

ANALISIS PERPINDAHAN PANAS PADA DINDING RUANG BAKAR KETEL UAP DENGAN KAPASITAS 45 TON/JAM

SKRIPSI

DISUSUN OLEH :

**MUHAMMAD ISWANDA
15.813.0003**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2021**

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 17/12/21

Access From (repository.uma.ac.id)17/12/21

**ANALISIS PERPINDAHAN PANAS PADA DINDING RUANG
BAKAR KETEL UAP DENGAN KAPASITAS 45 TON/JAM**

SKRIPSI

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar Sarjana
di Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik

Universitas Medan Area



Disusun Oleh :

**MUHAMMAD ISWANDA
NPM : 158130003**

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

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

2021

HALAMAN PENGESAHAN UJIAN SKRIPSI

Judul Skripsi : Analisis Perpindahan Panas Pada Dinding Ruang Bakar Ketel Uap Dengan Kapasitas 45ton/jam
Nama Mahasiswa : Muhammad Iswanda
NPM : 15 813 0003
Program Studi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik



HALAMAN PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Muhammad Iswanda

NPM : 158130003

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Skripsi : Analisis Perpindahan Panas Pada Dinding Ruang Bakar Ketel
Uap Dengan Kapasitas 45 ton/jam

Menyatakan bahwa skripsi ini saya buat untuk memperoleh gelar sarjana dan benar – benar merupakan hasil karya saya sendiri, adapun bagian-bagian tertentu dalam tulisan ini yang saya kutip dan menjadi refrensi telah dituliskan namanya secara jelas.

Saya bersedia menerima sanksi jika dikemudian hari terbukti merupakan duplikat, tiruan, plagiat atau dibuat oleh orang lain secara keseluruhan atau sebagian besar, maka skripsi ini dan gelar yang diperoleh karenanya batal demi hukum.

Medan, 2021



Muhammad Iswanda
NPM 158130003

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR/SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai mahasiswa akademis Universitas Medan Area saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Muhammad Iswanda

NPM : 158130003

Program Studi : Teknik Mesin

Jenis Karya : Tugas Akhir/ Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Medan Area **Hak Bebas Royalti Noneklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul : **Rancang Bangun Alat Pres Biopellet**. Beserta perangkat yang sudah ada (jika diperlukan) dengan hak bebas royalti noneklusif ini Universitas Medan Area berhak untuk menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir/skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik hak cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Medan, 2021



Muhammad Iswanda

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Medan pada tanggal 07 Oktober 1997, dari Ayah bernama Jumadi dan Ibu Rohanna. Penulis merupakan anak ke 2 dari 2 bersaudara. Penulis menyelesaikan Pendidikan Dasar di SD Taman Siswa pada tahun 2009. Dan seterusnya penulis melanjutkan Sekolah Menengah Pertama di SMP Dharma Pancasila dan selesai pada tahun 2012. Kemudian penulis melanjutkan Pendidikan di SMK Panca Budi dengan kejuruan Teknik Kendaraan Ringan dan selesai pada tahun 2015. Kemudian pada tahun 2015 penulis terdaftar menjadi Mahasiswa Fakultas Teknik Program Studi Teknik Mesin di Universitas Medan Area dan selesai pada tahun 2021.

ABSTRAK

Salah satu unit yang paling penting digunakan dalam proses memproduksi uap adalah ketel uap, ketel uap merupakan bejana tertutup yang terbuat dari baja serta beberapa komponen pendukung lainnya. Ketel uap menghasilkan panas pada proses pembakaran bahan bakar cangkang dan fiber dengan perbandingan 1:3 menghasilkan nilai kalor sebesar 20273,346 kJ/jam. Dari penelitian diperoleh hasil penurunan laju perpindahan panas dari titik nyala api 600 °C 800 °C dan 1,000 °C. Perpindahan panas pada suhu ruang bakar 1,000 °C. mengalir panas ke lapisan terluar sebesar 23.618 °C, pada suhu ruang bakar 800°C. mengalir panas sebesar 25.12 °C dan pada ruang bakar 600 °C. mengalir panas sebesar 26.218 °C.

Kata Kunci : nilai kalor bahan bakar, perpindahan panas, ketel uap



ABSTRACT

One of the most important units used in the steam production process is a steam boiler, steam boiler is a closed vessel made of steel and several other supporting components. The boiler generates heat in the combustion process of shell fuel and fiber with a ratio of 1 : 3 resulting in a calorific value of 20273,346 kJ/hour. From the research, the results of the decrease in the heat transfer rate from the flash points of 600 °C, 800 °C and 1,000 °C. Heat transfer at a combustion chamber temperature of 1,000 °C flows 23.618 °C in the 800 °C combustion chamber where heat flow 25.12 °C and in the 600 °C combustion chamber flow 26.218 °C .

Keywords : calorific value of fuel, heat transfer, steam boiler



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah yang maha Esa, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan proposal tugas akhir ini dengan judul “Analisis Perpindahan Panas Pada Ruang Bakar Ketel Uap Dengan Kapasitas 45 ton/jam di Perkebunan Nusantara III Sei Mangkei”.

Penyusunan proposal ini dilakukan guna untuk menyelesaikan studi di Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Medan Area, sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik.

Dalam kegiatan penulis untuk menyelesaikan proposal ini, penulis telah banyak mendapat bantuan berupa bimbingan, arahan dan saran dari berbagai pihak. Untuk itu maka dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Dadan Ramdan., M.Eng., M.Sc., selaku Rektor Universitas Medan Area.
2. Ibu Dr. Ir. Dina Maizana., MT., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Medan Area.
3. Bapak Muhammad Idris., ST.,MT., Selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Medan Area.
4. Bapak Ir. Amirsyam Nst., MT., selaku dosen pembimbing I dan Bapak Husin Ibrahim., MT., selaku dosen pembimbing II, yang bersedia membimbing dan meluangkan waktunya dalam membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyusun skripsi sehingga skripsi ini dapat selesai dalam waktu yang diharapkan oleh penulis.

5. Bapak/Ibu Dosen Program Studi Teknik Mesin dan Pegawai Fakultas Teknik Universitas Medan Area.
6. Pegawai Fakultas Teknik khususnya Program Studi Teknik Mesin Universitas Medan Area.
7. Kepada kedua orang tua saya yang bernama bapak Jumadi dan Ibu Rohanna yang memberikan perhatian serta dukungan dalam bentuk material maupun doa yang telah diberikan selama ini.
8. Seluruh teman – teman seperjuangan saya khususnya TEKNIK MESIN stambuk 2015 di Universitas Medan Area.

Penulis menyadari bahwa proposal ini masih belum sempurna adanya, karena masih banyak kekurangan baik dari segi ilmu maupun susunan bahasanya. Oleh karena itu penulis sangat mengharapkan kritik dan saran demi menyempurnakan proposal ini ke arah yang lebih baik lagi.

Akhir kata bantuan dan budi baik yang telah penulis dapatkan, menghaturkan terima kasih dan hanya kepada Allah Yang Maha Esa yang dapat memberikan limpahan berkat yang setimpal. Semoga proposal ini dapat bermanfaat bagi kita semua dan bagi penulis sendiri tentunya.

Medan, 2021
Penulis



Muhammad Iswanda
NIM 158130003

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PENGESAHAN UJIAN SKRIPSI	i
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Perumusan Masalah	2
C. Batasan Masalah	2
D. Tujuan Penelitian	3
E. Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
A. Pengertian Ketel Uap	4
B. Tipe-tipe dan cara kerja Ketel Uap	5
C. Pengoperasian Boiler	9
1. Commisioning Boiler	9
2. Start Up Boiler	10
D. Bagian-Bagian Pada Ketel Uap dan Fungsinya	11
1. Furnace (Ruang Bakar)	11
2. Air Heater	14
3. Pipa Waterwall	15
4. Pipa Superheater	16
5. Economizer	17
6. FD Fan	18
7. Steam Drum	18
E. Perpindahan Panas Pada Ketel Uap	19
1. Perpindahan Panas Secara konduksi	19
2. Perpindahan Panas Secara Konveksi	21
3. Perpindahan Panas Secara Radiasi	23
4. Laju Perpindahan Panas Pada Bidang Silinder Berongga ...	25
5. Koefisien Perpindahan Kalor Menyeluruh	26
6. Perpindahan Kalor Melalui dinding komposit	26
7. Konduktivitas Termal	28
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	30
A. Tempat Dan Waktu Penelitian	30
1. Tempat	30
2. Waktu	30
B. Alat dan Bahan	30
1. Alat	30
2. Bahan	32
C. Metode Penelitian	34
D. Diagram Alir Penelitian	36

BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	37
	A. Laju Perpindahan Panas Menyeluruh.....	37
	B. Menghitung Jumlah Tahanan Termal.....	38
	C. Perpindahan Panas Pada Lapisan Isolasi Ruang Bakar.....	39
	1. Perpindahan Panas Tiap Lapisan Isolasi.....	41
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	46
	A. Kesimpulan.....	46
	B. Saran.....	46
	DAFTAR PUSTAKA	47
	DAFTAR LAMPIRAN.....	48



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Ketel Uap pipa Api.....	6
Gambar 2.2. Bagian Utama Ketel Uap Pipa Api.....	7
Gambar 2.3. Ketel Uap Pipa Air (Water Tube Boiler).....	8
Gambar 2.4. Bagian Utama Boiler Pipa Air (Water Tube Boiler).....	9
Gambar 2.5. Ruang Bakar Ketel Uap.....	13
Gambar 2.6. Fire Grade.....	14
Gambar 2.7. Air Heater.....	14
Gambar 2.8. Economizer.....	18
Gambar 2.9. FD Fan.....	18
Gambar 2.10. Steam Drum.....	19
Gambar 2.11. Perpindahan Panas Konduksi.....	20
Gambar 2.12. Perpindahan Kalor Konveksi Dari Suatu Plat.....	23
Gambar 2.13. Perpindahan Panas Pada silinder Berongga.....	25
Gambar 2.14. Rangkaian Termal Dinding Komposit.....	28
Gambar 3.1. Ketel Uap.....	31
Gambar 3.2. Sketsa Ruang Bakar.....	32
Gambar 3.3. Struktur Ruang Bakar.....	32
Gambar 3.4. Batu Bata Tahan Api.....	32
Gambar 3.5. Semen Castabel.....	33
Gambar 3.6. Pipa Water Wall.....	33
Gambar 3.7. Diagram Alir.....	36
Gambar 4.1. Analogi Listrik Laju Perpindahan Panas Menyeluruh.....	37
Gambar 4.2. Arah perpindahan panas.....	40
Gambar 4.3. Grafik Perpindahan Panas Pada Suhu 600°C.....	44
Gambar 4.4. Grafik Perpindahan Panas Pada Suhu 800°C.....	45
Gambar 4.5. Grafik Perpindahan Panas Pada Suhu 1,000 °C.....	45

