

**ANALISIS PERPINDAHAN PANAS PADA BOILER PIPA API
SKALA MODEL TEKANAN UAP 7 Kg/cm²**

SKRIPSI

OLEH :

**SIHOL ALBERT SIHALOHO
178130114**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2023**

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 6/6/23

Access From (repository.uma.ac.id)6/6/23

HALAMAN JUDUL

**ANALISIS PERPINDAHAN PANAS PADA BOILER PIPA API
SKALA MODEL TEKANAN UAP 7 Kg/cm²**

SKRIPSI

OLEH :

SIHOL ALBERT HALOHO

178130114



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2023**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 6/6/23


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

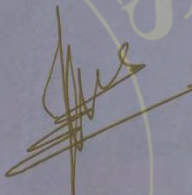
Access From (repository.uma.ac.id)6/6/23

HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI

Judul Proposal/TA : Analisa Perpindahan Panas Pada Pipa Api Skala
Model Dengan Tekanan Uap 7 Kg/cm²
Nama Mahasiswa : Sihol Albert Haloho
NPM : 178130114
Bidang Keahlian : Konversi Energi

Diketahui Oleh
Komisi Pembimbing


(Indra Hermawan, ST.,MT)
Dosen Pembimbing I


(Muhammad Idris, ST.,MT)
Dosen Pembimbing II


(Dr. Rahmadsyah, S.Kom,M.Kom)
Dekan


(Muhammad Idris, ST.,MT)
Ka.Prodi

Tanggal Lulus : 18 Januari 2023

HALAMAN PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya susun, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana merupakan hasil karya tulis saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan skripsi ini yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai sorma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah. Saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang saya peroleh dan sanksi-sanksi lainnya dengan peraturan yang berlaku, apabila di kemudian hari ditemukan adanya plagiat dalam skripsi ini.

Medan, Desember 2022



Sihol Albert Haloho
178130114

Halaman Pernyataan Persetujuan Publikasi Karya Ilmiah

Sebagai sivitas akademi Universitas Medan Area, saya yang bertandatangan dibawah ini

Nama : Sihol Albert Haloho
NPM : 178130114
Program Studi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Tugas Akhir/Skripsi/Tesis

Dalam Pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Medan Area **Hak Bebas Royalti Noneklusif (Non-Exclusive Royalty Free Right)** atas Tugas Akhir skripsi saya yang berjudul:

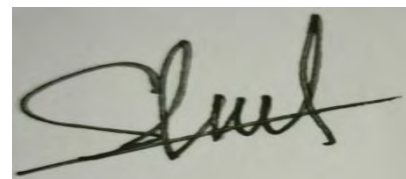
Analisis Perpindahan panas pada Boiler Pipa Api skala model tekanan uap 7 kg/cm^2 .
Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan) dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalihmediakan/formatkan mengelola dalam bentuk pengakalan data (data Base), merawat dan mempublikasikan tugas akhir skripsi/tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik hak cipta.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di Medan

Pada tanggal 20 Januari 2023

Yang menyatakan



(Sihol Albert Haloho)

ABSTRAK

Penggunaan listrik merupakan kebutuhan yang sangat penting pada kehidupan manusia sekarang ini. Sebuah pembangkit listrik seperti PLTU merupakan hal utama yang harus ditunjang dengan berbagai peralatan utama seperti boiler, turbin dan generator untuk menghasilkan listrik. Pada bagian pembangkit bagian paling penting yaitu boiler. Ketika pada terjadi masalah pada boiler maka seluruh sistem kerja pembangkit PLTU akan terganggu. Dimana memiliki tujuan menganalisis laju perpindahan panas pada boiler skala model dengan tekanan $7,138 \text{ Kg/cm}^2$ dan kapasitas 20 Kg/jam dan menganalisis kalor yang dibutuhkan air untuk menjadi uap. Pada penelitian ini menggunakan metode merancang boiler skala model dan melakukan eksperimen pada boiler skala model. Dimana pada penelitian ini menggunakan boiler skala model dimana pada boiler sering terjadi permasalahan perambatan panas pada ruang bakar boiler ke boiler itu sendiri. Dimana memiliki tujuan menganalisis laju perpindahan panas pada boiler skala model dengan tekanan $7,138 \text{ Kg/cm}^2$ dan kapasitas 20 Kg/jam dan menganalisis kalor yang dibutuhkan air untuk menjadi uap. Pada penelitian ini menggunakan metode merancang boiler skala model dan melakukan eksperimen pada boiler skala model. Pada boiler skala model menggunakan bahan bakar jenis kayu bakar. Setelah melakukan penelitian maka hasil yang di dapat dari hasil penelitian adalah pada awal tekanan yaitu $1,02 \text{ Kg/cm}^2$ mengalami perpindahan panas sebanyak $157,40 \text{ watt}$ mengalami kenaikan perpindahan panas pada tekanan uap berikut nya sampai pada tekanan $7,138 \text{ Kg/cm}^2$ dengan terjadi perpindahan panas sebesar $426,38 \text{ watt}$, panas yang masuk dari bahan bakar sebesar 107.830 watt dan besar kalor yang di gunakan air untuk menjadi uap sebesar $731,155 \text{ watt}$.

Kata kunci: Boiler, perpindahan panas dan tekanan

ABSTRACT

The use of electricity is a very important requirement in human life today. A power plant such as a power plant is the main thing that must be supported by a variety of main equipment such as boilers, turbines and generators to produce electricity. The most important part of the power plant is the boiler. Where has the aim of analyzing the rate of heat transfer on a model scale boiler with a pressure of 7,138 kg / cm² and a capacity of 20 kg / hour and analyzing the heat needed for water to become steam. In this study using the method of designing model scale boilers and conducting experiments on model scale boilers Where in this study using model scale boilers where in the boiler often the problem of propagation of heat in the boiler combustion chamber to the boiler itself. Where has the aim of analyzing the rate of heat transfer on a model scale boiler with a pressure of 7,138 kg / cm² and a capacity of 20 kg / hour and analyzing the heat needed for water to become steam. In this study using the method of designing model scale boilers and conducting experiments on model scale boilers. The model scale boilers use fuel wood type fuel. After conducting research, the results obtained from the results of the study are at the beginning of the pressure of 1,02 kg / cm² experiencing heat transfer as much as 157,40 watts experiencing an increase in heat transfer at the next steam pressure up to pressure of 7,138 kg / cm² with a heat transfer of 426,38 watts, heat entering from the fuel of 107.830 watts and the amount of heat used for water to steam amounted to 731,155 watts.

Keywords: Boilers, heat transfer and pressure

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Sihol Albert Haloho dilahirkan di Medan pada tanggal 29 Juni 1996. Penulis merupakan anak kedua dari 4 bersaudara, pasangan dari Maruli Sihalo , Lince Sianturi. Penulis menyelesaikan pendidikan di SD Negeri 104187 Medan, Sumatera Utara dan Tamat pada tahun 2008. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Menengah Pertama Smp Swasta TD. Pardede Foundation dan Tamat pada Tahun 2011. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan di SMK Swasta Teladan Sumatera Utara 2 Medan Jurusan TKR dan Tamat pada tahun 2014. Pada tahun 2017 penulis terdaftar menjadi mahasiswa Fakultas Teknik Program Studi Teknik Mesin Universitas Medan Area sampai sekarang.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat dan rahmatnya sehingga saya penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini. Yang mana sudah menjadi kewajiban yang harus dipenuhi oleh setiap mahasiswa Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Medan Area. Adapun judul tugas akhir ini ialah : “Analisi Perpindahan Panas Pada Boiler Pipa Api Skala Model Tekanan Uap 700 kPa”

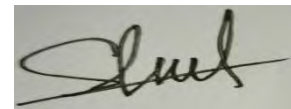
Selama perkuliahan sampai dengan seterusnya skripsi ini penulis telah banyak menerima bantuan moral maupun material yang tidak dapat dinilai harganya. Untuk itu melalui tulisan ini, penulis mengucapkan banyak terima kasih yang setulusnya kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Dadan Ramdan, M.Eng, M.Sc., selaku Rektor Universitas Medan Area yang telah memberikan izin dan fasilitas untuk penyusunan tugas akhir ini.
2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Medan Area Bapak Dr. Rahmad Syah, S.Kom, M.Kom yang telah memberikan izin dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Bapak Muhammad Idris, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Medan Area.
4. Bapak Dr. Iswandi, S.T., M.T., selaku Sekretaris Program Studi Teknik Mesin Universitas Medan Area yang telah banyak membantu dalam pengurusan administrasi dan bimbingannya.
5. Bapak Indra Hermawan, S.T., M.T., sebagai dosen pembimbing I, dan Muhammad Idris, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing II yang telah

- banyak meluangkan waktunya untuk membimbing, motivasi dan memberikan saran kepada penulis dalam penulisan tugas akhir ini.
6. Segenap Dosen Program Studi Teknik Mesin Universitas Medan Area dan Birokrasi Administrasi Fakultas Teknik Universitas Medan Area
 7. Maruli Sihalofo dan Lince Sianturi selaku orang tua yang sangat saya sayangi dan cintai, dimana telah banyak memberikan perhatian, motivasi, nasihat, doa, dukungan moral dan materi sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.
 8. Sahabat dan Abang rekan kerja ikut membantu membuat alat pembangkit listrik tenaga uap mini dan memberikan bantuan material, tenaga, semangat, dan motivasi dalam penyusunan Tugas Akhir ini yaitu Rio Prasetyo, Irfan, dan rekan kerja Zulkarnain Lubis.
 9. Mhd Ferdinansyah Ujung dan Jody Prasetya yang ikut memberikan semangat, motivasi, dan membantu menyelesaikan tugas akhir ini.
 10. Rekan-rekan Seperjuangan Mahasiswa Teknik Mesin Stambuk 2017 dari kampus Universitas Medan Area.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir/skripsi/tesis ini masih memiliki kekurangan, oleh karena itu kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan tugas akhir/skripsi/tesis ini. Penulis berharap tugas akhir/skripsi/tesis ini dapat bermanfaat baik untuk kalangan pendidikan maupun masyarakat. Akhir kata penulis ucapkan terima kasih

