ jam

3. Ukuran Ruang Bakar

- Panjang : 4. 0 m
- Lebar : 2,8 m
- Tinggi : 3,6 m
- Bentuk : Persegi Panjang

Temperatur Pembakaran : 1096,52⁰ C

UNIVERSITAS MEDAN AREA

4. Ukuran Pipa Water Wall

- Bahan : Seamless Carbon Steel A 53
- Diameter luar (Do) : 2.375 in
- Diameter dalam (Di) : 2,067 in
- Tebal (t) : 0,154 in
- Diameter nominal pipa (D_n) : 2 in

5. Jumlah Pipa Water Wall

- Bagian Depan : 31 buah
- Bagian kiri : 44 buah
- Bagian kanan : 44 buah
- Jumlah : 119 buah

6. Panjang Setiap Pipa Water Wall

- Bagian Depan / Belakang : 4,114 m
- Bagian Kiri : 6,552 m
- Bagian Kanan : 3,6529 m

7. Tebal Isolasi Ruang Bakar

- Fire Brick : 9,0 in
- Insulating BRKK : 4,5 in
- Insulating Board : 4,5 in
- Plat Alumunium : 1/8 in

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 28/12/23

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

8. Daya Guna Flue Gas

- Panas untuk saturasi : 68883000 Kkal/ jam
- Panas untuk super Heater : 157000 Kkal/ jam
- Panas untuk air Heater : 1550,33 Kkal/ jam



LITERATUR

1. Benhart G. A. Skrotzki and William A. Vapor, "Power Station Engineering and Economy", Tata Mc. Graw Hill Publishing Company Ltd, New Delhi, 1979.
2. Charles T. Littleton, "Industrial Piping", 2nd edition, Mc. Graw Hill Book Company, New York.
3. Dr. Ir. Filino Harahap, Msc, "Thermodinamika Teknik", edisi kedua, penerbit Erlangga, Jakarta, 1993.
4. F.T. Morse. Me, EE, "Power Engineering", Abiated East West Press, New Delhi, 1974.
5. Ir. ESM. Tambun, Fajar H. Karo-karo, Be, "Ketel Uap", Cetakan Pertama, Penerbit Karya Agung, Jakarta, 1993.
6. Ir. M. J. Djokostyardjo, "Ketel Uap", Cetakan Kedua, Penerbit Pt. Pradya Paramitha, Jakarta 1989.
7. Ir. Syamsir A. Muin, "Pesawat-pesawat Konversi Energi I", Edisi Pertama, Penerbit CV. Rajawali, Jakarta 1988.
8. J.P Holman, E. Jasjfi, "Perpindahan Kalor", Edisi keenam, Penerbit Erlangga, Jakarta 1993.
9. Kents, "Mechanical Engineering Hand Book Power", 12th, Edition, New York USA, 1977.

LAMPIRAN 1

Tabel Konversi Satuan

SATUAN PANJANG	SATUAN BERAT
1 mil = 1760 yards = 5280 feet = 1.609 km	1 US Long ton = 2240 lbs = 1016 kg 1 US Short ton = 2000 lbs = 907 kg
1 yard = 3 feed = 0,914 meter	1 Pound (lb) = 16 ounces = 7000 grains = 0,454 kg
1 foot = 12 inches = 308,4 mm	1 ounce (oz) = 0,0625 pound = 28,35 gr
1 inch = 25,4 mm	1 grain = 64,8 m . gr = 0,023 ounce
100 ft/min = 0,508 m/det	1 lb/ft = 1,488 kg/m
1 km = 1000 m = 0,621	1 metrik ton = 1000 kg = 0,984 long ton = 2205 lbs
1 meter = 1000 mm = 1,094 yard = 3,281 feet = 39,37 inches	1 kilogram = 1000 gr = 2,205 pound
1 mikron = 0,001 mm = 0,000039 inch	1 gram = 1000 m. gram = 0,03527 ounce = 15,43 grains
1 m/det = 196,9 ft/min	1 kg/m = 0,672 lbs/f
SATUAN LUAS :	SATUAN VOLUME :
1 mil . 2 = 640 Acres = 259 Hektar	1 cu . yard = 27 cu . feet = 0,765 m ³
1 Acre = 4840 sq . yardd = 0,4047 Hektar	1 cu . foot = 1728 cu . inches = 28,32 liter
1 sq. yard = 9 sq . feet = 0,836 m ²	1 cu . inch = 16,39 mm ³
1 sq. foot = 144 sq . inches = 0,0929 m ²	1 Imp.gallon = 277,4 cu. Inches = 4,55 liter
1 km ² = 100 Hektar = 0,3861 Sq . mile	1 US Gallon = 0,833 Imp.gallon = 3,785 liter
1 Hektar = 10.000 m ² = 2,471 Acres	= 231 cu.inches
1 m ² = 1.000.000 mm ² = 1,196 sq . yards = 10,76 sq . feet	

LAMPIRAN 2

SATUAN VOLUME :

1 US Barrel	= 42 US . gallon
	= 35 Imp . gallons
1 m ³	= 1000 liter
	= 1,308 cu . yards
	= 25,31 cu . feet
1 liter	= 1.000.000 cc
	= 0,22 Imp . gallon
	= 0,2642 US gallon
	= 61,0 cu . Inches
1 cu . ft/min	= 1,699 m ³ /jam
1 m ³ /jam	= 0,589 cu.ft/min

KERAPATAN

1 cu.ft/lb	= 0,0624 m ³ /kg
1 lb/cu.ft	= 16,02 kg/m ³
1 m ³ /kg	= 16,02 cu.ft/lb
1 kg/m ³	= 0,0624 lb/cu.ft
1 g/m ³	= 0,437 grain/cu.ft
	= 0,0584 grain per 1US gallon
1 g/liter	= 58,4 grain per 1 US gallon

SATUAN TEKANAN :

1 atm standar	= 101,325 pascal
	= 760 mm.Hg
	= 14,696 p.s.i
	= 1.033 kg/cm ²
	= 1031 milibar
1 atm metrik	= 98,066,5 pascal
	= 1 kg/cm ²
	= 10 m.kolom air
	= 14,22 p.s.i
1 bar	= 100.000 pascal
	= 1000 milibar
	= 750,1 mm . Hg
	= 1,02 kg/cm ²
	= 14,50 p.s.i

SATUAN TEKANAN :

1 lb/ft. ²	= 47,88 pascal
	= 4,88 kg/m ²
1 p.s.i	= 6894 pascal
	= 2,036 inch . Hg
	= 0,0703 kg/cm ²
	= 0,690 bar
1 m kolom air	= 9806 pascal
	= 0,1 kg/cm ²
1 m . Hg	= 133,3 kilopascal
	= 1,360 kg/cm ²
	= 1,33 milibar
1 kg/cm ²	= 98,066 kilopascal
	= 735,5 mm . Hg
	= 0,981 bar
	= 14,22 p.s.i

SATUAN PANAS DAN ENERGI :

1 B.T.U.	= 778 ft.lbs
	= 107,6 kg.m
	= 0,252 Kkal
1 BTU/lb	= 0,556 Kkal/kg
1 BTU/cu.ft	= 8,9 Kkal/m ³
1 BTU/hr.sq.ft.F/ft	= 1,488 kkal/j.m ² °C/m
1 kilokalori	= 3088 ft.lbs
	= 427 kg.m
	= 3,968 BTU
	= 4,187 K.J
1 kilojoule	= 0,2388 kkal
	= 0,948 BTU
1 KW	= 738 ft.lbs/sec
	= 102 kg.m/det
	= 1,341 IIP
	= 1,36 DK (metrik)