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1. Waktu Penulisan Skripsi	30
Tabel 3.2. Spesifikasi Ketel Uap.....	31
Tabel 3.3. Spesifikasi Pipa Boiler	33
Tabel 4.1. Temperatur Panas Ruang Bakar Ketel Uap	40
Tabel 4.2. Perpindahan Panas Secara Konduksi Pada Pipa Ketel Uap.....	41
Tabel 4.3. Data Hasil Perhitungan Perpindahan Panas Secara Konveksi	41
Tabel 4.4. Perpindahan Panas Secara Konduksi Pada Semen	42
Tabel 4.5. Perpindahan Panas Secara Konduksi Pada Batu Bata Tahan Api ..	42
Tabel 4.6. Perpindahan Panas Secara Konduksi Pada Plat Baja.....	43
Tabel 4.7. Perpindahan Panas Secara Konduksi Pada Glass Woold	43
Tabel 4.8. Perpindahan Panas Secara Konduksi Pada Alumunium.....	44



DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Sifat-sifat Air (Zat- cair jenuh).....	48
Lampiran 2. Konduktifitas Termal Bahan Penukar Kalor	49



BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Perpindahan panas adalah ilmu yang mempelajari perpindahan energi pada suatu bahan karena adanya perbedaan (*gradien*) suhu, perpindahan panas ini selalu terjadi dari suatu sistem bersuhu tinggi ke sistem lain yang bersuhu lebih rendah dan berhenti setelah kedua sistem mencapai temperature yang sama, perbedaan temperature merupakan syarat utama terjadinya perpindahan kalor, jika kedua sistem mempunyai temperature yang sama maka tidak akan ada perpindahan kalor pada kedua sistem tersebut. Jumlah aliran panas dinyatakan dengan notasi Q dalam satuan energi yaitu *joule*.

Sedangkan laju aliran panas adalah aliran energi persatuan waktu (jam atau detik) dinyatakan dengan notasi \dot{Q} (Q dot) pada umumnya dalam Watt. Selain itu ada juga laju aliran panas per satuan luas (\dot{q}) yang sering disebut *fluks* panas atau aliran panas *spesifik*. Harga Q dan q adalah suatu vektor yang arahnya berimpit dengan arah penyebaran panas.

Ilmu perpindahan kalor tidak hanya mencoba menjelaskan bagaimana energy kalor itu berpindah dari satu benda ke benda lain, tetapi juga dapat meramalkan laju perpindahan panas yang terjadi pada kondidi-kondisi tertentu. Terdapat tiga macam perpindahan panas, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi.[1]

Perpindahan panas didefinisikan sebagai besarnya jumlah panas yang dipindahkan diantara pemberi dan penerima panas. Proses perpindahan panas merupakan peristiwa laju perpindahan panas sebagaimana yang terjadi didalam peralatan teknikdan proses kimia.

Permasalahan yang sering terjadi pada proses perpindahan panas memerlukan perhatian terutama terhadap jumlah panas yang dipindahkan, luas permukaan bidang dan jenis-jenis bahan yang berkaitan dengan konstanta perpindahan panas.

Pada proses perpindahan panas antara aliran fluida panas dan aliran fluida dingin yang dipisahkan oleh dinding pemisah yang berupa permukaan pipa dengan ketebalan tertentu berlangsung melalui beberapa mekanisme. Antara aliran fluida panas dengan permukaan dalam pipa mekanisme perpindahan panasnya adalah konveksi. Dari permukaan dalam pipa ke permukaan luarnya perpindahan panas konduksi. Kemudian dari permukaan luar pipa ke aliran fluida dingin mekanisme perpindahan panas konveksi.[2]

Dengan adanya Kawasan Ekonomi Khusus Sei Mangkei Perdagangan PT Perkebunan III dimana penulis sudah melakukan kerja praktek di PKS ini, maka penulis membuat judul proposal : Analisis Perpindahan Panas Pada Ruang Bakar Ketel Uap Dengan Kapasitas 45 Ton/Jam di Perkebunan Nusantara III Sei Mangkei.

B. Perumusan Masalah

1. Mengetahui konstruksi sebuah ketel uap.
2. Mengetahui perambatan panas ketel uap.
3. Menghitung perpindahan panas pada tiap konstruksi dinding ketel uap.

C. Batasan Masalah

Batasan masalah bertujuan untuk menghindari pembahasan yang tidak terarah dan penulis lebih spesifik dalam melakukan penelitian, adapun batasan masalah dalam penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Analisis kalor yang keluar dari titik nyala api ke lapisan terluar ruang bakar.
2. Menghitung laju perpindahan panas dari lapisan pertama sampai lapisan akhir.
3. Proses perpindahan panas dari ruang bakar yang suhunya berbeda-beda.

D. Tujuan Penelitian

1. Menghitung koefisien perpindahan panas menyeluruh.
2. Menghitung jumlah tahanan termal.
3. Menghitung perpindahan panas pada lapisan isolasi dari ruang bakar.

E. Manfaat Penelitian

Untuk mengetahui panas pada ruang bakar dan menghitung panas yang keluar pada dinding ketel uap sehingga panas yang keluar ke udara admosfir tidak tertalu banyak sehingga produksi uap terjaga dan menjadi acuan pada sistem produksi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Pengertian Ketel Uap

Ketel Uap atau boiler adalah suatu alat berbentuk bejana tertutup yang terbuat dari baja dan digunakan untuk menghasilkan uap (steam). Steam diperoleh dengan memanaskan bejana yang berisi air dengan bahan bakar. Pada umumnya boiler memakai bahan bakar cair (residu, solar), padat (batu bara) , atau gas. Air di dalam boiler dipanaskan oleh panas dari hasil pembakaran bahan bakar (sumber panas lainnya) sehingga terjadi perpindahan panas dari sumber panas tersebut ke air yang mengakibatkan air tersebut menjadi panas atau berubah wujud menjadi uap. Uap yang disirkulasikan dari boiler digunakan untuk berbagai proses dalam aplikasi industri, seperti untuk penggerak, pemanas, dan lain-lain.

Pengoperasian ketel uap atau boiler harus sesuai dengan standar operasi yang telah ditentukan oleh pengguna boiler maupun standar pabrikan pembuat boiler itu sendiri. Standar yang dibuat akan menjamin keamanan dan kehandalan operasi boiler pada saat dioperasikan, sehingga akan meningkatkan efisiensi sekaligus menekan biaya operasional. Pemeliharaan boiler juga harus dilakukan sesuai dengan jadwal yang telah dibuat oleh perusahaan pengguna, yang meliputi pemeliharaan harian, mingguan, bulanan sampai dengan tahunan (Mayor Overhaul). Perawatan yang baik pada boiler dapat menjamin umur teknis dan umur ekonomis yang relatif panjang.

Ketel uap terdiri dari 2 komponen utama, yaitu :

1. Furnace (ruang bakar) sebagai alat untuk mengubah energi kimia menjadi energi panas.

2. Steam Drum yang mengubah energi pembakaran (energi panas) menjadi energi potensial steam (energi panas).

Ketel uap pada dasarnya terdiri dari drum yang tertutup ujung dan pangkalnya dan dalam perkembangannya dilengkapi dengan pipa api maupun pipa air. Banyak orang yang mengklasifikasikan ketel steam tergantung kepada sudut pandang masing – masing.[3]

Syarat - syarat ketel uap yang ideal, yaitu:

- a. Dapat menghasilkan jumlah uap yang maksimum dengan jumlah bahan bakar yang minimum.
- b. Kapasitas uap dan tekanan kerja harus konstan.
- c. Perangkat pembakaran mampu membakar unsur-unsur bahan bakar secara sempurna sehingga di dapat hasil yang optimal.
- d. Sirkulasi air harus baik agar diperoleh suhu yang merata pada seluruh bagian ketel, maka penyerapan kalor oleh air lebih efektif.
- e. Konstruksi ketel sederhana, sehingga biaya pembuatan, operasi dan perawatan lebih ekonomis dan hemat tempat.
- f. Alat-alat perlengkapan ketel harus berfungsi dengan baik sehingga ketel dapat beroperasi dengan baik dan aman.

B. Tipe-tipe dan cara kerja Ketel Uap

Ketel uap pada prinsipnya dibagi menjadi 2 yaitu Ketel uap pipa api (Fire Tube Boiler) dan Ketel Uap pipa air (Water Tube Boiler). Pada Ketel Uap pipa api gas panas melewati pipa-pipa dan air umpan boiler ada didalam shell untuk dirubah menjadi uap. Ketel uap pipa api digunakan untuk menghasilkan uap dengan kapasitas kecil sekitar 12 ton/jam dengan tekanan steam rendah sampai

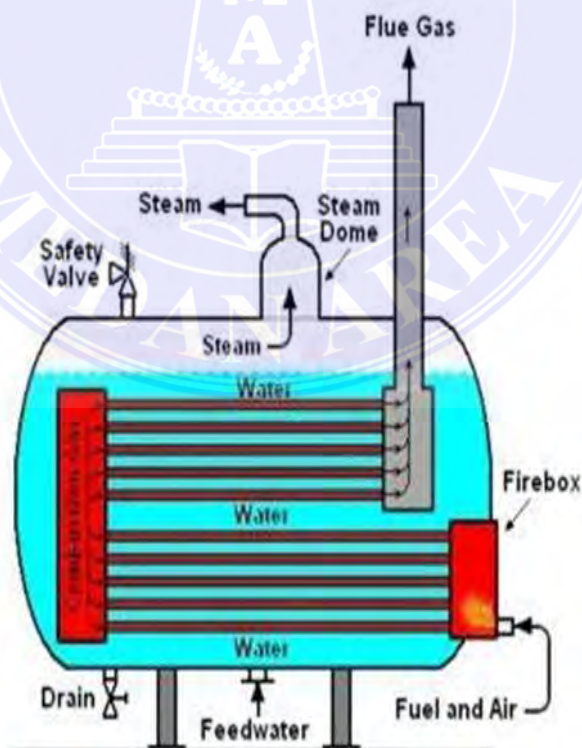
sedang (s.d 18 Kg/cm²F = atau sekitar 250 psi). Pada ketel uap jenis ini nyala api dan gas panas diperoleh dari hasil pembakaran bahan bakar untuk mentransfer panasnya. Gas panas dilewatkan melalui pipa-pipa disekitar dinding luar yang dikelilingi oleh air atau uap yang telah terbentuk.