Medan, Maret 2022



Sihol Albert Sihalofo
NPM : 178130114

DAFTAR ISI

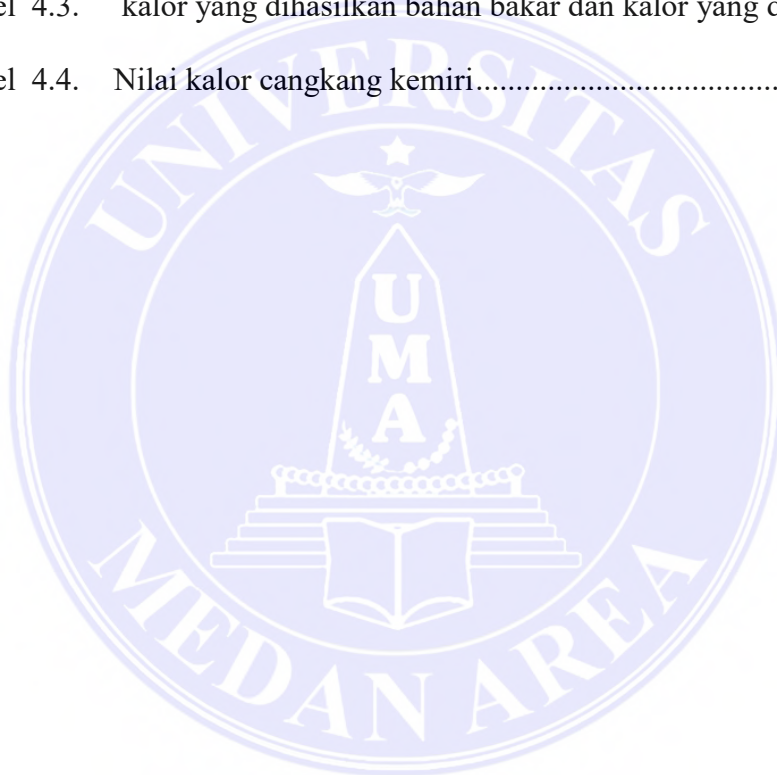
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI	ii
HALAMAN PERNYATAAN	iii
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	iv
ABSTRAK	v
RIWAYAT HIDUP	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR NOTASI	xiii
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Perumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Hipotesis Penelitian	4
1.5. Manfaat Penelitian	4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Pengertian Boiler	5
2.2. Jenis-Jenis Boiler	7
2.3. Perpindahan Panas Secara Umum	10
2.4. Panas Yang Masuk Dari Bahan Bakar.....	18
2.5. Kalor Yang Digunakan Api Untuk Menjadi Uap	19
2.6. Prinsip Kerja Boiler	19
2.7. Proses Pembentukan Uap.....	20
2.8. Siklus Rankine	22
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1. Tempat dan Waktu.....	25
3.2. Alat dan Bahan.....	26
3.3. Metode Penelitian	31
3.4. Diagram Alir	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1. Hasil	34
4.2. Pembahasan	41
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	48
5.1. Kesimpulan	48
5.2. Saran	48
DAFTAR PUSTAKA	49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Air yang tidak bersirkulasi	6
Gambar 2.2.	Boiler Pipa Air.....	7
Gambar 2.3.	Boiler Pipa Api.....	8
Gambar 2.4.	Boiler Jenis Stokers	8
Gambar 2.5.	Boiler Jenis Pulverizer.....	9
Gambar 2.6.	Boiler Jenis CFB	9
Gambar 2.7.	Perpindahan Kalor Konveksi Dari Suatu Plat	12
Gambar 2.8.	Volume Unsur Untuk Analisis Konduksi Kalor Satu Dimensi	13
Gambar 2.9.	Aliran kalor satu dimensi melalui silinder bolong dan analogi listriknnya	16
Gambar 2.10.	Perpindahan kalor menyeluruh melalui dinding datar	17
Gambar 2.11.	Grafik proses pembentukan uap	21
Gambar 2.12.	Siklus Rankine.....	23
Gambar 2.13.	Diagram Temperatur T-S	24
Gambar 3.1.	Pressure Gauge.....	26
Gambar 3.2.	Thermometer	26
Gambar 3.3.	Sight Glass.....	27
Gambar 3.4.	Safety Valve	27
Gambar 3.5.	Thermo gun	28
Gambar 3.6.	Boiler	30
Gambar 3.7.	Sketsa Boiler.....	31
Gambar 3.8.	Boiler Skala Model	32
Gambar 3.9.	Diagram Alir.....	33
Gambar 4.1.	Tahanan Thermal pada Boiler	37
Gambar 4.2.	Grafik tahanan thermal tekanan 1,02 kg/cm	42
Gambar 4.3.	Grafik tahanan thermal pada tekanan 2.039 kg/cm ²	43
Gambar 4.4.	Grafik tahanan thermal pada Tekanan 3,59 kg/cm ²	44
Gambar 4.5.	Grafik tahanan thermal pada tekanan 4,079 kg/cm ²	44
Gambar 4.6.	Grafik tahanan thermal pada tekanan 5,099 kg/cm ²	44
Gambar 4.7.	Grafik tahanan thermal pada tekanan 6,118 kg/cm ²	46
Gambar 4.8.	Grafik tahanan thermal pada tekanan 7,138 kg/cm ²	46
Gambar 4.9.	Grafik Laju Perpindahan Panas	47

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1.	Nilai kalor cangkang kemiri.....	18
Tabel 3.1.	Jadwal Penelitian.....	24
Tabel 3.2.	Spesifikasi gambar boiler skala model.....	30
Tabel 4.1.	Panas masuk ke dalam Boiler	34
Tabel 4.2.	Laju perpindahan panas pada boiler.....	35
Tabel 4.3.	kalor yang dihasilkan bahan bakar dan kalor yang diterima air...	36
Tabel 4.4.	Nilai kalor cangkang kemiri.....	36



DAFTAR NOTASI

K kal/kg	= Nilai Kalor
\dot{m}_{bb}	= Nilai Massa Bahan Bakar
Q_{in}	= Panas yang masuk
Q_{out}	= Panas yang Keluar
kJ/s	= Besaran Daya
kg/cm^2	= Tekanan
$^{\circ}C$	= Temperatur
K	= Temperatur
R_{rad}	= Perpindahan panas Radiasi
$R_{konduksi}$	= Perpindahan panas Konduksi
$R_{konveksi}$	= Perpindahan panas Konveksi
Q	= Perpindahan panas Menyeluruh
K	= Konduktivitas Material
L	= Tinggi Boiler
r_1	= jari-jari diameter dalam
r_2	= jari-jari diameter luar
t_f	= Suhu film
Gr	= Bilangan Grashof
Pr	= Bilangan Prandelt
G	= Gravitasi Bumi
β	= untuk mencari nilai Pranddtl
T_{ω}	= Temperatur Pipa api
T_{∞}	= Temperatur sekeliling
L	= Tinggi Boiler
ν^2	= viskositas kinematik
A	= luas penampang
Nu	= Bilangan nusselt
k	= konduktivitas thermal fluida
\dot{h}	= koefisien perpindahan kalor konveksi
Q_{air}	= Panas yang dibutuhkan air untuk menjadi uap
\dot{m}_{cp}	= Nilai kalor Bahan bakar
kW	= Daya

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Boiler adalah bejana tertutup dimana panas pembakaran di alirkan ke air sampai terbentuk air panas atau steam. Air panas atau steam pada tekanan tertentu kemudian di gunakan untuk mengalirkan panas ke suatu proses. Sistem boiler terdiri dari : steam air umpan, sitem steam, dan sistem bahan bakar. Steam air umpun menyediakan air untuk boiler secara otomatis sesuai dengan kebutuhan steam. Sistem steam mengumpulkan dan mengontrol produksi steam dalam boiler. Pada keseluruhan sistem, tekanan steam diatur menggunakan kran dan di pantau dengan alat pemantau tekanan. Sistem bahan bakar adalah semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan. Peralatan yang diperlukan pada sistem bahan bakar tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan pada sistem.

Air yang disuplay ke boiler untuk diubah menjadi steam disebut air umpan. Dua sumber air umpan adalah : kondensat atau steam yang mengembun yang kembali dari proses dan air makeup (air baku yang sudah diolah) yang harus diumpankan dari luar ruang boiler dan plant proses. Untuk mendapatkan efisiensi boiler yang lebih tinggi, digunakan economizer untuk memanaskan awal air umpan menggunakan limbah panas pada gass buang sehingga didapatkan efisiensi maksimal. Perindustrian di Indonesia kini semakin maju dan perkembangan seiring dengan pesatnya perkembangan dunia teknologi. Sehubungan dengan hal tersebut, maka akan semakin besar pula kebutuhan listrik yang merupakan infrastruktur

primer dari sebuah negara. Dan sebagai kebutuhan pokok bagi tiap orang tanpa memandang golongan dan status sosialnya, diperlukan pasokan listrik yang harus memadai kebutuhan satu negara. Guna menopang segala sarana dan prasarana dari sector perindustrian di Indonesia, kebutuhan listrik merupakan sesuatu yang sangat vital dan harus di penuhi.(NURUL CHANDRA PURNAMA, 2017)

PLTU sebagai salah satu jenis pembangkit yang paling sering dijumpai di Indonesia merupakan suatu sistem pembangkit yang saling terkait antara satu komponen dengan komponen lainnya. Salah satu komponen terpenting dalam siklus pembangkit ini adalah boiler. Dimana fungsi utama dari komponen ini adalah penghasil steam (uap) yang akan menggerakkan turbin guna menghasilkan tenaga listrik .

Pengoperasian yang terus menerus yang dilakukan oleh sebuah unit boiler ini mengakibatkan berbagai permasalahan yang kompleks terjadi pada boiler itu sendiri maupun berbagai peralatan penunjang pada pengoperasian boiler, salah satunya tidak optimalnya pengoperasian suatu peralatan utama maupun penunjang (perpindahan panas yang terjadi pada furnace boiler tidak terjadi dengan sempurna) yang ditimbulkan karena munculnya berbagai penggerak di pipa boiler dan juga tidak optimalnya penyerapan panas pada boiler mini.(Hulu & Rahmawaty, 2021)

Prinsip – prinsip perpindahan panas pada ketel uap merupakan prinsip utama dalam perancangan dan pengembangan pengembangan ketel uap dan juga ketel uap merupakan sebagai alat penukar kalor, karena ketel uap berfungsi mengubah fase uap jenuh dan fase uap super jenuh, dan perubahan fase ini perlu energi untuk merubah enthalphy zat cair yang menghasilkan temperatur dan tekanan semua bisa dihasilkan melalui proses perpindahan panas.(Yohana et al., 2018)

Penelitian dilakukan pada sebuah boiler skala model dengan jenis boiler pipa api model vertikal dimana terjadi perpindahan panas pada boiler skala model dari ruang bakar ke boiler skala model dengan cara koveksi, konduksi dan radiasi. Berdasarkan uraian diatas maka penulis tertarik untuk melakukan penelitian dengan judul “Analisis Perpindahan Panas Pada Boiler Pipa Api Skala Model Dengan Tekanan Uap 7 kg/cm^2 ”

1.2 Perumusan Masalah

Melihat latar belakang, maka penulis dapat ambil beberapa rumusan masalah yang dihadapi yaitu:

- a. Bagaimana proses perpindahan panas yang terjadi pada boiler.
- b. Berapa energi kalor perpindahan panas konveksi dan konduksi yang di hasilkan dalam proses pemanasan air dan perambatan panas.
- c. Berapa energi kalor yang diterima oleh air.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan perumusan masalah pada penelitian ini, penulis mempunyai maksud dan tujuan yaitu:

- a. Menganalisis panas yang masuk ke boiler pipa api skala model.
- b. Menganalisis laju perpindahan panas pada boiler pipa api skala model tekanan 7 kg/cm^2 .
- c. Menganalisis kalor di butuhkan air untuk menjadi uap.

1.4 Hipotesis Penelitian

Adapun hipotesis penelitian yang akan dicapai dalam tugas akhir ini adalah :

- a. Menghasilkan panas yang tinggi masuk ke boiler pipa api skala model.
- b. Memperoleh laju perpindahan panas pada boiler pipa api skala model tekanan 7 kg/cm^2 .
- c. Memperoleh spesifikasi kalor yang dibutuhkan air untuk menjadi uap.

1.5 Manfaat Penelitian

Dalam penelitian ini, dikemukakan beberapa manfaat yaitu :

1.4.1 Manfaat Ilmiah

- a. Untuk memberi kontribusi terhadap perkembangan ilmu pengetahuan yang ada relevansinya dengan bidang ilmu yang sedang dipelajari misalnya.
- b. menerapkan ilmu yang telah dipelajari di bangku kuliah dan mengetahui kebutuhan bahan bakar, dengan menerapkan dengan dunia kerja.
- c. dapat membantu perusahaan dalam menyelesaikan masalah yang terjadi pada boiler, dan sebagai bahan pembelajaran bagi mahasiswa.

1.4.2 Manfaat Praktis

Mengetahui pengaplikasian ilmu perpindahan panas (kalor) dalam permasalahan yang nyata terjadi pada suatu boiler skala model.