Keuntungan Ketel Uap pipa api, yaitu:

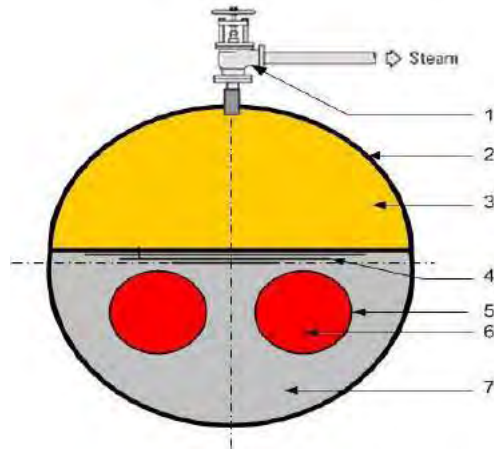
1. Tidak membutuhkan air isian Ketel dengan kualitas yang tinggi.
2. Konstruksi sederhana sehingga perawatan lebih mudah.
3. Endapan lumpur lebih mudah dibersihkan.

Kelemahan Ketel Uap pipa api, yaitu:

1. Pemanasan awal membutuhkan waktu lama.
2. Tekanan uap yang dihasilkan rendah.
3. Kapasitas uap yang dihasilkan kecil



Gambar 2.1. Ketel Uap pipa Api



Gambar 2.2. Bagian Utama Ketel Uap Pipa Api

Keterangan :

1. Sistem regulasi
2. Ketel
3. Uap
4. Level air
5. Tabung
6. Api
7. Air

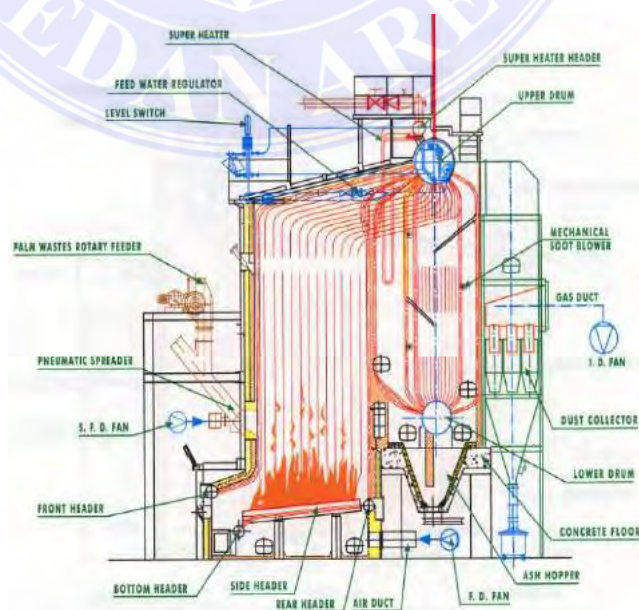
Sedangkan ketel uap pipa air (*Water Tube Boiler*) adalah ketel uap yang biasanya menghasilkan uap dengan tekanan dan kapasitas yang besar. Ketel uap jenis ini biasanya mempunyai tekanan kerja diatas 18 Kg/cm²F atau sekitar 250 psi dan kapasitas diatas 12 Ton/Jam. Ketel uap jenis ini adalah ketel uap yang peredaran airnya terjadi didalam pipa-pipa yang dikelilingi oleh nyala api dan gas panas dari luar susunan pipa. Kontruksi pipa-pipa yang dipasang didalam ketel uap dapat berbentuk lurus (*Straight Tube*) dan juga dapat berbentuk pengkolan/pipa bengkok (*Bend Tube*) tergantung dari jenis ketel uap nya. Pipa-pipa yang lurus dipasang secara paralel didalam ketel uap dihubungkan dengan Header, kemudian Header tersebut dihubungkan dengan bejana uap yang dipasang secara horizontal diatas susunan pipa.

Keuntungan Ketel Uap air, yaitu:

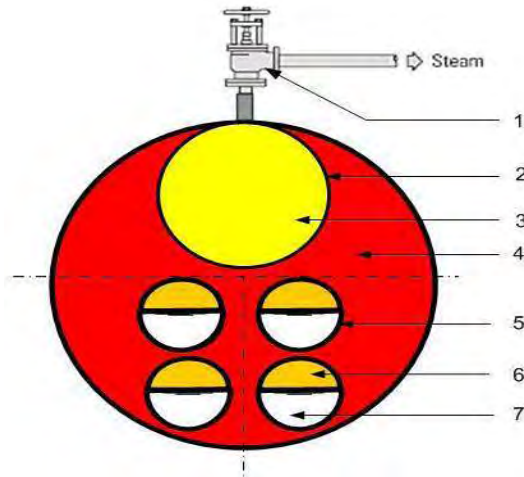
1. Sanggup bekerja dengan tekanan tinggi.
2. Menghasilkan uap dengan tekanan lebih tinggi dari pada ketel uap pipa api.
3. Laju aliran uap lebih tinggi.
4. Permukaan pemanasan lebih efektif karena gas panas mengalir keatas pada arah tegak lurus.

Kerugian dari Ketel Uap pipa air, yaitu:

1. Kontruksi ketel uap sudah tidak sederhana lagi, sehingga perawatan lebih sulit dilakukan.
2. Ketel uap pipa air memerlukan perhatian yang lebih hati-hati bagi penguapannya, karena itu akan menimbulkan biaya oprasi yang lebih besar.
3. Pembersihan pipa air tidak mudah dilakukan.
4. Air umpan mensaratkan mempunyai kemurnian tinggi untuk mencegah endapan kerak di dalam pipa, jika terbentuk kerak di dalam pipa bias menimbulkan panas yang berlebihan dan pecah.



Gambar 2.3. Ketel Uap Pipa Air (Water Tube Boiler)



Gambar 2.4. Bagian Utama Boiler Pipa Air (Water Tube Boiler)

Keterangan :

1. Sistem regulasi
2. Ketel penampung uap
3. Uap
4. Api
5. Tabung
6. Uap
7. Air

C. Pengoperasian Boiler

Pengoperasian Boiler adalah suatu kegiatan pengoperasian boiler yang dimulai dari proses *commisioning* untuk boiler baru, start awal, operasi normal, sampai dengan shut down baik pada saat normal operasi maupun pada saat terjadi gangguan operasi.

1. Commisioning Boiler

Commissioning adalah proses pengujian operasional suatu pekerjaan secara nyata maupun secara simulasi untuk memastikan bahwa pekerjaan tersebut telah dilaksanakan dan memenuhi semua peraturan yang berlaku, regulasi, kode dan sesuai dengan standar yang telah ditetapkan antara kontraktor dan

pengguna. *Commissioning* dilakukan apabila pelaksana pekerja telah menyelesaikan pekerjaan dan siap untuk melakukan start up, sekaligus untuk mendapatkan hasil suatu pekerjaan.

Proses persiapan awal yang dilakukan baik terhadap boiler yang baru ataupun yang sudah lama adalah suatu pemeriksaan utama yang terdiri dari proses pembersihan kerak ataupun material asing pada boiler (*boiler cleaning*) setelah uji hidrostatis dan pemeriksaan pada kebocoran boiler. Boiler dioperasikan dengan cara pendidihan yang menggunakan larutan alkali untuk menghilangkan material- material yang mengandung minyak dan deposit-deposit yang lain. Selama pendidihan, boiler dioperasikan pada tekanan rendah yang dijaga setengah dari tekanan penuh. Waktu pendidihan lebih kurang 24 jam.

Untuk boiler tekanan tinggi pembersihan secara kimia dengan mengurangi zat-zat dilakukan pembersihan secara asam (*acid cleaning*) boiler dikosongkan, diisi kembali dan dicuci dengan air segar. Boiler kemudian siap untuk beroperasi pada tekanan uap optimal sesuai dengan kapasitas yang diinginkan.

2. Start Up Boiler

Sistem yang ada pada boiler secara umum terdiri dari sistem air umpan, sistem steam dan sistem bahan bakar. Sistem air umpan ini berfungsi untuk menyediakan air umpan untuk boiler secara otomatis sesuai dengan kebutuhan produksi steam. Sistem steam ini berfungsi mengumpulkan dan sekaligus mengontrol produksi steam dalam boiler, kemudian didistribusikan melalui sistem pemipaan ke titik pengguna steam tersebut. Pada keseluruhan sistem, tekanan dan produksi steam diatur secara otomatis dan dipantau sesuai dengan standar yang telah dibuat.[4]

D. Bagian-Bagian Pada Ketel Uap dan Fungsinya

Ketel uap juga tersusun dari berbagai macam komponen dengan fungsinya masing-masing. Di bawah ini adalah fungsi dari masing-masing komponen pada ketel uap yaitu:

1. Furnace (Ruang Bakar)

Furnace adalah tempat dimana terjadinya pembakaran suatu bahan bakar dengan udara, dimana gas hasil pembakaran tersebut dimanfaatkan panasnya untuk pembentukan uap yang nantinya disalurkan keturbin uap, furnace berfungsi untuk memindahkan panas (*kalor*) yang dihasilkan dari pembakaran dan panas mengalir melalui pipa-pipa (*tube*).

Furnace memiliki struktur bangunan plat baja (*metal*) yang bagian dalamnya dilapisi oleh material tahan api, batu isolasi dan *refractory* yang berfungsi untuk mencegah kehilangan panas serta dapat menyimpan sekaligus memantulkan panas radiasi kembali ke permukaan *tube* yang dikenal dengan "*fire box*".

Furnace pada dasarnya terdiri dari sebuah ruang pembakaran yang menghasilkan sumber kalor untuk diserap kumparan pipa (*tube coil*) yang didalamnya mengalir fluida, dalam konstruksi ini biasanya tube coil dipasang menelusuri dan merapat ke bagian lorong yang menyalurkan gas hasil pembakaran dari ruang bakar ke crobong asap (*stack*), perpindahan kalor diruang pembakaran terutama terjadi karena radiasi atau disebut seksi radiasi (*radiant section*), sedangkan disaluran gas hasil pembakaran terutama oleh konveksi disebut seksi konveksi (*convection section*). Untuk mencegah supaya gas buangan tidak terlalu

cepat meninggalkan ruang konveksi maka pada cerobong sering kali dipasang penyekat (damper), perpindahan kalor melalui pembulu dikenal sebagai konduksi.

Furnace juga merupakan bagian dari Boiler yang berfungsi untuk tempat berlangsungnya proses pembakaran antara bahan bakar dan udara. Tekanan gas panas yang berada di dalam ruang bakar (Furnace) dapat lebih besar dari pada tekanan udara luar (tekanan ruang bakar positif) dan dapat juga bertekanan lebih kecil dari tekanan udara luar (tekanan ruang bakar negatif) atau bertekanan seimbang.[5]

Percampuran bahan bakar dan udara yang menyebabkan terjadi pembakaran yang selanjutnya dapat menghasilkan uap, bahan bakar adalah suatu bahan yang dapat dibakar untuk menghasilkan panas dalam mesin-mesin industri, Sedangkan pembakaran adalah suatu proses reaksi kimia antara unsur-unsur bahan bakar dengan oksigen disertai pelepasan panas dengan temperatur tinggi, Setiap jenis bahan bakar mempunyai nilai pembakaran yang berbeda dan kandungan unsur-unsur yang terkandung didalamnya juga berbeda-beda, sehingga dimungkinkan pada suatu jenis bahan bakar dapat terjadi pembakaran sempurna dan pada jenis lainnya terjadi pembakaran yang tidak sempurna tetapi hal ini tidak mutlak karena ada beberapa faktor yang mempengaruhi. Pembakaran sempurna terjadi bila semua unsur-unsur bahan bakar terbakar dan semua panas dilepaskan dan hal ini hanya dapat terjadi secara teoritis.[6]

Proses pembakaran yang sempurna adalah melepaskan seluruh panas yang terdapat dalam bahan bakar. Hal ini dilakukan dengan pengontrolan “Tiga T” yaitu : a. T-Temperatur Temperatur yang digunakan dalam pembakaran yang baik harus cukup tinggi sehingga dapat menyebabkan terjadinya reaksi kimia b. T-

Turbulensi yang tinggi menyebabkan terjadinya pencampuran yang baik antara bahan bakar dan pengoksidasi. Waktu yang cukup agar input panas dapat terserap oleh reaktan sehingga berlangsung proses termokimia.[7]

Pada bahan bakar untuk boiler pks biasanya memakai bahan bakar cangkang dan fiber karna mudah didapatkan dan memiliki unsure kimia berupa carbon (C), Hidrogen (H₂), Nitrogen (N₂), Oksigen (O₂) dan Abu, tetapi unsure kimia yang terdapat didalam cangkang dan serabut memiliki persentase yang berbeda. Apabila pemakaian cangkang terlalu banyak dari serabut maka akan menghambat proses pembakaran akibat penumpukan arang dan nyala api kurang sempurna, dan jika penggunaan cangkang lebih sedikit dibanding fiber maka panas yang akan dihasilkan di ruang bakar akan rendah karena cangkang apabila dibakar memiliki nyala api yang lama sehingga panas yang dihasilkan pun lebih besar dibandingkan fiber selain itu pemakaian serabut yang berlebihan akan berdampak buruk pada proses pembakaran karena dapat menghambat proses perambatan panas didalam pipa, karena abu hasil pembakaran yang berlebihan didalam ruang dapur menutupi dinding pipa akibatnya perambatan panas didalam pipa menjadi lebih lama.[8]



Gambar 2.5. Ruang Bakar Ketel Uap

2. Fire Grate

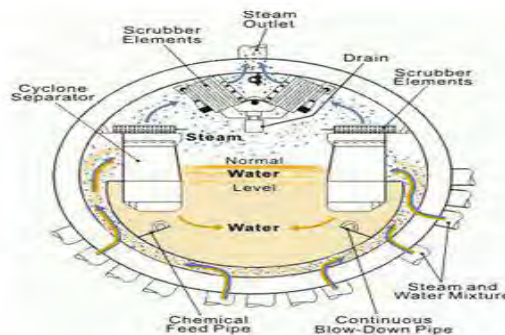
Fire grade berfungsi sebagai tungku pengapian dimana bahan bakar fiber dan cangkang terbakar, kemudian abu dari sisa pembakaran jatuh ke as hopper.



Gambar 2.6. Fire Grade

3. Air Heater

Komponen ini merupakan alat yang berfungsi untuk memanaskan udara yang digunakan untuk menghembus/meniup bahan bakar agar dapat terbakar sempurna. Udara yang akan dihembuskan, sebelum melewati air heater memiliki suhu yang sama dengan suhu udara normal (suhu luar) yaitu 38°C . Namun, setelah melalui air heater, suhunya udara tersebut akan meningkat menjadi 230°C sehingga sudah dapat digunakan untuk menghilangkan kandungan air yang terkandung didalamnya karena uap air dapat mengganggu proses pembakaran.



Gambar 2.7. Air Heater

4. Pipa Waterwall

Waterwall merupakan komponen yang sangat penting dalam proses perubahan fluida kerja dari fasa cair menjadi uap kering. Pada Supercritical boiler, walerwall yang digunakan harus mampu beroperasi pada tekanan dan temperatur yang sangat tinggi serta mampu untuk mengoptimalkan proses perubahan fasa dari cair menjadi supercritical fluid. Saat ini perkembangan teknologi supercritical boiler sangatlah pesat dan banyak digunakan [9]

Pipa air tergantung tempat pemakainannya dibagi menjadi dua; 1. Pipa aliran naik 2. Pipa aliran turun, Pipa aliran naik adalah saluran naik air yang ada didalam bagian dalam, naik keatas dari drum air mengarah ke drum uap dan pada pipa yang membentuk sisi transfer panas yang bersinggungan dengan ruang pembakaran.

Diantara saluran naik terutama yang menyerap panas radiasi dan yang menimbulkan uap pada air ketel didalam pipa disebut pipa uap atau evSaporation tube. Pipa penguap (evaporator tube) tergantung gas temperatur tinggi didalam ruang pembakaran, beban panasnya lebih tinggi dari bagian lain, kadang-kadang ada juga menyebabkan pemuaiian karena panas berlebihan (over heating) maka pendinginan padabagian ini perlu dilakukan dengan cukup, saluran turun adalah saluran dimana bagian air ketel turun mengalir kebawah mengarah keheader dari drum uap atau drum air, jumlah dan besarnya saluran air turun ditentukan berdasarkan jumlah penguapan. Standar dan material untuk pipa baja tersedia di bahan karbon, alloy dan baja anti karat pipa ini termasuk pipa boiler tekanan menengah dan tekanan tinggi, sering dibuat dalam prosedur mulus, pipa baja dilas tidak berlaku ini telah banyak digunakan dipipa penukar panas dan layanan

tubing, bundle tabung exchanger, tekanan tinggi boiler, economizer, superheater dll.

5. Pipa Superheater

Superheater merupakan alat yang berfungsi untuk menaikkan temperatur uap jenuh sampai menjadi uap panas lanjut (*superheat vapour*). Uap panas lanjut bila digunakan untuk melakukan kerja dengan jalan ekspansi dalam turbin atau mesin uap tidak akan mengembun, sehingga mengurangi kemungkinan timbulnya bahaya yang disebabkan terjadinya pukulan balik atau *back stroke* yang diakibatkan mengembunnya uap belum pada waktunya sehingga menimbulkan vakum di tempat yang tidak semestinya di daerah ekspansi. Superheater ditempatkan pada daerah aliran gas asap yang bertemperatur tinggi.

Superheater difungsikan untuk meningkatkan kadar kekeringan uap dengan memanaskannya menggunakan *flue gas*. Tujuan perpindahan panas ini di dalam proses produksi adalah untuk memanaskan uap hingga mencapai temperature tertentu yang diinginkan. Temperatur gas akan menurun setelah memanaskan uap, begitu pula dengan temperatur uap yang meningkat setelah dipanaskan oleh gas, kedua hal tersebut menunjukkan adanya transfer energi panas dari fluida panas (gas) ke fluida dingin (uap).

Prinsip kerja Super Heater yaitu pada saat pemanasan, api harus diatur sehingga suhu dari pipa Super Heater tidak melebihi batas keamanan yang diizinkan. Suhu dari logam pipa pada waktu pemanasan ketel biasanya dijaga supaya berada di bawah suhu pipa pada saat ketel berada pada kapasitas penuh. Hal ini dapat dilaksanakan dengan mengatur waktu dari saat pemanasan sampai

saat tekanan kerja tercapai, dengan maksud untuk membatasi suhu gas masuk ke superheater pada $\pm 5000\text{C}$ untuk superheater dengan pipa baja biasa.[7]

6. Economizer

Merupakan komponen yang digunakan untuk memanaskan feedwater dengan memanfaatkan panas dari gas asap sebelum masuk ke cerobong. Prinsip kerjanya sama seperti halnya dengan heat exchanger. Economizer akan meningkatkan nilai ekonomis ketel uap. Jenis ekonomiser yang populer adalah ekonomiser “Greans” yang banyak digunakan pada ketel stasioner. Economiser ini terdiri dari sejumlah besar pipa vertikal yang ditempatkan sebagai penambahan gas asap antara ketel dengan cerobong.

Aliran air pengisi Boiler berasal dari BFP (Boiler Feed Pump) dan melewati Economizer sebelum menuju Boiler Drum / Boiler Steam Drum. Di Economizer temperatur air pengisi Boiler pada sisi keluar/outlet Economizer akan lebih tinggi dari pada temperatur air masuk pada sisi masuk / inlet Economiser. Hal ini terjadi karena temperatur antara air pengisi Boiler yang terdapat dalam pipa-pipa Ekonomiser lebih rendah dari temperature gas buang Boiler yang berada di bagian luar pipa-pipa Economizer, sehingga akan terjadi perpindahan panas dari gas buag pembakaran ke air pengisi Boiler. Temperatur gas buang Boiler akan turun setelah melewati Economizer dan sebaliknya Temperatur air pengisi Boiler Drum akan meningkat setelah melewati Economizer.



Gambar 2.8. Economizer

7. FD Fan

FD Fan atau force draft fan berfungsi sebagai penghisap angin dari luar kemudian angin dibawa ke bawah boiler dan di tembakan melalui lubang-lubang dibawah lantai (fire grate) ke ruang bakar sehingga api menjadi besar dan mempercepat proses pemanasan di ruang bakar.



Gambar 2.9. FD Fan

8. Steam Drum

Steam drum berfungsi sebagai tempat penampungan air panas serta tempat terbentuknya uap. Drum ini menampung uap jenuh (saturated steam) beserta air dengan perbandingan antara 50% air dan 50% uap. untuk menghindari agar air tidak terbawa oleh uap, maka dipasang sekat-sekat, air yang memiliki suhu rendah akan turun ke bawah dan air yang bersuhu tinggi akan naik ke atas dan kemudian menguap.



Gambar 2.10. Steam Drum

E. Perpindahan Panas Pada Ketel Uap

Perpindahan panas dapat di definisikan sebagai berpindahnya energi dari satu daerah ke daerah lainnya sebagai akibat dari beda suhu antara daerah-daerah tersebut dari temperatur fluida yang lebih tinggi ke fluida lain yang memiliki temperatur lebih rendah. Perpindahan panas pada umumnya dibedakan menjadi tiga cara perpindahan panas yang berbeda yaitu konduksi (conduction; juga dikenal dengan istilah hantaran), konveksi (convection juga dikenal sebagai aliran) dan radiasi (radiation; juga dikenal dengan istilah pancaran).