BAB II

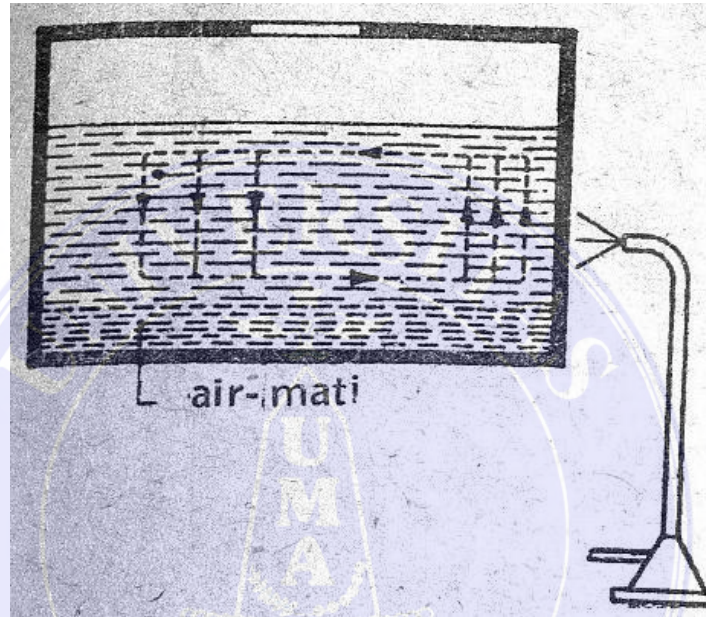
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Boiler

Boiler salah satu peralatan utama dari PLTU yang berfungsi untuk merubah air menjadi uap superheat yang bertemperatur dan bertekanan tinggi. Proses memproduksi uap ini disebut pembuat uap (*steam raising*). Unit atau alat yang digunakan untuk membuat uap disebut Boiler atau lebih tepat pembangkit uap (*steam generator*). Klasifikasi boiler secara umum dibagi dua yaitu, boiler pipa api dan boiler pipa air. Jenis boiler pipa api banyak di gunakan oleh industry yang memerlukan tekan uap yang relative rendah, misalnya pabrik-pabrik gula. Sedangkan jenis pipa air digunakan oleh industri atau pembangkit listrik yang memerlukan tekanan uap yang tinggi, misalnya pada pusat-pusat listrik tenaga uap. Supaya konstruksi dari ketel dapat dipahami betul-betul, haruslah diketahui sifat-sifat dari uap dan peristiwa pembentukan pada uap, dalam bentuknya yang sederhana, dapat dimisalkan ketel uap sebagai tong logam yang sebahagian berisi dengan air.(Saputra & Ferdian, 2020)

Air merupakan fluida yang sukar untuk merambat panas, sehingga dengan demikian perpindahan panas didalam air yang ada didalam ketel uap hampir berlangsung secara konveksi. Bila didalam sebuah tempat terdapat air dingin didalamnya, yang kemudian dipanasi pada bagian bawahnya maka air akan menjadi panas. Air menjadi panas karena berat jenisnya menjadi berkurang, maka akan naik keatas. Dibekas tempatnya akan digantikan oleh air dingin dibagian atas, yang berat jenisnya lebih besar dibandingkan dengan air panas tersebut. Air yang

tidak turut beredar dalam ketel dinamai air yang tidak bersirkulasi, jadi temperatur air ini tidak secepat air yang beredar naiknya. Ini dapat membahayakan bagi ketel karena dinding ketel juga tidak akan rata panas. Pemuaian ketel tidak sama dan karena ini mungkin terjadi tekanan-tekanan yang besar dalam pelat-pelat ketel ataupun pada sambungan-sambungannya dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2.1. Air yang tidak bersirkulasi.

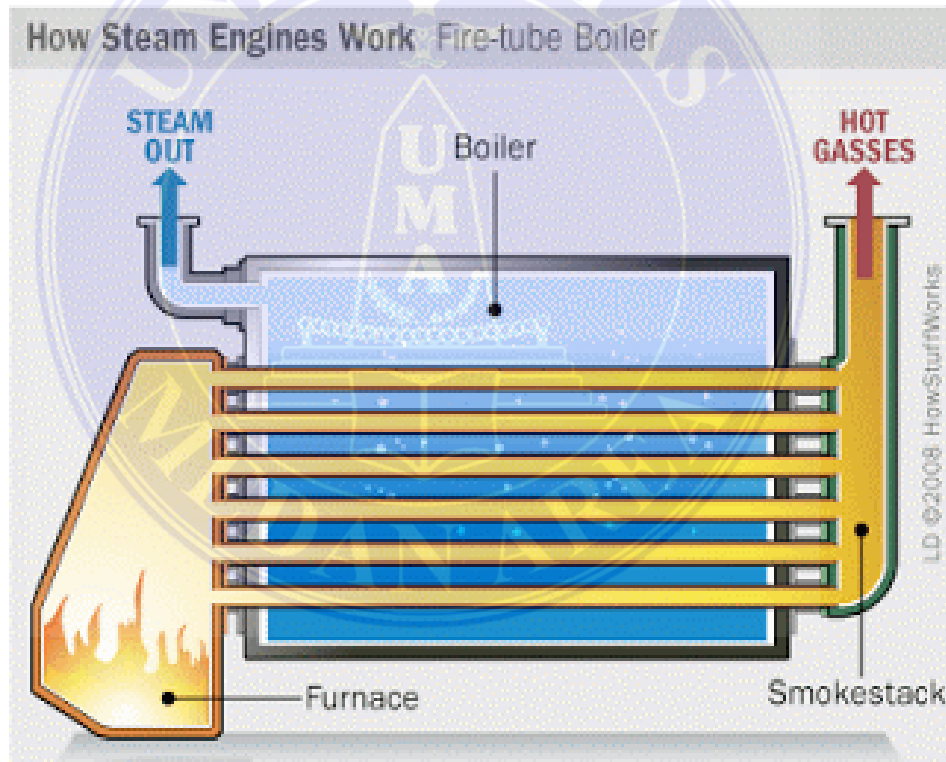
Gambar 2.1. memperlihatkan bagaimana pengaruh letak pemanas pada peredaran air. Ketika seluruh temperatur air $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, gelembung-gelembung uap yang dibentuk dalam seluruh zat cair, sampai pada permukaan dan lepas dari zat cair, karena tong ini terbuka, uap yang terbentuk lepas keluar melalui bahagian yang terbuka. Dikatakan sekarang air mendidih. Jadi mendidih adalah suatu peristiwa dimana pembentukan uap terjadi didalam seluruh massa zat-cair. Titik didih dari suatu zat cair tergantung kepada tekanan yang dilakukan pada permukaan zat cair. Pada tong yang terbuka, tekanan udara luar yang dilakukan pada permukaan air, besarnya 1 atmosfer ($1,0332\text{ kg/cm}^2$) pada tekanan ini air mendidih pada $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, kalau tekanan lebih besar dari 1 atm umpamanya 5 kg/cm^2 , air akan mendidih pada

temperatur 151,1 °C. Bila tekanan rendah dari 1 atm, umpamanya 0,12575 kg/cm² air mendidih pada temperatur 50 °C.(Hakim, 2016)

2.2 Jenis-jenis Boiler

2.2.1 Boiler Pipa Api

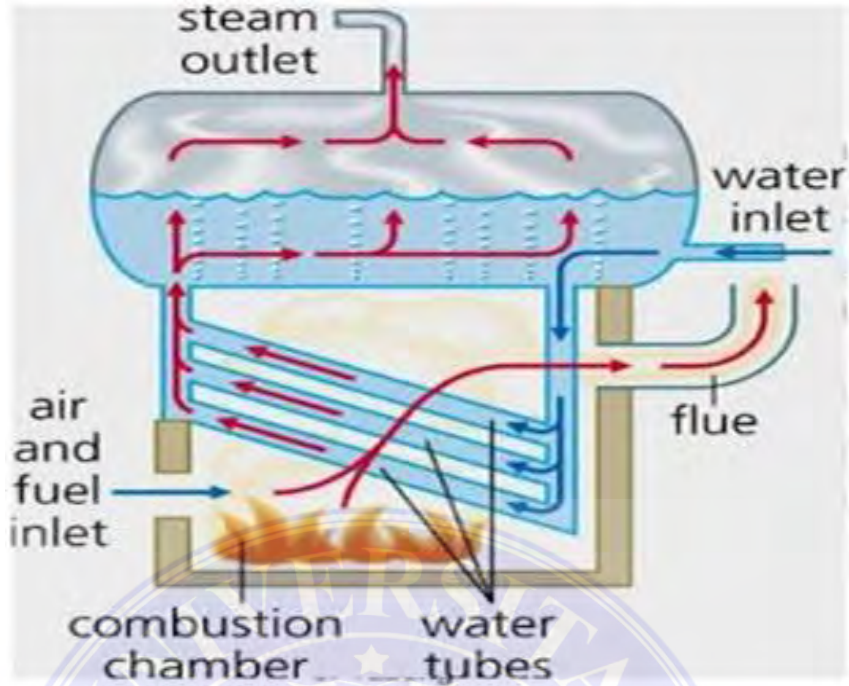
Pada jenis boiler pipa api, gas panas hasil pembakaran (flue gas) mengalir melalui pipa-pipa yang di bagian luarnya diselubungi air sehingga terjadi perpindahan dari gas panas ke air dan berubah menjadi uap. Gambar 2.1. menunjukkan boiler pipa api.



Gambar 2.2. Boiler pipa api

2.2.2 Boiler Pipa Air

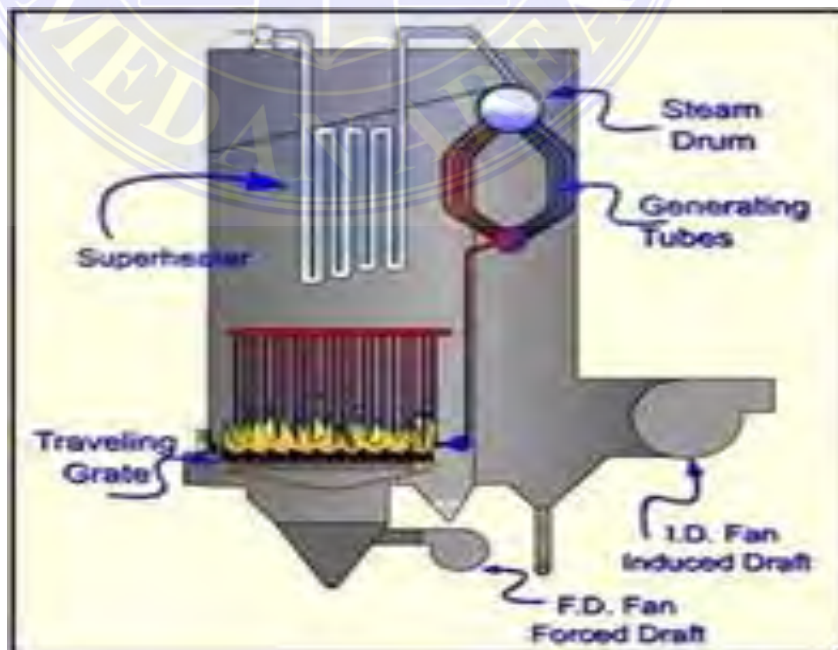
Pada Boiler jenis ini, air berada di dalam pipa sedangkan gas panas berada di luar pipa. Boiler pipa air dapat beroperasi dengan tekanan sangat tinggi (lebih dari 100 Bar). Gambar boiler pipa air dapat dilihat pada gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.3. Boiler uap pipa air

2.2.3 Boiler Jenis Stoker

Pada boiler stoker (2.3) pembakarannya di tempatkan diatas rantai seperti rantai tank yang berjalan, serta bentuk-bentuk modifikasinya. Boiler jenis ini mempunyai efisiensi antara 80%-85%.



Gambar 2.4. Boiler jenis stoker

2.2.4 Boiler jenis pulverizer

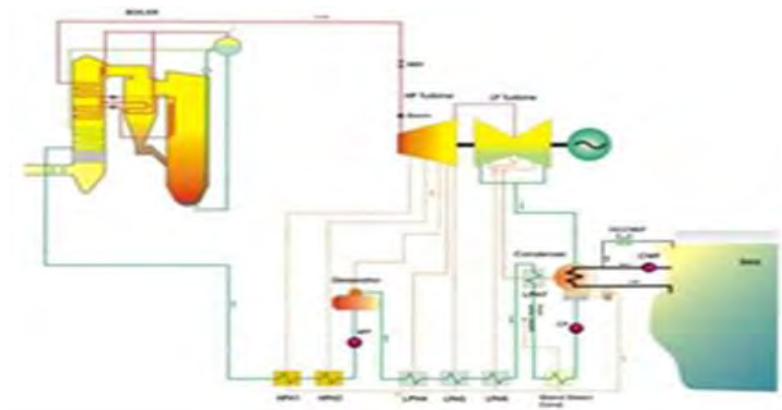
Boiler jenis *pulverizer* (2.4), sering disebut PC (*Pulverizer Combustion*) Boiler. Batubara ditepungkan terlebih dahulu kemudian disemprotkan keruang bakar sehingga mengapung dan terbakar di tengah-tengah ruang bakar. Boiler jenis ini mempunyai efisiensi sekitar 90 %.



Gambar 2.5. Boiler jenis *pulverizer*

2.2.5 Boiler jenis CFB

Boiler jenis Circulating Fluidize Bed (CFB) pada gambar 2.5, Boiler ini ukuran diameter batu baranya sekitar 30 mm dan dilengkapi dengan cyclone diantara ruang bakar dan outlet asapnya. Fungsi *cyclone* untuk memisahkan (separator) gas untuk di buang melalui cerobong asap dan partikel yang tidak terbakar untuk di kembalikan ke ruang bakar. Boiler jenis ini efisiensinya sekitar 92 %.



Gambar 2.6. Boiler jenis CFB.

Prinsip kerja dasar CFB boiler yaitu batubara dan *desulfurizer (limestone)* yang disupley ke dalam furnace kemudian di bakar, dan pada saat itu terjadilah proses desulfurisasi. Batubara dan *desulfurizer* ikut terbawa keatas bersama flue gas dan melepaskan panas ke *water wall* dan permukaan penyerap nas yang lain. Partikel-partikel yang berukuran besar, jatuh kembali ke furnace karena beratnya sendiri, sedangkan partikel yang berukuran kecil masuk kedalam *cyclone* separator. Campuran zat padat dan gas yang masih berukuran besar akan jatuh ke bawah cyclone separator dan dikembalikan lagi ke dalam furnace untuk dibakar kembali. Sedangkan partikel-partikel halus akan terbang bersama flue gas menjadi *back pass/heat recovery* area untuk memanaskan separator, *economizer* dan air heater. Setelah itu flue gas akan dibuang keudara atmosfer setelah melewati *electrostatic presipitator*.(Prasetya, 2020)

2.3 Perpindahan Panas Secara Umum

Didalam ketel terdapat perpindahan kalor dari sumber panas terhadap bidang pemanas, dari bidang pemanas dihantarkan lagi ke air secara konveksi. Perpindahan kalor secara konduksi dari sebagian panas diabaikan. Untuk mencari luas penampang tabung pipa api boiler menggunakan rumus sebagai berikut :

$$A = 2\pi \times r (r \times t) \dots\dots\dots(2.1)$$

2.3.1 Perpindahan kalor secara Radiasi

Radiasi *thermal* adalah energi yang diemisikan oleh benda yang berada pada temperatur tinggi, dimana merupakan perubahan dalam konfigurasi elektron dari atom. Energi dari medan radiasi ditransportasikan oleh gelombang elektromagnetik atau lainnya. *Photon* berasal dari energi dalam sebuah elektron yang memancar. Pada perpindahan panas konduksi dan konveksi adalah mutlak membutuhkan media. Sedangkan pada perpindahan

panas radiasi tidak diperlukan media. Kenyataannya perpindahan panas radiasi lebih efektif terjadi pada ruanghampa, laju perpindahan kalor dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$R_{\text{rad}} = \varepsilon_1 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

Q_{rad} = Laju perpindahan panas radiasi (W)

ε_1 = Emisivitas (0,61)

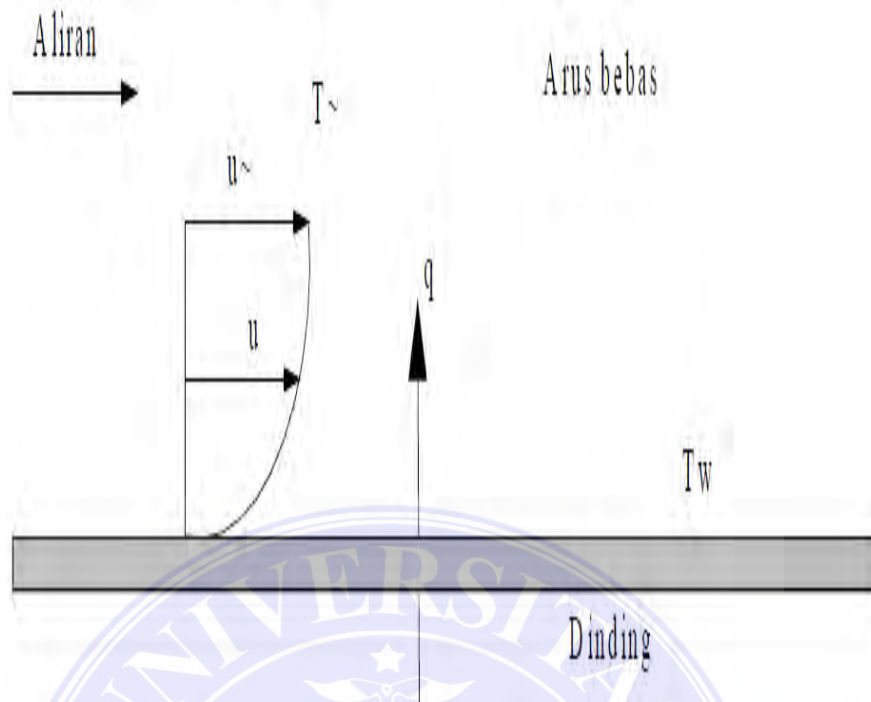
σ = Konstanta Boltzmann ($5,669 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

A_1 = Luas Penampang (m^2)

$T_1 - T_2$ = Perbedaan temperatur (K).

2.3.2 Perpindahan kalor secara konveksi

Sebuah pelat logam panas akan cepat menjadi dingin apabila ditempatkan didepan sebuah kipas angin dibandingkan jika hanya dibiarkan di udara diam. Kita sebut bahwa kalor dikonveksi keluar dan kita sebut proses perpindahan kalor konveksi. Misalkan sebuah pelat dipanaskan seperti gambar 2.6. Suhu pelat adalah T_w dan suhu fluida T , kecepatan aliran terlihat pada gambar. Kecepatan aliran berkurang sampai nol pada pelat karena efek gaya viskos. Karena kecepatan lapisan fluida pada dinding nol, kalor hanya ditransfer dengan cara konduksi pada titik ini. Karena itu bisa menggunakan persamaan (2.1) dengan konduktivitas termal fluida dan gradien temperatur fluida pada dinding. Namun kita tetap menyebutnya konveksi karena gradient temperatur bergantung atas laju fluida dalam mengambil kalor.



Gambar 2.7. Perpindahan kalor konveksi dari suatu plat.

Efek keseluruhan konveksi, dirumuskan dengan Hukum Newton tentang pendinginan:

$$q = hA (T_w - T_\infty) \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana :

Q = Laju Perpindahan Panas (kj/s atau W)

H = Koefisien perpindahan Panas Konveksi ($W/m^2.K$)

A = Luas Bidang Permukaan Perpindahan Panas (m^2)

T_w = Temperature Dinding (K)

T_∞ = Temperature Sekeliling (K)

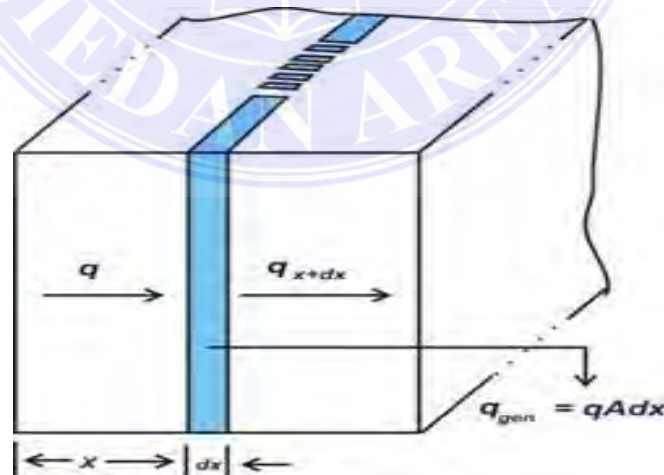
Tanda minus (-) digunakan untuk memenuhi hukum I Thermodinamika, sedangkan panas yang dipindahkan selalu mempunyai tanda positif (+). Pada persamaan ini, laju perpindahan kalor dikaitkan dengan perbedaan temperatur menyeluruh antara dinding dan fluida dan luas permukaan. Besaran h disebut koefisien perpindahan kalor konveksi. Untuk kondisi kompleks, harga h ditentukan

secara eksperimen. Koefisien perpindahan kalor kadang-kadang disebut juga konduktansi film.

Satuan h adalah W per meter kwadrat per derajat Celsius, jika aliran kalor dalam Watt. Dari pembahasan diatas, dapatlah diharapkan bahwa perpindahan kalor konveksi bergantung pada viskositas fluida. Jika suatu plat panas dibiarkan berada diudara sekitar tanpa ada sumber gesekan dari luar, maka udara itu akan bergerak sebagai akibat terjadinya gradien densitas didekat plat itu. Peristiwa ini dinamakan Konveksi alamiah untuk membedakannya dengan konveksi paksa yang terjadi apabila udara itu dihembuskan diatas plat itu dengan blower.

2.3.3 Perpindahan Kalor secara Konduksi

Jika pada suatu benda terdapat gradient suhu (*temperature gradient*), maka menurut pengalaman akan terjadi perpindahan energi dari bagian bersuhu tinggi ke bagian bersuhu rendah. Katakan bahwa energi berpindah secara konduksi (*conduction*) atau hantaran dan bahwa laju perpindahan kalor itu berbanding dengan gradien suhu normal dapat dilihat pada gambar 2.7 berikut.