1. Perpindahan Panas Secara konduksi

Konduksi adalah proses dimana panas mengalir dari daerah yang bersuhu tinggi ke daerah yang bersuhu lebih rendah di dalam satu medium (padat, cair atau gas) atau antara medium-medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung. Dalam aliran panas konduksi, perpindahan energi terjadi karena hubungan molekul secara langsung tanpa adanya perpindahan molekul yang cukup besar. Konduksi adalah satu-satunya mekanisme dimana panas dapat mengalir dalam zat padat yang tidak tembus cahaya. Konduksi penting pula dalam fluida, tetapi di dalam medium yang bukan padat biasanya bergabung dengan

konveksi, dan dalam beberapa hal juga dengan radiasi. Persamaan dasar untuk konduksi satu dimensi dalam keadaan studi dapat ditulis:

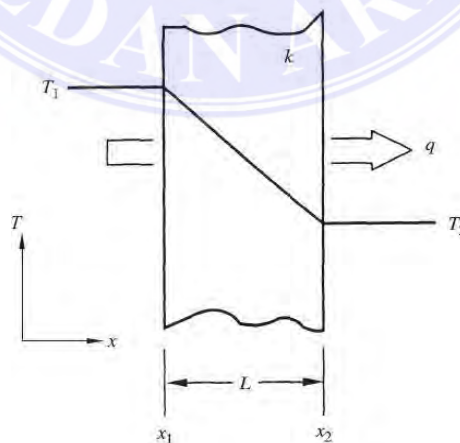
$$q = - k.A \frac{\Delta T}{\Delta X} \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana :

- q = laju perpindahan kalor (watt)
- k = konduktivitas termal benda (W/m°C)
- A = luas permukaan perpindahan panas (m²)
- ΔT = selisih temperature overall
- Δx = tebal benda perpindahan panas
- (-) = menandakan kalor mengalir ketempat yang lebih rendah dalam skala suhu
- T₁ = temperature benda yang berbatasan langsung dengan panas
- T₂ = temperature benda yang berbatasan dengan udara atmosfer

Persamaan diatas dapat disederhanakan dalam bentuk ;

$$q = k.A \frac{T_1 - T_2}{dx} \dots\dots\dots (2.2)$$



Gambar 2.11. Perpindahan Panas Konduksi

2. Perpindahan Panas Secara Konveksi

Konveksi adalah proses transport energi dengan kerja gabungan dari konduksi panas, penyimpanan dan gerakan mencampur. Konveksi sangat penting sebagai mekanisme perpindahan energi antara permukaan benda padat dan cairan atau gas. Perpindahan energi dengan cara konveksi dari suatu permukaan yang suhunya di atas suhu fluida sekitarnya berlangsung dalam beberapa tahap. Pertama, panas akan mengalir dengan cara konduksi dari permukaan ke partikel-partikel fluida yang berbatasan. Energi yang berpindah dengan cara demikian akan menaikkan suhu dan energi dalam partikel-partikel fluida ini. Kemudian partikel-partikel fluida tersebut akan bergerak ke daerah yang bersuhu rendah didalam fluida di mana mereka akan bercampur dengan, dan memindahkan sebagian energinya pada partikel-partikel fluida lainnya.

Perpindahan panas secara konveksi antara batas benda padat dan fluida terjadi dengan adanya suatu gabungan dari konduksi dan angkutan (transport) massa. Jika batas tersebut bertemperatur lebih tinggi dari fluida, maka panas terlebih dahulu mengalir secara konduksi dari benda padat ke partikel-partikel fluida di dekat dinding. Energi yang di pindahkan secara konduksi ini meningkatkan energi di dalam fluida dan terangkut oleh gerakan fluida. Bila partikel-partikel fluida yang terpanaskan itu mencapai daerah yang temperaturnya lebih rendah, maka panas berpindah lagi secara konduksi dari fluida yang lebih panas ke fluida yang lebih dingin. Laju perpindahan panas dengan cara konveksi antara suatu permukaan dan suatu fluida dapat dihitung dengan hubungan:

$$q = h.A(T_w - T_\infty) : \dots\dots\dots (2.3)$$

dimana :

q = laju perpindahan panas dengan cara konveksi (Watt)

h = koefisien perpindahan panas konveksi ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

A = luas penampang (m^2)

T_w = Temperatur dinding ($^\circ C$)

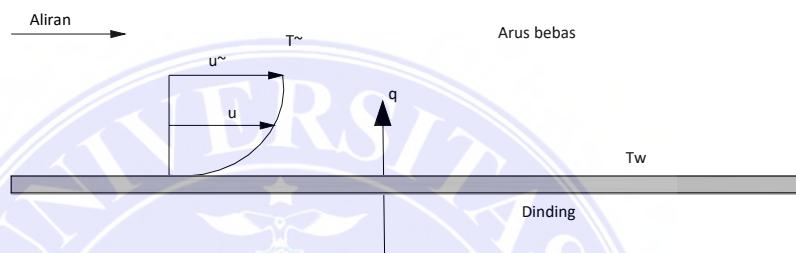
T_∞ = Temperatur fluida ($^\circ C$)

Koefisien perpindahan panas konveksi h bervariasi terhadap jenis aliran (aliran laminar atau turbulen), sifat-sifat fisik fluida, temperatur rata-rata, juga dipengaruhi oleh mekanisme perpindahan panas konveksi. Banyak parameter yang mempengaruhi perpindahan panas konveksi di dalam sebuah geometri khusus. Parameter-parameter ini termasuk skala panjang sistem (L), konduktivitas termal fluida (k), biasanya kecepatan fluida (V), kerapatan (ρ), viskositas (μ), panas jenis (C_p), dan kadang-kadang faktor lain yang berhubungan dengan cara pemanasan (temperatur dinding uniform atau temperatur dinding berubah-ubah). Fluks kalor dari permukaan padat akan bergantung juga pada temperatur permukaan (T_w) dan temperatur fluida (T_f), tetapi biasanya dianggap bahwa ($\Delta T = T_w - T_f$) yang penting. Akan tetapi, jika sifat-sifat fluida berubah dengan nyata pada daerah pengkonveksi (convection region), maka temperatur-temperatur absolute T_w dan T_f dapat juga merupakan faktor-faktor penting didalam korelasi.

Perpindahan panas konveksi diklasifikasikan dalam konveksi bebas (free convection) dan konveksi paksa (forced convection) menurut cara menggerakkan alirannya. Konveksi bebas adalah perpindahan panas yang disebabkan oleh beda suhu dan beda rapat saja dan tidak ada tenaga dari luar yang mendorongnya. Konveksi bebas dapat terjadi karena ada arus yang mengalir akibat gaya apung, sedangkan gaya apung terjadi karena ada perbedaan densitas fluida tanpa

dipengaruhi gaya dari luar sistem. Perbedaan densitas fluida terjadi karena adanya gradien suhu pada fluida. Contoh konveksi alamiah antara lain aliran fluida yang melintasi radiator panas.

Di sini laju perpindahan kalor dihubungkan dengan beda suhu menyeluruh antara dinding dan fluida, dan luas permukaan A . Besaran h disebut koefisien perpindahan-kalor konveksi (*convection heat-transfer coefficient*).



Gambar 2.12. Perpindahan Kalor Konveksi Dari Suatu Plat

3. Perpindahan Panas Secara Radiasi

Perpindahan panas secara radiasi adalah perpindahan panas tanpa perantara perpindahan panas ini terjadi antara suatu benda dengan benda lainnya yang melalui gelombang-gelombang elektromagnetik tanpa bergantung ada atau tidaknya media atau zat diantara benda yang menerima panas tersebut. Molekul-molekul api yang merupakan hasil dari pembakaran bahan bakar dan udara mengganggu keseimbangan elektromagnetik terhadap aether tersebut, sebagian energy yang timbul dari hasil pembakaran tersebut diserahkan kepada aether kemudian aether menyerahkan ke gelombang elektromagnetik dan setelah itu gelombang elektromagnetik menyerahkan kepada benda atau bidang yang menerima panas atau dipanaskan seperti dinding ketel, dinding tungku, pipa dan sebagainya.

Bila bidang panas tertutup atau terhalang oleh benda lain maka bidang yang akan dipanaskan tidak menerima panas secara pancaran atau terhalangnya perpindahan panas secara pancaran, bila panas mengenai suatu benda maka sebagian dari panas tersebut akan dipantulkan kembali (*reflected*) atau akan dipancarkan kembali (*reradiated*) dan sebagian akan diserap benda tersebut.

$$q_r = eA\sigma(T_1^4 - T_2^4) \dots\dots\dots (2.4)$$

dimana :

q_r = laju perpindahan panas dengan cara radiasi (Watt)

e = emitansi permukaan kelabu

A = luas permukaan (m^2)

σ = $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

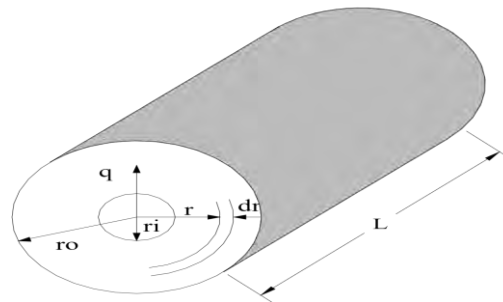
T_1^4 = Temperatur Benda kelabu (K)

T_2^4 = Temperatur Benda hitam yang mengelilinginya (K)

Pembahasan termodinamika menunjukkan bahwa radiator (penyinar) ideal atau benda hitam *blackbody*, memancarkan energy dengan laju yang sebanding dengan pangkat empat suhu absolut benda itu dan berbanding langsung dengan luas permukaan dimana σ ialah konstanta Stefan-Boltzmann dengan nilai $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$.

Untuk persamaan diatas hanya berlaku untuk radiasi yang dipancarkan oleh benda hitam pertukaran radiasi netto antara dua permukaan berbanding dengan perbedaan suhu absolut pangkat empat yang artinya benda hitam ialah benda yang memancarkan energy menurut hukum T^4 .

4. Laju Perpindahan Panas Pada Bidang Silinder Berongga



Gambar 2.13. Perpindahan Panas Pada silinder Berongga

Secara umum perpindahan panas konduksi pada silinder dapat terjadi ke arah radial (sumbu r) aksial (sumbu z) dan tangential (sumbu θ) dan gradien temperature pada silinder diasumsikan hanya terjadi kearah radial, dengan persamaan ;

$$q_r = - k.A \frac{dT}{dr} \dots\dots\dots (2.5)$$

atau
$$q_r = - 2 \pi k r L \frac{dT}{dr} \dots\dots\dots (2.6)$$

dimana; dT/dr = gradien suhu dalam arah radial
 dengan kondisi batas $T = T_i$ pada $r = r_i$ dan $T = T_o$ pada $r = r_o$

Penyelesaian persamaan (2-6) adalah :

$$q_r = \frac{2 \pi k L (T_i - T_o)}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \dots\dots\dots (2.7)$$

tahanan termalnya dalam hal ini adalah :

$$q_r = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k L} \dots\dots\dots (2.8)$$

5. Koefisien Perpindahan Kalor Menyeluruh

Aliran kalor menyeluruh sebagai hasil gabungan proses konduksi dan konveksi bisa dinyatakan dengan koefisien perpindahan kalor menyeluruh U yang dirumuskan dalam hubungan.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}} \dots\dots\dots (2.9)$$

Koefisien transfer panas overall/meyeluruh sering dinyatakan dalam satuan W/m^2C dimana A ialah luas bidang bidang aliran kalor.