Gambar 2.8. Volume unsur untuk analisis konduksi kalor satu dimensi

Katakan bahwa energi ber pindah dengan cara konduksi (*conduction*) atau hantaran dan bahwa laju perpindahan kalor itu berbanding dengan gradien suhu

normal.

$$\frac{q}{A} = - \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots(2.4)$$

Jika dimasukkan konstanta proporsionalitas (proportionality constant) atau tetapan sebanding, maka :

$$q = - kA \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

q = Laju Perpindahan Panas (kj/s)

k = Konduktifitas Termal (W/m. K)

A = Luas Penampang (m²)

dT = Perbedaan Temperatur (°C)

dX = Perbedaan Jarak (m)

dT/dX adalah Gradient temperatur kearah perpindahan kalor. konstanta positif "k" disebut konduktifitas atau kehantaran termal benda itu, sedangkan tanda minus disisipkan agar memenuhi hukum kedua termodinamika, yaitu bahwa kalor mengalir ketempat yang lebih rendah dalam skala temperatur.(Prasetya, 2020)

Hubungan dasar aliran panas melalui konduksi adalah perbandingan antara laju aliran panas yang melintas permukaan isothermal dan gradient yang terdapat pada permukaan tersebut berlaku pada setiap titik dalam suatu benda pada setiap titik dalam suatu benda pada setiap waktu yang dikenal dengan hukum *fourier*. Dalam penerapan Hukum *Fourier* (persamaan 2.2) pada suatu dinding datar, jika persamaan tersebut diintegrasikan maka akan didapatkan :

$$q = - \frac{kA}{\Delta x} (T_2 - T_1) \dots\dots\dots(2.6)$$

Bilamana konduktivitas termal (*thermal conductivity*) dianggap tetap. Tebal dinding adalah Δx , sedangkan T_1 dan T_2 adalah temperatur muka dinding. Jika

konduktivitas berubah menurut hubungan linear dengan temperatur, seperti maka persamaan aliran kalor menjadi:

$$q = - \frac{k_{0A}}{\Delta x} [(T_2 - T_1) + \frac{\beta}{2} (T_2^2 - T_1^2)] \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana :

- q = Perpindahan kalor (watt)
- k_{0A} = Koefisien luas penampang (W/m.K)
- $T_2 - T_1$ = Perbedaan temperatur (°C)
- Δx = Perubahandalamgerakan.

2.3.4 Konduktivitas Termal

Tetapan kesebandingan (k) adalah sifat fisik bahan atau material yang disebut konduktivitas termal Persamaan (2.2) 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.

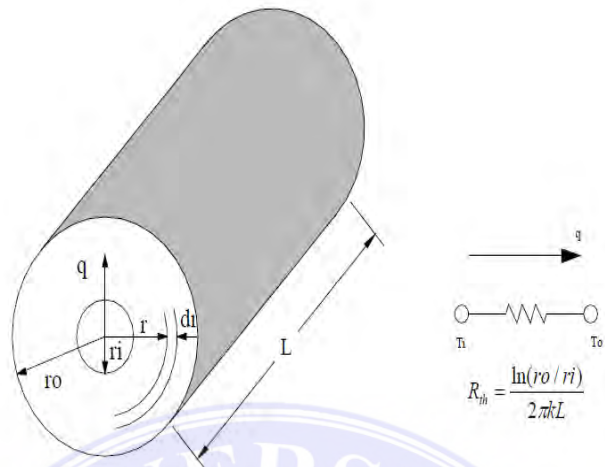
2.3.4 Bidang Silinder

Perhatikan suatu silinder Panjang dengan jari-jari dalam r_i , jari-jari luar r_o , dan panjang L , seperti pada gambar 2.17. Silinder mengalami beda suhu $T_i - T_o$. Untuk silinder yang panjangnya sangat besar di bandingkan dengan diameternya, dapat diandaikan bahwa aliran kalor berlangsung menurut arah radial, sehingga koordinat ruang yang diperlukan untuk menentukan sistem ini adalah r . Hukum *Fourier* digunakan lagi dengan menyisipkan rumus luas yang sesuai. Luas bidang aliran kalor dalam sistem silinder adalah.

$$A_r = 2\pi rL \dots \dots \dots (2.8)$$

Sehingga hukum *Fourier* menjadi :

$$q_r = - kA_r \frac{dT}{dr} \dots\dots\dots(2.9)$$



Gambar 2.9. Aliran kalor satu dimensi melalui silinder bolong dan analogi listriknya.

$$q_r = - 2\pi krL \frac{dt}{dr} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dengan kondisi batas :

$$T = T_1 \text{ pada } r = r_1$$

$$T = T_0 \text{ pada } r = r_0$$

Penyelesaian persamaan 2.8 adalah sebagai berikut

$$q = \frac{2\pi kL (T_1 - T_0)}{\ln(r_0/r_1)} \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana :

q = Laju perpindahan kalor (W)

k = Konduktivitas termal benda (W/m. °C)

L = Panjang benda (m)

(T₁ – T₀) = Beda temperature dalam silinder dengan luar silinder (°C)

r₀ = Jari – jari luar silinder (m)

r₁ = Jari – jari dalam silinder (m)

dt/dr = Gradient temperatur kearah perpindahan kalor (K.m⁻¹)

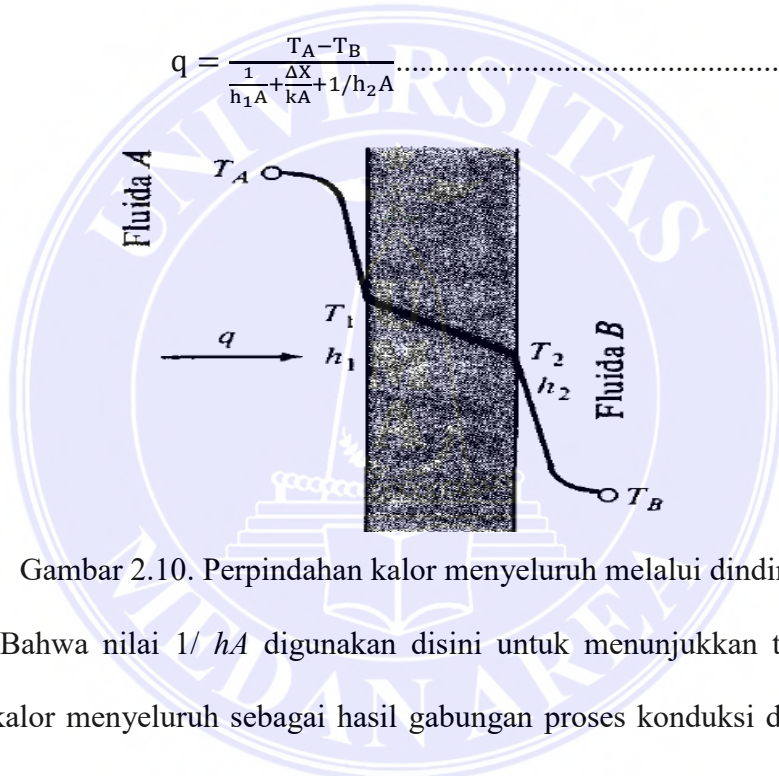
2.3.5 Perpindahan Kalor Menyeluruh

Perhatikan dinding datar seperti pada gambar, dimana pada satu sisinya terdapat fluida panas A, dan pada sisi lainnya fluida B yang lebih dingin. Perpindahan kalor di nyatakan oleh.

$$q = h_1A(T_A - T_1) = \frac{kA}{\Delta x} (T_1 - T_2) = h_2A (T_2 - T_b) \dots \dots \dots (2.12)$$

proses perpindahan kalor dapat digambarkan dengan jaringan tahanan seperti pada gambar 2.10. perpindahan kalor menyeluruh dihitung dengan jalan membagi beda pada suhu menyeluruh dengan jumlah tahanan termal :

$$q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_1A} + \frac{\Delta x}{kA} + \frac{1}{h_2A}} \dots \dots \dots (2.13)$$



Gambar 2.10. Perpindahan kalor menyeluruh melalui dinding datar.

Bahwa nilai $1/hA$ digunakan disini untuk menunjukkan tahanan konveksi aliran kalor menyeluruh sebagai hasil gabungan proses konduksi dan konveksi bisa dinyatakan dengan koefisien perpindahan kalor menyeluruh U , yang dirumuskan dalam hubungan.

$$q = U A \Delta T \dots \dots \dots (2.14)$$

dimana A ialah luas bidang aliran kalor. koefisien perpindahan kalor menyeluruh ialah :

$$q = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}} \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana :

- q = Laju Perpindahan kalor (watt)
- U = Koefisien perpindahan kalor menyeluruh ($W/m^2.K$)
- A = Luas perpindahan panas (m^2)
- k = Konduktifitas Termal ($W/m.K$)
- $\Delta x/\Delta t$ = Perbedaan tebal dinding (m)
- h_1/h_2 = Koefisien perpindahan panas konveksi ($W/m^2.K$)

Untuk silinder bolong yang terkena lingkungan konveksi dipermukaan bagian dalam dan luarnya, analogi tahanan listriknya dimana disini pun T_A dan T_B ialah suhu kedua fluida.(Prasetya, 2020)

2.4 Panas Yang Masuk Dari Bahan Bakar

Boiler pipa api skala model pada penelitian ini peneliti menggunakan boiler pipa api skala model dengan bahan bakar kulit kemiri dimana memiliki LHV bahan bakar kemiri terlihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1. Nilai kalor cangkang kemiri

Cangkang Kemiri	Nilai Kalor (Kkal/kg)
Karbonisasi	7810
Non Karbonisasi	5246

Untuk mencari nilai panas yang masuk dari bahan bakar dengan menggunakan rumus berikut.

$$Q_{in} = \dot{m}_{bb} \times LHV \dots \dots \dots (2.16)$$

Dimana :

- Q_{in} = Panas yang masuk (Watt)
- \dot{m}_{bb} = Massa bahan bakar (kg/s)

LHV = Nilai pemanasan yang lebih rendah (kj/kg).(Susastrawan D & Prabowo, 2016)

2.5 Kalor Yang Digunakan Air Untuk Menjadi Uap

Boiler pipa api skala model yang digunakan adalah jenis air biasa tanpa menggunakan campuran, maka dengan itu untuk mendapatkan nilai kalor yang digunakan air untuk menjadi uap dengan menggunakan rumus berikut:

$$Q_{air} = m c_p (T_{akhir} - T_{awal}) \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana:

Q_{air} = kalor yang digunakan air (watt)

M = massa (kg)

C_p = kalor jenis (kj/kg.K)

T_{awal} = suhu awal (K)

T_{akhir} = suhu akhir (K)

Berdasarkan kekekalan energi, maka laju perpindahan panas dapat ditentukan: (Panas et al., 2020).

$$Q_{in} = Q_{out} \dots\dots\dots(2.18)$$

2.6 Prinsip Kerja Boiler

Boiler adalah suatu petrangkat mesin yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap. Proses perubahan air menjadi uap terjadi dengan memanaskan air yang berada di dalam pipa dengan memanfaatkan panas dari hasil pembakaran bahan bakar. Pembakaran dilakukan secara kontiniu didalam ruang bakar dengan mengalirkan bahan bakar dan udara dari luar. Uap yang dihasilkan boiler adalah uap

superheat dengan tekanan dan temperatur yang tinggi. Jumlah produksi uap tergantung pada luas permukaan pemindah panas, laju aliran dan panas pembakaran yang diberikan. Ketel uap (boiler) yang konstruksinya terdiri dari pipa-pipa berisi air disebut water tube boiler. Pada unit pembangkit, boiler juga biasa disebut dengan steam generator (pembangkit uap) mengingat arti kata boiler hanya pendidih, sementara pada kenyataannya dari boiler dihasilkan uap superheat bertekanan tinggi. (Panas et al., 2020)

2.7 Proses Pembentukan Uap

Uap air adalah sejenis fluida yang merupakan fase gas dari air, bila mengalami pemanasan sampai temperatur didih di bawah tekanan tertentu. Uap air tidak berwarna, bahkan tidak terlihat bila dalam keadaan murni kering. Uap air di pakai pertama sekali sebagai fluida kerja adalah oleh James Watt yang terkenal sebagai penemu mesin uap torak. Jumlah energi panas yang diberikan selama proses transformasi BC yang berlangsung tanpa kenaikan panas suhu disebut panas lebur, sebenarnya 80 kkal/kg. Titik 0°C disebut titik lebur (titik beku) es. Bila panas diteruskan terhadap 1 kg air pada 0°C (titik C) maka temperatur air akan naik sampai 100°C dibawah tekanan standart, seperti diperlihatkan oleh garis CD. (Saputra & Ferdian, 2020)

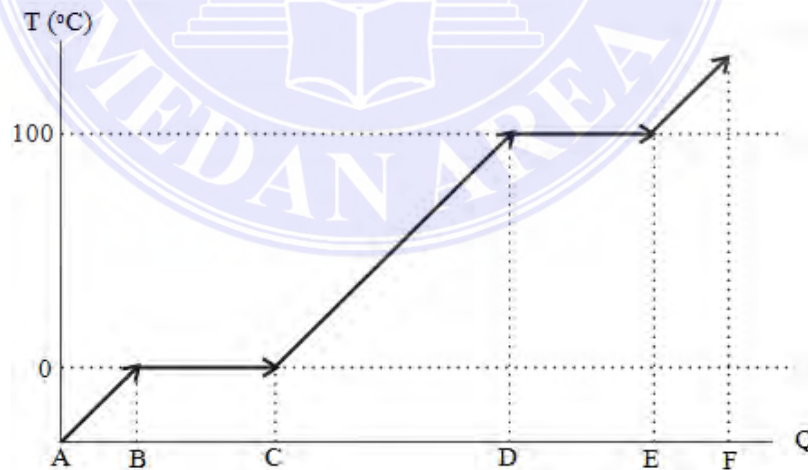
Bila proses pemanasan (penambahan energi panas) dilanjutkan sesuai garis DE dibawah tekanan standar, akan terlihat bahwa temperatur tidak berubah. Sebagian dari air berubah menjadi uap (fasa gas), jadi selama berlangsungnya penambahan energi panas pada fasa campuran ini, temperatur tidak naik tetapi energi panas terserap ke dalam proses. Akhir dari proses fasa campuran ini ialah

terbentuknya uap air secara keseluruhan (disebut air mendidih) pada titik E. titik E ditandai oleh suhu 100 °C dan standar tekanan 1 atm. Angka 100 disebut titik didih air dibawah tekanan 1 atm (101,325 kPa).

Jumlah energi yang terserap selama proses transformasi DE disebut panas penguapan (panas laten) yang besarnya 538,9 kkal/kg. kondisi uap pada 1,033 kg/cm² absolut dan 100 °C disebut kondisi jenuh (saturasi). Uap yang terbentuk pada suhu dan tekanan saturasi disebut uap saturasi. Bila pemanasan (pemberian energi panas) dilanjutkan dibawah tekanan standar yang konstan maka suhu uap akan naik, sesuai dengan garis proses EF. Uap yang dihasilkan pada kondisi F disebut uap panas. Keuntungan penggunaan uap sebagai media kerja adalah :

- a. Mempunyai kemampuan untuk menerima kalor dalam jumlah yang besar.
- b. Dapat bekerja pada tekanan tinggi.
- c. Cepat menghantarkan panas.

Proses pembentukan uap dapat dilihat pada gambar berikut ini :



Gambar 2.11. Grafik proses pembentukan uap.

Dimana :

AB = Tambahan kalor menaikkan suhu es sampai 0 °C

BC = Tambahan kalor mencairkan es menjadi air

CD = Tambahkan kalor menaikkan suhu air dari 0 °C sampai 100 °C dibawah pemanasan hingga (100°C dibawah tekanan 1 atm = 1,003kg/cm) dimana proses ini terjadi pada *sensible heat*.

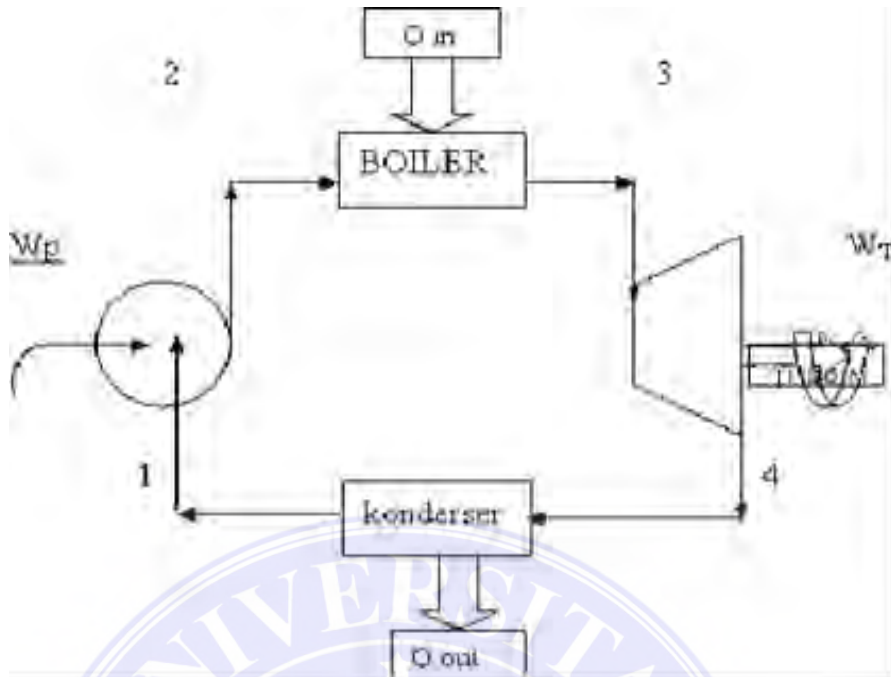
DE = Tambahkan kalor menguapkan air, panas yang diberikan merubah fase dari 100 °C air menjadi 100 °C uap jenuh (pada *later heat*).

EF = Tambahkan kalor menaikkan suhu uap, panas yang diberikan menaikkan suhu 100 °C uap jenuh menjadi uap kering (pemanas uap lanjut) pada proses *sensible heat*.

Pada tekanan 1 atm dan 100 °C air akan berubah menjadi uap dan apabila dipanaskan terus-menerus maka seluruhnya akan berubah menjadi uap, pada pemanasan air dari temperature 0 °C menjadi 100 °C dibutuhkan kalor (Q).(Susastrawan D & Prabowo, 2016)

2.8 Siklus rankine

Siklus Rankine setelah diciptakan, langsung diterima sebagai standart untuk pembangkit daya yang menggunakan uap. Siklus Rankine nyata yang digunakan dalam instalasi pembangkit daya jauh lebih rumit dari pada siklus Rankine ideal asli sederhana. Siklus ini merupakan siklus yang paling banyak digunakan untuk pembangkit daya listrik dewasa ini, Siklus Rankine adalah siklus uap-cair, maka paling baik bila siklus ini digambarkan pada kedua diagram, P-V dan T-S (Gambar 2.12) dengan garis-garis yang menunjukkan uap-jenuh dan cairan-jenuh.(Susastrawan D & Prabowo, 2016)



Gambar 2.12. Siklus Rankine.

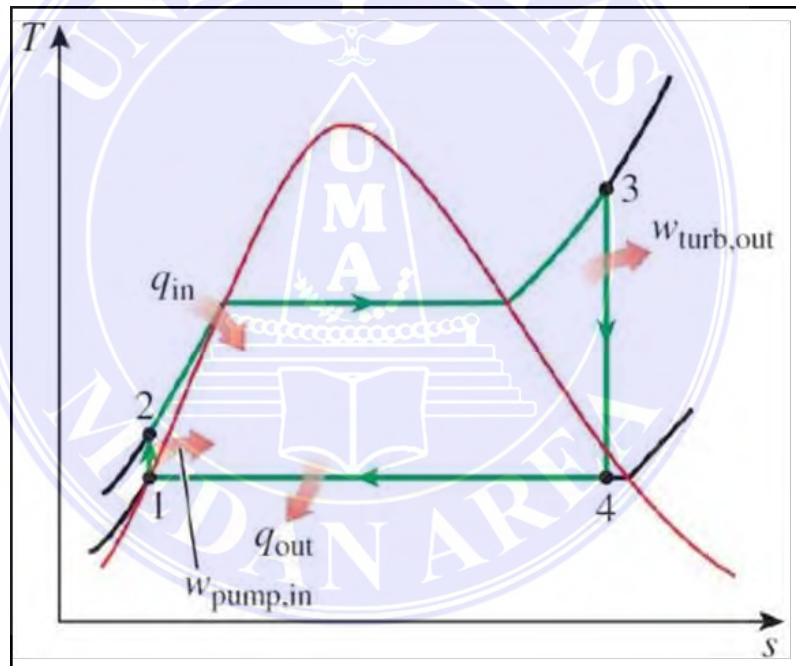
Proses yang terjadi pada gambar diatas merupakan:

- a. Proses 1 ke 2 : Fluida dipompa dari bertekanan rendah ketekanan tinggi dalam bentuk cair. Proses ini membutuhkan sedikit input energi.
- b. Proses 2 ke 3: Fluida cair bertekanan tinggi masuk keboiler dimana fluida dipanaskan hingga menjadi uap pada tekanan konstan menjadi uap jenuh.
- c. Proses 3 ke 4: Uap jenuh bergerak menuju turbin, menghasilkan energi listrik. Hal ini mengurangi temperatur dan tekanan uap, dan mungkin sedikit kondensasi juga terjadi.
- d. Proses 4 ke 1 : Uap basah memasuki kondenser dimana uap diembunkan dalam tekanan dan temperatur tetap hingga menjadi cairan jenuh.

Siklus ideal yang terjadi didalam turbin adalah siklus Rankine Air pada siklus 1 dipompakan, kondisinya adalah isentropik $S_1 = S_2$ masuk ke boiler dengan tekanan yang sama dengan tekanan di kondenser tetapi Boiler menyerap panas sedangkan kondenser melepaskan panas, kemudian dari boiler masuk keturbin

dengan kondisi super panas $h_3 = h_4$ dan keluaran dari turbin berbentuk uap jenuh dimana laju aliran massa yang masuk ke turbin sama dengan laju aliran massa keluar dari turbin, ini dapat digambarkan dengan menggunakan diagram T-S pada Gambar 2.13. Proses proses yang terjadi dari diagram tersebut diatas adalah sebagai berikut:

- a. Proses 1-2 : Proses kompresi isentropis pada kompresor.
- b. Proses 2-3 : Proses pembakaran pada tekanan konstan (*isobar*) Didalam ruang bakar, adanya pemasukan panas.
- c. Proses 3-4 : Proses ekspansi isentropik pada turbin.
- d. Proses 4-1 : Proses pelepasan kalor pada tekanan konstan.



Gambar 2.13. Diagram Temperatur T-S.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu

3.1.1 Tempat

Penelitian ini dilaksanakan dilaboratorium Teknik Mesin Universitas Medan Area yang beralamat di jalan kolam No.1 Medan Estate, Telp.7366878, 7357771, Medan Kec. Percut Sei Tuan, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara 20223.

3.1.2 Waktu

Penelitian ini dilaksanakan sejak tanggal pengesahan usulan oleh pengelola program studi sampai dinyatakan selesai yang direncanakan berlangsung selama waktu yang akan ditentukan. Waktu kegiatan penelitian dapat dilihat pada tabel.

Tabel 3.1. Jadwal Penelitian.

No	Kegiatan	Waktu (Bulan)								
		Jun	Jul	Agu	Sep	Okt	Nov	Dec	Jan	
1	Studi Literatur									
2	Penyusunan Proposal									
3	Seminar Proposal									
5	Pengujian Nilai Kalor									
6	Pengumpulan Data									
7	Analisa Data									
8	Laporan Penulisan									
9	Seminar Hasil									
10	Perbaikan									
11	Ujian Sidang									

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

Adapun alat yang digunakan dalam proses analisis perpindahan panas pada boiler pipa api skala model dengan tekanan uap 700 kPa.

- a. Pressure Gauge digunakan sebagai alat ukur tekanan pada boiler skala model.



Gambar 3.1. Pressure Gauge

- b. Thermometer digunakan untuk mengukur suhu air dan uap pada boiler skala model.



Gambar 3.2. Thermometer

- c. Sight Glass digunakan untuk melihat air yang terdapat di dalam boiler skala model sehingga memudahkan mengetahui air di dalam masih tersedia atau sudah habis.