Sehingga disubtitusikan menjadi :

$$q = U A \Delta T \dots\dots\dots (2.10)$$

dimana :

- q = laju perpindahan panas overall
- U = koefisien transfer panas overall
- A = luas permukaan transfer panas
- ΔT = selisih temperature overall

Atau persamaan 2.10 menjadi :

$$q = \frac{A (TA - TB)}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}} \dots\dots\dots (2.11)$$

sehingga disederhanakan menjadi

$$q = \frac{\Delta T}{\Sigma R} \dots\dots\dots (2.12)$$

6. Perpindahan Kalor Melalui dinding komposit

Dinding berlapis atau komposit dari jenis yang khas dipergunakan pada tanur yang besar. Lapisan dalam yang bersinggungan dengan gas-gas yang bersuhu tinggi terbuat dari bahan tahan api. Lapisan antaranya terbuat dari bata isolasi; menyusul lapisan luar dari bata merah biasa. Makin besar luas bidang

panas dan selisih temperature makin besar pula jumlah panas yang dirambatkan karena jumlah panas yang dirambatkan berbanding lurus dengan luas bidang dan selisih temperature, terlebih bidang panas yang melakukan perambatan panas makin tebal maka makin berkurang jumlah panas yang dirambatkan karena jumlah panas yang dirambatkan berbanding terbalik dengan tebal bidang panas.

Untuk selanjutnya 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 uap kepada molekul-molekul air, uap ataupun udara.

Molekul tersebut dalam keadaan mengalir/ bergerak bukan dalam kondisi diam, dengan demikian penyerahan panas secara konveksi dan konduksi bersamaan.

$$q = \frac{\text{laju suhu menyeluruh}}{\text{jumlah tahanan termal}} \dots\dots\dots (2.13)$$

$$q = \frac{TA - TB}{\frac{\Delta x_1}{k_1 A} + \frac{\Delta x_2}{k_2 A} + \frac{\Delta x_3}{k_3 A} + \frac{\Delta x_4}{k_4 A}}$$

A = luas penampang perpindahan kalor (m²)

T_A = suhu ruang bakar (°C)

T_B = suhu atmosfer (°C)

Δx = tebal benda perpindahan panas

K = nilai konduktivitas bahan (W/m °C)

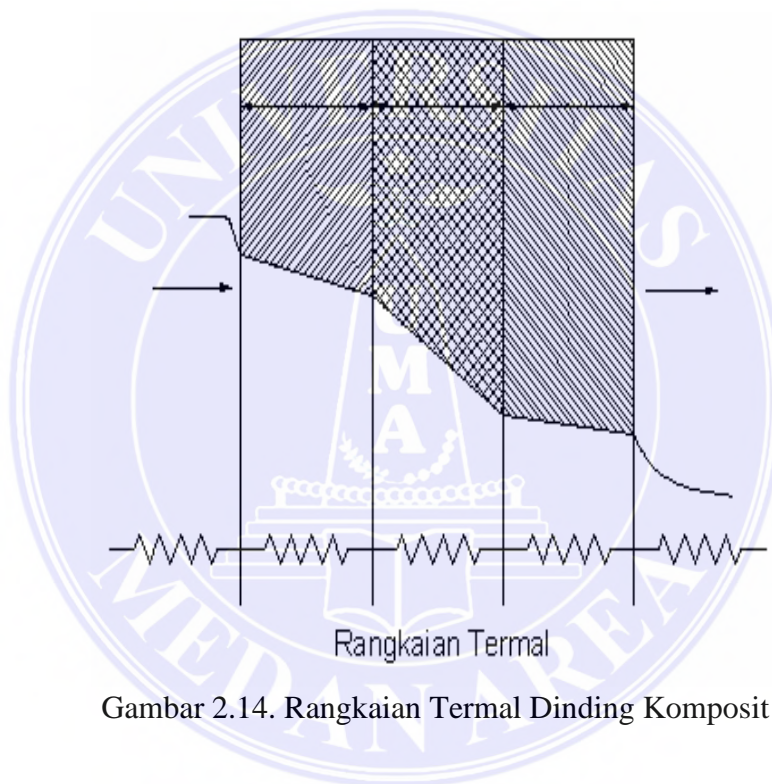
Seperti terlihat hubungan diatas sangat serupa dengan hokum Ohm dalam rangkaian termal ialah Δx/kA dan tahananannya ialah jumlah keempat suku dalam pembagi, analogi listrik ini dapat pula digunakan untuk memecahkan soal-soal yang lebih rumit baik yang menyangkut tahanan termal dalam susunan seri

maupun parallel, persamaan aliran kalor untuk soal itu dapat dituliskan sebagai berikut :

$$q = \frac{\Delta T \text{ menyeluruh}}{\Sigma R_{th}} \dots\dots\dots (2.14)$$

dimana R_{th} adalah tahanan termal dari bermacam – macam bahan itu, dan aliran panas q adalah beda suhu dibagi tahanan termal :

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R} \dots\dots\dots (2.15)$$



Gambar 2.14. Rangkaian Termal Dinding Komposit

7. Konduktivitas Termal

Konduktivitas panas suatu bahan adalah ukuran kemampuan bahan untuk menghantarkan panas (termal) nilai konduktivitas termal suatu bahan menunjukkan laju perpindahan panas yang mengalir dalam suatu bahan. Misalnya selembar pelat memiliki tampang lintang A dan tebal Δx , kedua permukaannya dipertahankan pada suhu yang berbeda

Tetapan kesebandingan (k) adalah sifat fisik bahan atau material yang disebut konduktivitas termal. Persamaan diatas merupakan persamaan dasar tentang konduktivitas termal. Berdasarkan rumusan itu maka dapatlah dilaksanakan pengukuran dalam percobaan untuk menentukan konduktivitas termal berbagai bahan, pada umumnya konduktivitas termal itu sangat tergantung pada suhu. Pada umumnya nilai k dianggap tetap, namun sebenarnya nilai k dipengaruhi oleh suhu.

Mekanisme konduksi termal pada gas cukup sederhana energi kinetik molekul ditunjukkan oleh suhunya jadi pada bagian bersuhu tinggi molekul-molekul mempunyai kecepatan yang lebih tinggi daripada bagian yang bersuhu rendah. Molekul-molekul itu selalu berada dalam gerakan rambang atau acak, saling bertumbukan satu sama lain dimana terjadi pertukaran energi dan momentum. Perlu diingat bahwa molekul-molekul itu selalu berada dalam gerakan rambang walaupun tidak terdapat gradien suhu dalam gas itu. Jika suatu molekul bergerak dari daerah bersuhu tinggi ke daerah bersuhu rendah maka molekul itu mengangkut energi kinetik ke bagian system yang suhunya lebih rendah.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Tempat Dan Waktu Penelitian

1. Tempat

Lokasi penelitian yang menjadi pilihan adalah di PT. Perkebunan Nusantara III (Pesero) PKS Sei Mangkei yang memiliki kapasitas 75 ton/jam yang terbagi atas dua pengolahan yaitu kapasitas 30 ton TBS/jam dan 45 ton TBS/jam.

2. Waktu

Untuk waktu penelitian dari awal penelitian sampai penyelesaian tugas akhir sebagai berikut.

Tabel 3.1. Waktu Penulisan Skripsi

No	Sekedul Penulisan	Sep	Nov	Des (2020)	Feb	Mar	Jul	Agt (2021)
1.	Bimbingan Proposal							
2.	Penulisan Skripsi							
3.	Seminar Proposal							
4.	Pengambilan Data							
5.	Seminar Hasil							
6.	Perbaikan Skripsi							
7.	Pelaksanaan Sidang							

B. Alat dan Bahan

1. Alat

Dalam penelitian ini alat atau objek penelitian perpindahan panas adalah sebagai berikut;

a. Ketel Uap (Boiler)

Boiler atau ketel uap menurut Djokosetyardj M.J (1990) merupakan alat yang digunakan untuk menghasilkan uap/steam untuk berbagai keperluan. Jenis air dan uap air sangat dipengaruhi oleh tingkat efisiensi boiler itu sendiri. Pada mesin boiler, jenis air yang digunakan harus dilakukan demineralisasi terlebih dahulu untuk mensterilkan air yang digunakan, sehingga pengaplikasian untuk dijadikan uap air dapat dimaksimalkan dengan baik.



Gambar 3.1. Ketel Uap

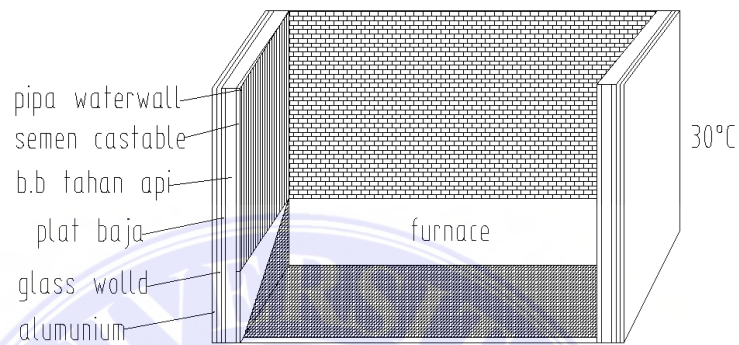
Tabel 3.2. Spesifikasi Ketel Uap

No	Deskripsi	Spesifikasi
1.	Ketel Uap	Advance Water Tube Boiler
2.	Kapasitas Uap	27.000 kg/jam
3.	Temperatur Uap	280°C
4.	Temperatur Air Umpan	90°C
5.	Efisiensi Ketel Uap	75%
6.	Bahan Bakar	Fiber dan Cangkang

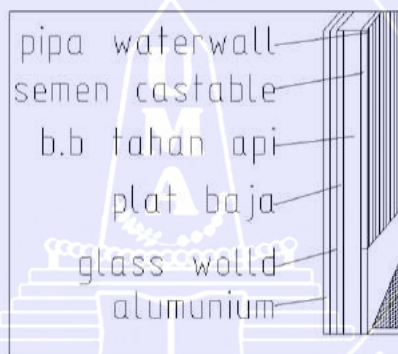
b. Ruang Bakar (furnace)

Ruang bakar adalah suatu alat berbentuk bejana tertutup yang terbuat dari baja dan digunakan untuk menghasilkan uap (steam). Steam diperoleh dengan memanaskan bejana yang berisi air dengan bahan bakar. Pada umumnya boiler

memakai bahan bakar cair (residu, solar), padat (batu bara) , atau gas. Air di dalam boiler dipanaskan oleh panas dari hasil pembakaran bahan bakar (sumber panas lainnya) sehingga terjadi perpindahan panas dari sumber panas tersebut ke air yang mengakibatkan air tersebut menjadi panas.