Gambar 3.3. Sight Glass

- d. Safety Valve digunakan untuk sebagai pengaman pada boiler dimana berfungsi membuang uap apabila tekanan yang terjadi pada boiler skala model melebihi dari kapasitas yang telah di tentukan pada boiler skala model.



Gambar 3.4. Safety Valve

- e. Plat besi digunakan pada ruang pembakaran boiler skala model sebagai dan plat yang di gunakan berukuran 12 mm.



Gambar 3.6. Plat Besi.

- f. Besi beton digunakan pada ruang bakar sebagai letak nya bahan bakar pada ruang bakar.



Gambar 3.7. Besi Beton.

- g. Pipa ASTM digunakan pada body boiler dan pipa api didalam body boiler karena pipa astm tahan terhadap panas. dan pada boiler menggunakan berbagai ukuran.



Gambar 3.8. Pipa ASTM.

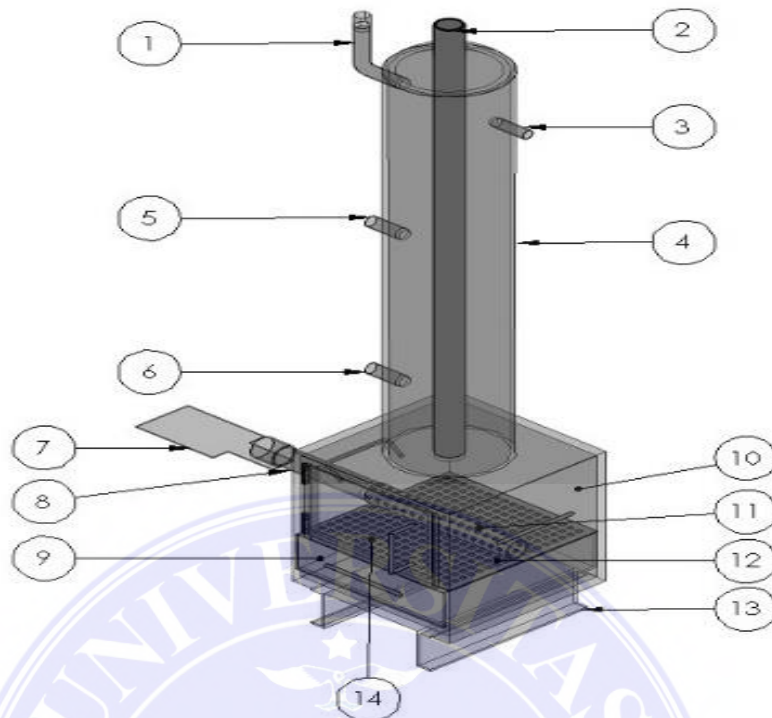
- h. Thermo gun berfungsi untuk mengukur suhu ruangan dan dinding boiler.



Gambar 3.5. Thermo gun.

3.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan pada saat penelitian dapat dilihat pada gambar 3.6 berikut.

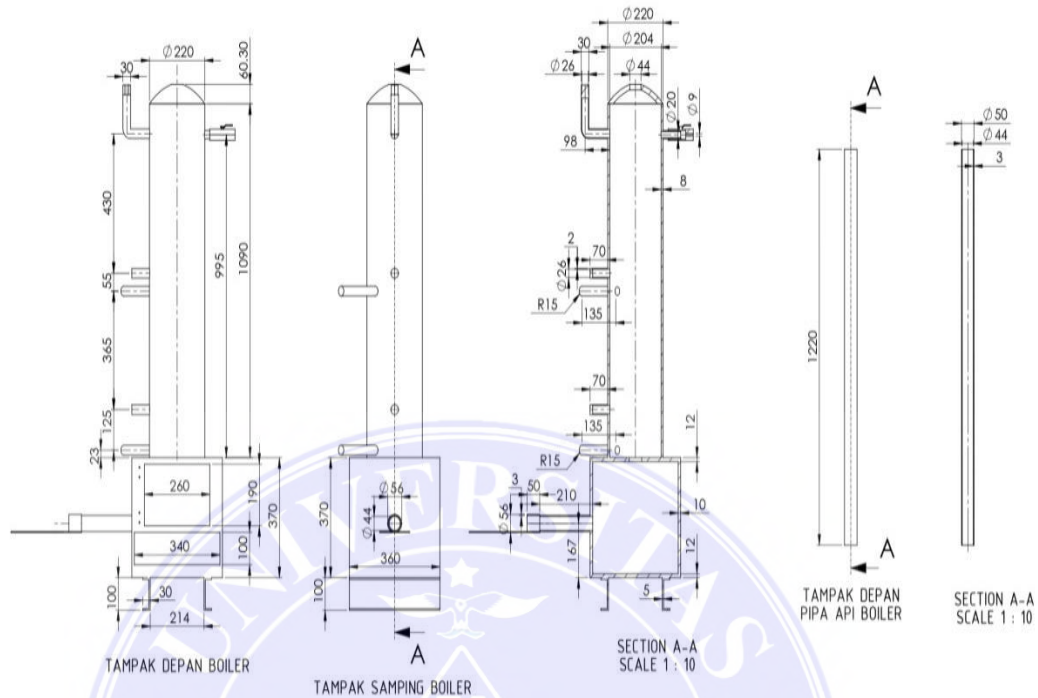


Gambar 3.6. Boiler.

Berikut merupakan keterangan bahan yang digunakan pada saat penelitian. Spesifikasi bahan penelitian dapat dilihat pada tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2. Spesifikasi gambar boiler skala model

No	Bagian
1	Safety valve
2	Pipa api
3	Pressure gauge
4	Tabung boiler
5	Sight glass
6	Thermometer
7	Dudukan blower
8	Pipa blower
9	Tempat penampungan sisa pembakaran
10	Ruang bakar
11	Pipa blower di dalam ruang bakar
12	Saringan boiler
13	Dudukan boiler
14	Pintu ruang bakar



Gambar 3.7. Sketsa Boiler.

3.3. Metode Penelitian

Pada penelitian ini peneliti menggunakan metode merancang boiler skala model dan melakukan eksperimen pada boiler skala model yang telah di rancang oleh peneliti.

Dalam pengambilan data pada penelitian ini dilakukan dengan cara sebagai berikut:

- a. Set-up Alat boiler skala model.
- b. Mengisi air kedalam tabung boiler skala model menggunakan pompa.
- c. Menghidupkan api pada ruang bakar dengan menggunakan bahan bakarcangkang kemiri.

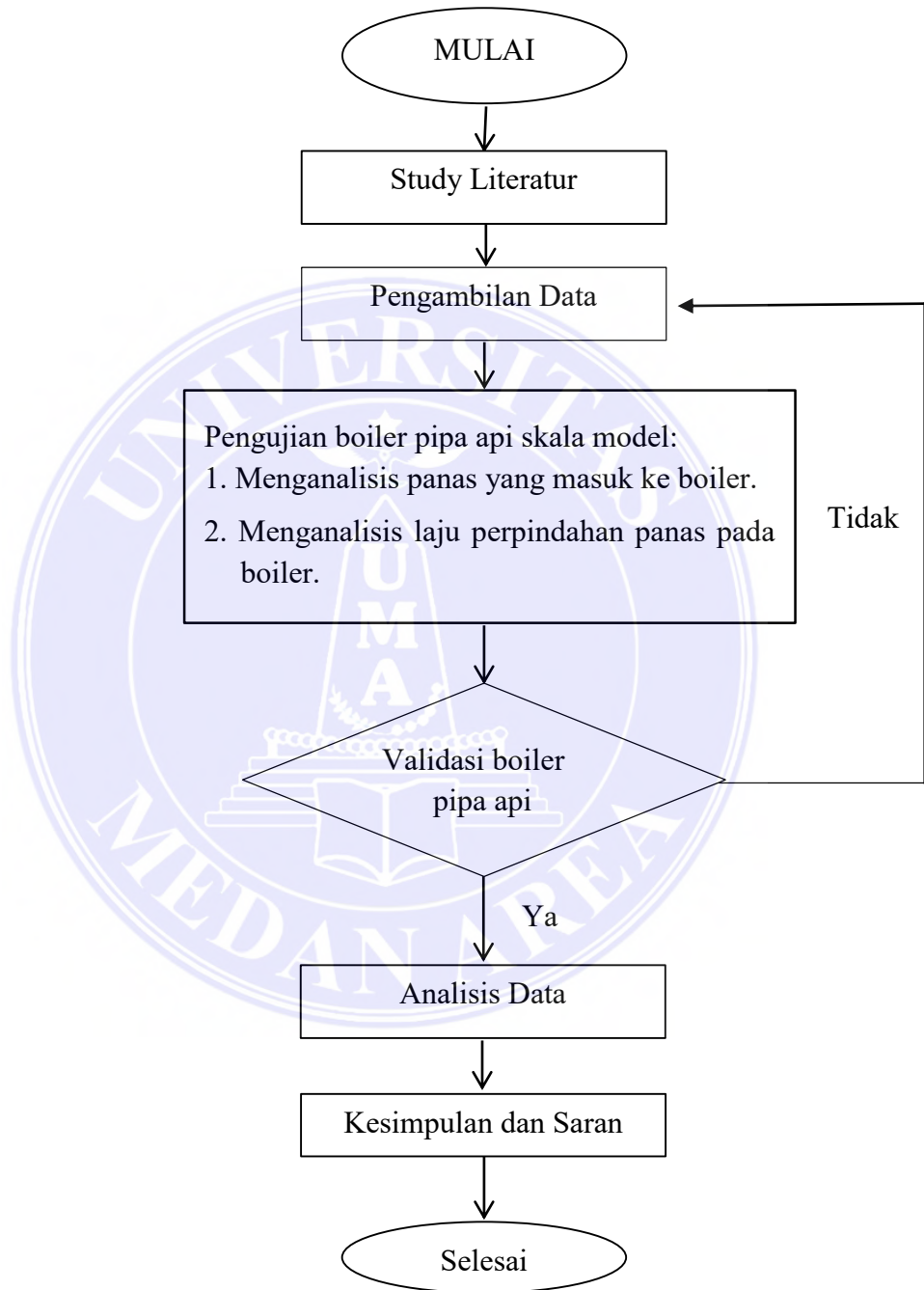
- d. Selama proses pembakaran maka kita harus memastikan api dalam keadaan hidup dan dibantu menggunakan blower pada ruang bakar.
- e. Setelah proses pembakaran air akan mendidih dan pressure gauge akan mengalami kenaikan tekanan.
- f. Pengambilan data dilakukan setiap kenaikan tekana pada pressure gaugedan tinggi suhu pada thermometer dan proses ini dilakukan sampai mencapai tekanan 7Kg/cm^2 .



Gambar 3.8. Boiler Skala Model.

3.4 Diagram Alir

Diagram alir di bawah ini menunjukkan langkah-langkah dalam menyelesaikan penelitian ini.



Gambar 3.9. Diagram Alir

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

- a. Pada penelitian ini panas yang diterima dari bahan bakar sebesar 107.830 W.
- b. Dari grafik 4.8 pada laju perpindahan menyeluruh boiler mini ini pada tekanan 1,02 kg/cm² adalah perpindahan panas yang paling tinggi yaitu 27,44 W, sedangkan pada tekanan 6,118 kg/cm² adalah perpindahan panas menyeluruh yang paling rendah yaitu 6,734 W
- c. Dari hasil penelitian ini maka Jadi besar energi yang digunakan air untuk menjadi uap bertekanan 7,138 kg/cm² adalah 6204,61 Wh.