Gambar 3.2. Sketsa Ruang Bakar



Gambar 3.3. Struktur Ruang Bakar

2. Bahan

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

a. Batu Bata Tahan Api SK 36



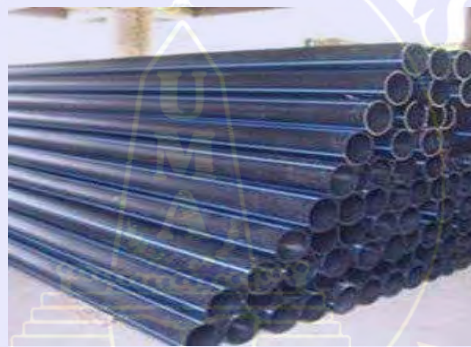
Gambar 3.4. Batu Bata Tahan Api

b. Semen Castabel



Gambar 3.5. Semen Castabel

c. Pipa Water Wall



Gambar 3.6. Pipa Water Wall

Ukuran umum: OD dari 6mm ke 1240 mm ketebalan dari 1mm hingga 50mm, jenis ; pipa boiler lurus, untuk spesifikasi dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 3.3. Spesifikasi Pipa Boiler

No	Jenis	Spesifikasi
1.	Baja Karbon	ASTM / ASME A / SA 106, ASTM A179, ASTM A 192, ASTM / ASTM / ASME A / SA 210, ASTM A333 Gr 1,6,7 hingga 9
2.	Baja Paduan	ASTM / ASME A / SA 213, ASTM T1, T2, T5, T9, T11, T12, T22, T91, T92, ASTM A335 P1,P2,P5,P9,P12,P22,P91,P92.
3.	Stainless Steel	ASTM A268, ASTM A213, TP304 / L, TP36 / L, 310S, 309S, 317L, 321,321 H dan bahan stainless steel duplex dll

C. Metode Penelitian

Adapun metode penulisan yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. Tahapan Studi Literatur

Tahapan studi literatur meliputi referensi baik dari buku, jurnal, dan dari literatur lainnya sebagai penunjang teori yang selanjutnya digunakan sebagai acuan pada penulisan yang akan dilakukan.

2. Peninjauan Lapangan (Observasi)

Peneliti melakukan peninjauan ke perusahaan dimana penulis melakukan penelitian serta pengamatan sesuai dengan tujuan yang telah dibuat.

3. Pengumpulan Data

Tahapan ini adalah tahapan terpenting, yaitu melakukan pengamatan dari pengujian dan kemudian mencatat data hasil pengamatan tersebut data yang nantinya dikumpulkan kemudian diolah agar dapat digunakan dalam penelitian, dan sumber penelitian ini berasal dari :

a. Data primer

Data primer yaitu data yang diperoleh dengan peninjauan secara langsung ke pabrik yang meninjau objek penelitian dan wawancara dengan pihak perusahaan. Data primer tersebut hal-hal yang berkenaan dengan *Stasiun Boiler*.

b. Data sekunder

Data sekunder diperoleh melalui perusahaan, dimana data tersebut sudah ada disimpan oleh perusahaan sebelumnya, diantaranya adalah spesifikasi mesin, data sheet tentang pemeliharaan pada boiler, kemudian penulis melakukan studi kepustakaan dengan mempelajari buku-buku atau hal-hal yang berkaitan dengan

stasiun boiler, meliputi kegiatan pemeliharaan perusahaan secara umum, serta *boiler* secara khusus.

4. Kelengkapan Data

Setelah melakukan pengumpulan data kemudian peneliti mengecek apakah data yang diperlukan sudah sesuai atau tidak untuk melanjutkan tahap selanjutnya.

5. Pengolahan Data

Setelah data penelitian lengkap kemudian penulis mengolah data sesuai dengan tujuan analisis.

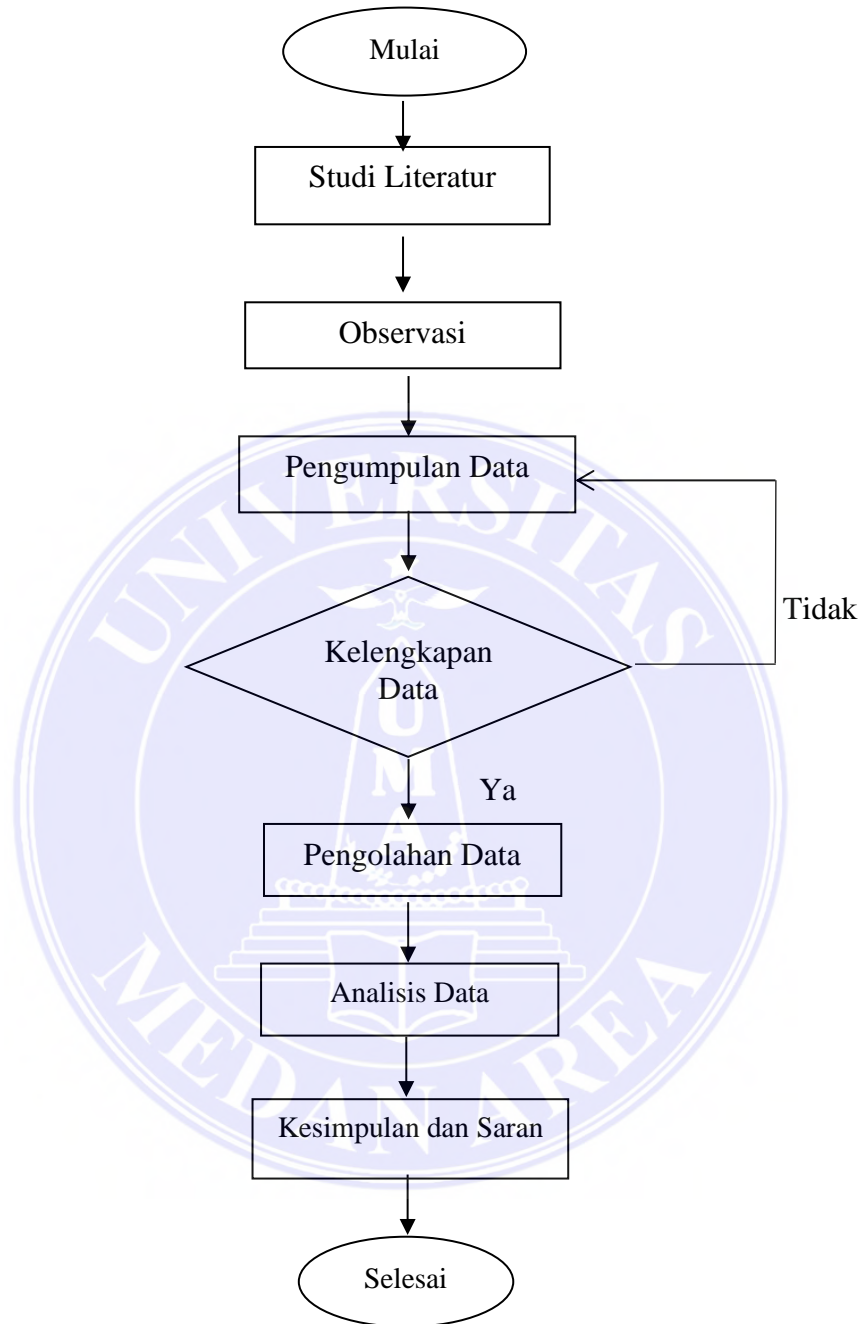
6. Tahapan Analisa dan Pembahasan

Hasil dari pengujian diatas kemudian dianalisa kembali dan dibahas sesuai dengan literatur yang sudah ada, kemudian konsultasi kepada dosen pembimbing untuk mencapai hasil yang dibutuhkan.

7. Tahapan kesimpulan dan saran

Dalam mengambil kesimpulan, diperlukan ketelitian dan pertimbangan yang seksama, karna ini merupakan hasil akhir yang diperoleh dari sebuah penelitian, serta meminta saran dari para panitia pelaksana ujian skripsi agar skripsi bias jadi acuan buat kedepannya bagi yang membutuhkan.

D. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.7. Diagram Alir

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Pada koefisien perpindahan panas menyeluruh dengan persamaan U diperoleh $0.603 \text{ W/}^\circ\text{C}$.
2. Untuk jumlah tahanan termal pada tiap lapisan dinding ruang bakar diperoleh $\Sigma R = 0.053 \text{ }^\circ\text{C/W}$.
3. Untuk perpindahan panas secara keseluruhan panas yang keluar hampir memiliki nilai yang sama, nilainya tidak begitu jauh antara 2 sampai 3 $^\circ\text{C}$.

B. Saran

1. Perawatan dan pemeliharaan yang baik perlu dilaksanakan terhadap ketel uap secara berkala guna mempertahankan efisiensi kerja pada ketel uap tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P.Jaringan,D.Steam, D. Pt, K.D. M. Ke, and P. T. Kni, “Analisis Kehilangan Steam Dan Penurunan Temperatur,” vol. 6, no. 2, pp. 123–135, 2017.
- [2] ANALISIS KINERJA ALAT SUPERHEATER PADA INSTALASI PEMBANGKIT TENAGA UAP Tris Sugiarto *, Chandrasa Soekardi **,” pp. 85–91.
- [3] I. Muzaki and A. Mursadin, “ANALISIS EFISIENSI BOILER DENGAN METODE INPUT – OUTPUT DI PT . JAPFA COMFEED INDONESIA Tbk . UNIT BANJARMASIN,” vol. 4, no. 1, pp. 37–46, 2019.
- [4] Sugiharto and Agus, “Tinjauan Teknis pengoperasian dan Pemeliharaan Boiler,” *Forum Teknol.*, vol. 06, no. 2, pp. 56–68, 2016.
- [5] J. Mekanova, “Analisis Perpindahan Panas Pada Heat Exchanger Di Furnace Boiler Circulating Fludizing Bed Unit 1 Pltu Nagan Raya 2 X 110 Mw,” vol. 3, no. 4, pp. 1–12, 2017.
- [6] T. A. Nusalim, E. A. Handoyo, P. Studi, T. Mesin, and U. Kristen, “PERANCANGAN KETEL UAP untuk PT . HONGXING ALGAE INTERNATIONAL,” pp. 1–7.
- [7] A. D. Putri, “PROTOTYPE STEAM POWER PLANT (Analisis heat Loss pada Unit Boiler Furnace dan Super Heater),” vol. 7, pp. 1–4, 2014.
- [8] A. Firdaus and E. Sirait, “Analisa Pengaruh Variasi Kapasitas Uap Terhadap Efisiensi Ketel Uap Di Pt . Sinar Sosro Banyuasin-Sumatera Selatan,” *J. Energi dan Manufaktur*, vol. 8, pp. 133–140, 2015.
- [9] J. Suzia, I. Yuliyani, and Maridjo, “Rancangan Waterwall Pada Once Through Supercritical Boiler Unttjk Pembangkit Listrik Tenaga Uap Kapasitas 1X660 Mw,” *J. Tek. Energi*, vol. 6, no. I, 2016.

- walid, h. (2019). Arahan Penempatan Signage di Jalur Pedestrian Jalan Iskandar Muda Kota Medan. JAUR (JOURNAL OF ARCHITECTURE AND URBANISM RESEARCH), 3(1), 1-16. doi:<https://doi.org/10.31289/jaur.v3i1.2902>
- handayani, m., & Suprayetno, S. (2019). Kajian Perilaku Pengguna pada Perpustakaan Perguruan Tinggi. JAUR (JOURNAL OF ARCHITECTURE AND URBANISM RESEARCH), 3(1), 17-26. doi:<https://doi.org/10.31289/jaur.v3i1.2904>
- Nasution, A. (2019). Analisis Permasalahan Perumahan dan Permukiman di Kota Medan. JAUR (JOURNAL OF ARCHITECTURE AND URBANISM RESEARCH), 3(1), 27-46. doi:<https://doi.org/10.31289/jaur.v3i1.2908>
- rambe, y. (2019). Analisis Arsitektur pada Rumah Tradisional Batak Toba di Kabupaten Toba Samosir, Balige. JAUR (JOURNAL OF ARCHITECTURE AND URBANISM RESEARCH), 3(1), 47-60. doi:<https://doi.org/10.31289/jaur.v3i1.2912>
- agustina, i. (2019). Analisis Pembentuk Ruang pada kawasan Pasar Tradisional pada Pusat Pasar dan jalan Veteran. JAUR (JOURNAL OF ARCHITECTURE AND URBANISM RESEARCH), 3(1), 61-68. doi:<https://doi.org/10.31289/jaur.v3i1.2934>
- azmah, c., Sari, I., Karsono, B., & Nurhaiza, N. (2019). Pelestarian Pendopo Aceh Timur Ditinjau Dari Sejarah Bangunan. JAUR (JOURNAL OF ARCHITECTURE AND URBANISM RESEARCH), 3(1), 69-76. doi:<https://doi.org/10.31289/jaur.v3i1.2938>
- Siregar, M., & Roychansyah, M. (2019). The Urban Warming Causes and Adaptation in Tropical Cities. JAUR (JOURNAL OF ARCHITECTURE AND URBANISM RESEARCH), 3(1), 77-87. doi:<https://doi.org/10.31289/jaur.v3i1.2966>
- Tresnadi, I., & Sani Roychansyah, M. (2019). Community Perceptions and Adaptation Strategies Toward Floods in Pedurenan Village, Tangerang City. JAUR (JOURNAL OF ARCHITECTURE AND URBANISM RESEARCH), 3(1), 88-94. doi:<https://doi.org/10.31289/jaur.v3i1.2967>
- Etenia, A. (2020). Strategi Potensi Dalam Pengembangan Wisata Ice Skating Di Dalam Mall Jakarta (Studi Kasus: Sky Rink Taman Anggrek Jakarta). JAUR (JOURNAL OF ARCHITECTURE AND URBANISM RESEARCH), 3(2), 95-103. doi:<https://doi.org/10.31289/jaur.v3i2.3344>
- Nurzaman, A. (2020). Tradisionalitas dan Modernitas Dikotomi Perkembangan Wilayah Pesisir Kabupaten Gunungkidul. JAUR (JOURNAL OF ARCHITECTURE AND URBANISM RESEARCH), 3(2), 104-115. doi:<https://doi.org/10.31289/jaur.v3i2.3168>
- Muslim, E. (2020). Perencanaan dan Perancangan Pusat Perbelanjaan di Kota Padang. JAUR (JOURNAL OF ARCHITECTURE AND URBANISM RESEARCH), 3(2), 116-123. doi:<https://doi.org/10.31289/jaur.v3i2.3537>
- sari, l. (2020). Perencanaan Rumah Sakit Umum Type C Di Sulit Air IX Koto Diatas Kabupaten Solok. JAUR (JOURNAL OF ARCHITECTURE AND URBANISM RESEARCH), 3(2), 124-128. doi:<https://doi.org/10.31289/jaur.v3i2.3414>
- Anisa, A. (2020). Kajian Konsep Arsitektur Ekologi Pada Kawasan Resort Studi Kasus: Pulau Ayer resort and Cottages. JAUR (JOURNAL OF ARCHITECTURE AND URBANISM RESEARCH), 3(2), 129-138. doi:<https://doi.org/10.31289/jaur.v3i2.3413>
- Ginting, E. (2020). Sumatera Utara: Pengembangan Potensi Daerah dalam Dikotomi Spasial dan Non Spasial. JAUR (JOURNAL OF ARCHITECTURE AND URBANISM RESEARCH), 3(2), 139-153. doi:<https://doi.org/10.31289/jaur.v3i2.3157>
- Rahmah, I. (2020). Dikotomi Keruangan Wilayah: Karakteristik Wilayah dan Daya Saing Daerah Provinsi Jawa Timur. JAUR (JOURNAL OF ARCHITECTURE AND URBANISM RESEARCH), 3(2), 154-165. doi:<https://doi.org/10.31289/jaur.v3i2.3142>

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Sifat-sifat Air (Zat-cair jenuh)

593

Lampiran A Beberapa Daftar

Tabel A-9 Sifat-sifat Air (Zat-cair Jenuh)†

Catatan $Gr_x Pr = \left(\frac{g\beta\rho^2 c_p}{\mu k} \right) x^3 \Delta T$

°F	°C	c_p , kJ/kg · °C	ρ , kg/m ³	μ , kg/m · s	k , W/m · °C	Pr	$\frac{g\beta\rho^2 c_p}{\mu k}$, 1/m ³ · °C
32	0	4.225	999.8	1.79×10^{-3}	0.566	13.25	
40	4.44	4.208	999.8	1.55	0.575	11.35	1.91×10^9
50	10	4.195	999.2	1.31	0.585	9.40	6.34×10^9
60	15.56	4.186	998.6	1.12	0.595	7.88	1.08×10^{10}
70	21.11	4.179	997.4	9.8×10^{-4}	0.604	6.78	1.46×10^{10}
80	26.67	4.179	995.8	8.6	0.614	5.85	1.91×10^{10}
90	32.22	4.174	994.9	7.65	0.623	5.12	2.48×10^{10}
100	37.78	4.174	993.0	6.82	0.630	4.53	3.3×10^{10}
110	43.33	4.174	990.6	6.16	0.637	4.04	4.19×10^{10}
120	48.89	4.174	988.8	5.62	0.644	3.64	4.89×10^{10}
130	54.44	4.179	985.7	5.13	0.649	3.30	5.66×10^{10}
140	60	4.179	983.3	4.71	0.654	3.01	6.48×10^{10}
150	65.55	4.183	980.3	4.3	0.659	2.73	7.62×10^{10}
160	71.11	4.186	977.3	4.01	0.665	2.53	8.84×10^{10}
170	76.67	4.191	973.7	3.72	0.668	2.33	9.85×10^{10}
180	82.22	4.195	970.2	3.47	0.673	2.16	1.09×10^{11}
190	87.78	4.199	966.7	3.27	0.675	2.03	
200	93.33	4.204	963.2	3.06	0.678	1.90	
220	104.4	4.216	955.1	2.67	0.684	1.66	
240	115.6	4.229	946.7	2.44	0.685	1.51	
260	126.7	4.250	937.2	2.19	0.685	1.36	
280	137.8	4.271	928.1	1.98	0.685	1.24	
300	148.9	4.296	918.0	1.86	0.684	1.17	
350	176.7	4.371	890.4	1.57	0.677	1.02	
400	204.4	4.467	859.4	1.36	0.665	1.00	
450	232.2	4.585	825.7	1.20	0.646	0.85	
500	260	4.731	785.2	1.07	0.616	0.83	
550	287.7	5.024	735.5	9.51×10^{-4}			
600	315.6	5.703	678.7	8.68			

† Adaptasi dari A. I. Brown dan S. M. Marco, "Introduction to Heat Transfer," 3d ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1958.

Daftar ini menggunakan satuan SI.

Lampiran 2. Konduktifitas Termal Bahan Penukar Kalor

Bahan	Suhu °C	k, W/m °C	ρ, kg/m ³	c, kJ/kg °C	α, m ² /s x 10 ⁶
<i>Bahan-bahan bangunan dan penahan-kalor</i>					
Aspal	20-55	0.74-0.76			
Bata:					
Bata bangunan biasa	20	0.69	1600	0.84	5.2
Muka		1.32	2000		
Bata karborundum	600	18.5			
	1400	11.1			
Bata krom	200	2.32	3000	0.84	9.2
	550	2.47			9.8
	900	1.99			7.9
Tanah diatomea dicetak dan dibakar	200	0.24			
	870	0.31			
Bata tahan-api dibakar 2426°F	500	1.04	2000	0.96	5.4
	800	1.07			
	1100	1.09			
Dibakar 2642°F	500	1.28	2300	0.96	5.8
	800	1.37			
	1100	1.40			
Missouri	200	1.00	2600	0.96	4.0
	600	1.47			
	1400	1.77			
Magnesit	200	3.81		1.13	
	650	2.77			
	1200	1.90			
Semen, portland moster	23	0.29	1500		
		1.16			
Beton, sinder	23	0.76			
Batu, 1-2-4 campur	20	1.37	1900-2300	0.88	8.2-6.8
Gelas, jendela	20	0.78 (avg)	2700	0.84	3.4
Korosilikat	30-75	1.09	2200		
Plaster, gips	20	0.48	1440	0.84	4.0
lat logam	20	0.47			
lat kayu	20	0.28			
Batu:					
Granit		1.73-3.98	2640	0.82	8-18
Batu kapur	100-300	1.26-1.33	2500	0.90	5.6-5.9
Marmar		2.07-2.94	2500-2700	0.80	10-13.6
Batu pasir	40	1.83	2160-2300	0.71	11.2-11.9
Kayu (melintas serat)					
Balsa, 8.8 lb/ft ³	30	0.055	140		
Sipres	30	0.097	460		
Fir	23	0.11	420	2.72	0.90
Mapel atau oak	30	0.166	540	2.4	1.28
Pinus kuning	23	0.147	640	2.8	0.82
Pinus putih	30	0.112	430		

Daftar ini menggunakan Satuan SI.