5.2 Saran

- a. Untuk penelitian selanjutnya pipa api dibuat bentuk bervariasi dan penambahan jumlah pipa api.
- b. Untuk penggunaan bahan bakar harus diperhatikan agar bisa mengetahui efisiensi konsumsi bahan bakar boiler.
- c. Pada bodi boiler skala model sebaiknya dilapisi dengan kain tahan panas atau rokwool agar pada saat menyentuh bodi boiler tidak panas.

DAFTAR PUSTAKA

- Hakim, L. (2016). *Analisa Teoritis Laju Aliran Kalor Pada Ketel Uap Pipa Api Mini Industri Tahu Di Tinjau Dari Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh*. 1(4), 50–55.
- Hulu, G. M. R., & Rahmawaty. (2021). Analisis Perpindahan Panas Dan Efektivitas Economizer Pada Boiler Unit 4 Pltu Pangkalan Susu. *SINERGI POLMED: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 2(1), 10–15. <https://doi.org/10.51510/sinergipolmed.v2i1.293>
- NURUL CHANDRA PURNAMA. (2017). *ANALISA KEGAGALAN SOOTBLOWER TERHADAP PERPINDAHAN PANAS DI PIPA BOILER*. 06(2549–2888), 187–190. <http://journal.um-surabaya.ac.id/index.php/JKM/article/view/2203>
- Panas, P., Pembangkit, P., Tenaga, L., & Hendrawan, A. (2020). *yang dikehendaki 0,0002 jam ft 2 0 F/Btu. Kata kunci. OTEC, perpindahan panas*.
- Prasetya, J. (2020). *ANALISIS PERPINDAHAN PANAS PADA BOILER SKALA MODEL TEKANAN UAP 5 Kg / Cm 2 DAN KAPASITAS 23 Kg / Jam SKRIPSI OLEH: FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS MEDAN AREA MEDAN ANALISIS PERPINDAHAN PANAS PADA BOILER SKALA MODEL TEKANAN UAP 5 Kg / Cm 2 DAN KAPASITAS 23 Kg*.
- Saputra, M., & Ferdian, A. (2020). Analisis Perpindahan Panas Pada Heat Exchanger Di Furnace Boiler Circulating Fluidizing Bed Unit 1 Pltu Nagan Raya 2 X 110 Mw. *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi Dan Teknologi*, 4(1), 1–13. <https://doi.org/10.35308/jmkn.v4i1.1576>
- Susastrawan D, I. N. A., & Prabowo, P. (2016). Studi Numerik Karakteristik Perpindahan Panas pada Membrane Wall Tube Boiler Dengan Variasi Jenis Material dan Ketebalan Insulasi di PLTU Unit 4 PT.PJB UP Gresik. *Jurnal Teknik ITS*, 5(1). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i1.15070>
- Yohana, E., Suryo, M. T., Ambari, I., Permana, R., & Indrayani, N. L. (2018). Analisis Perpindahan Panas dan Exergi pada Boiler Wanson I Tipe Fire Tube. *Rotasi*, 20(2), 78. <https://doi.org/10.14710/rotasi.20.2.78-83>

Lampiran 1. Tabel Sifat-Sifat Udara Pada Atmosfer

Nilai μ , k , c_p , dan Pr tidak terlalu bergantung pada tekanan dan dapat digunakan untuk tekanan yang cukup luas.

T , K	ρ kg/m ³	c_p kJ/kg.°C	μ kg/m.s x 10 ⁵	ν m ² /s x 10 ⁴	k W/m.°C	α m ² /s x 10 ⁴	Pr
100	3.6010	1.0266	0.6924	1.923	0.009246	0.02501	0.770
150	2.3675	1.0099	1.0283	4.343	0.013735	0.0574	0.753
200	1.7684	1.0061	1.3289	7.490	0.01809	0.10165	0.739
250	1.4128	1.0053	1.5990	11.31	0.02227	0.15675	0.722
300	1.1774	1.0057	1.8462	15.69	0.02624	0.22160	0.708
350	0.9980	1.0090	2.075	20.76	0.03003	0.2983	0.697
400	0.8826	1.0140	2.286	25.90	0.03365	0.3760	0.689
450	0.7833	1.0207	2.484	31.71	0.03707	0.4222	0.683
500	0.7048	1.0295	2.671	37.90	0.04038	0.5564	0.680
550	0.6423	1.0392	2.848	44.34	0.04360	0.6532	0.680
600	0.5879	1.0551	3.018	51.35	0.04659	0.7512	0.680
650	0.5430	1.0635	3.177	58.51	0.04953	0.8578	0.682
700	0.5030	1.0752	3.332	66.25	0.05230	0.9672	0.684
750	0.4709	1.0856	3.481	73.91	0.05509	1.0774	0.686
800	0.4405	1.0978	3.625	82.29	0.05779	1.1951	0.689
850	0.4149	1.1095	3.765	90.75	0.06028	1.3097	0.692
900	0.3925	1.1212	3.899	99.3	0.06279	1.4271	0.696
950	0.3716	1.1321	4.023	108.2	0.06525	1.5510	0.699
1000	0.3524	1.1417	4.152	117.8	0.06752	1.6779	0.702
1100	0.3204	1.160	4.44	138.6	0.0732	1.969	0.704
1200	0.2947	1.179	4.69	159.1	0.0782	2.251	0.707
1300	0.2707	1.197	4.93	182.1	0.0837	2.583	0.705
1400	0.2515	1.214	5.17	205.5	0.0891	2.920	0.705
1500	0.2355	1.230	5.40	229.1	0.0946	3.262	0.705
1600	0.2211	1.248	5.63	254.5	0.100	3.609	0.705
1700	0.2082	1.467	5.85	280.5	0.105	3.977	0.705
1800	0.1970	1.287	6.07	308.1	0.111	4.379	0.704
1900	0.1858	1.309	6.29	338.5	0.117	4.811	0.704
2000	0.1762	1.338	6.50	369.0	0.124	5.260	0.702
2100	0.1682	1.372	6.72	399.6	0.131	5.715	0.700
2200	0.1602	1.419	6.93	432.6	0.139	6.120	0.707
2300	0.1538	1.482	7.14	464.0	0.149	6.540	0.710
2400	0.1458	1.574	7.35	504.0	0.161	7.020	0.718
2500	0.1394	1.688	7.57	543.5	0.175	7.441	0.730

Dari Natl Bur stand (U.S) Circ. 564. 1965

1. Analisis Perpindahan panas Radiasi, konveksi, dan konduksi pada tekanan 1 bar (1,02 kg/cm²).

a. Perpindahan Panas Secara Radiasi

$$R_{\text{rad}} = \frac{1}{\sigma A_1 \varepsilon_1 (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2)}$$

$$R_{\text{rad}} = \frac{1}{5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \cdot 0,0048 \text{ m}^2 \cdot 0,61 (693 \text{ K} + 623 \text{ K}) (693^2 \text{ K} + 623^2 \text{ K})}$$

$$R_{\text{rad}} = 5,272 \text{ kW}$$

Dimana :

$$\varepsilon_1 = \text{Emisivitas (0,61)}$$

$$\sigma = \text{Konstanta Boltzmann (5,669} \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

$$A_1 = \text{Luas Penampang (0,0048 m}^2)$$

$$T_1 - T_2 = \text{Perbedaan temperatur (K)}$$

b. Perpindahan Panas Secara Konduksi

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{\text{Ln} \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot L}$$

$$K = 73 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

R = Tahanan Termal

$$R_1 = \frac{D_1}{2} = \frac{4,4 \text{ cm}}{2} = 2,2 \text{ cm} = 0,022 \text{ m}$$

$$R_2 = r_1 + \text{tebal}$$

$$R_2 = 2,2 \text{ cm} + 0,3 \text{ cm} = 2,5 \text{ cm} = 0,025 \text{ m}$$

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{\text{Ln} \frac{2,5}{2,2}}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot L}$$

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{\text{Ln} \frac{0,025 \text{ m}}{0,022 \text{ m}}}{2 \cdot \pi \cdot 73 \text{ W/m}^\circ\text{C} \cdot 1,22 \text{ m}}$$

$$R_{\text{konduksi}} = 0,00203 \text{ kW}$$

Dimana :

$$R_{\text{konduksi}} = \text{Laju perpindahan panas } 0,00203 \text{ kW}$$

$$K = \text{Konduktivitas Material (73 W/m}^\circ\text{C)}$$

$$L = \text{Tinggi Boiler (1,22 m)}$$

$$r_1 = \text{jari-jari diameter dalam. (0,022 m)}$$

$$R_2 = \text{jari-jari diameter luar (0,025 m)}$$

c. Perpindahan Panas Secara Konveksi

$$R_{\text{konveksi}} = \frac{1}{h \cdot A}$$

suhu film adalah $t_f = \frac{t_\omega + t_1}{2}$

$$t_f = \frac{350^\circ\text{C} + 420^\circ\text{C}}{2} = 385^\circ\text{C} = 658 \text{ K}$$

maka sifat-sifat udara pada atmosfer dengan suhu 658 k adalah

$$K = 0,04953$$

$$A = 0,0048 \text{ m}^2$$

$$\nu = 58,51 \times 10^{-6}$$

$$\beta = \frac{1}{658} = 1,51 \times 10^{-3}$$

$$Pr = 0,7$$

$$Gr \ Pr = \frac{(g) (\beta) (t_\omega - t_\infty) (t)^3}{(\nu)^2}$$

$$= \frac{(9,8) (1,51 \times 10^{-3}) (350^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}) (1,22 \text{ m})^3}{(58,51 \times 10^{-6})^2}$$

$$Gr \ Pr = 2,355$$

Dimana:

$$Gr = \text{Bilangan Grashof}$$

$$Pr = \text{Bilangan Prandelt (0,7)}$$

- G = Gravitasi Bumi (9,8 m/s²)
- β = 1,51 x 10⁻³
- T_ω = Temperatur Pipa api (350 °C)
- T_∞ = Temperatur sekeliling (50 °C)
- L = Tinggi Boiler (1,22 m)³
- v = viskositas kinematik (58,51 x 10⁻⁶)
- A = luas penampang (0,0048 m²)

Berikut untuk mencari bilangan nusselt menggunakan persamaan sebagai

berikut :

$$Nu = C (Gr.Pr)^{1/4}$$

$$Nu = 0,59 (2,355)^{1/4}$$

$$Nu = 0,347$$

Maka nilai koefisien konveksi (\dot{h}) =

$$\dot{h} = \frac{Nu.k}{L^3}$$

$$\dot{h} = \frac{0,347 \cdot 0,04953}{(1,22 \text{ m})^3}$$

$$\dot{h} = 0,00927 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

dimana :

$$Nu = \text{Bilangan nusselt (0,00927)}$$

$$k = \text{konduktivitas thermal fluida (0,04953)}$$

$$\dot{h} = \text{koefisien perpindahan kalor konveksi (0,00927 W/m}^2 \cdot \text{°C)}$$

$$L = \text{Tinggi Boiler (1,22 m)}^3$$

Jika sudah ditentukan nilai dari bilangan Prandelt,Reyleight, dan nusselt maka hasil untuk koefisien konveksinya yaitu

$$R_{\text{konveksi}} = \frac{1}{\dot{h}.A}$$

$$= \frac{1}{0,00927 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \cdot 0,0048 \text{ m}^2}$$

$$R_{\text{konveksi}} = 22,47 \text{ kW}$$

d. Perpindahan Panas Menyeluruh

$$Q = \frac{T_1 - T_4}{R_{\text{radiasi}} + R_{\text{konduksi}} + R_{\text{konveksi}}}$$

$$Q = \frac{693 \text{ k} - 388 \text{ k}}{5,272 \text{ kW} + 0,00203 \text{ kW} + 22,47 \text{ kW}} = 27,744 \text{ W}$$

Jadi perpindahan panas menyeluruh pada tekanan $1,02 \text{ kg/cm}^2$ adalah $27,744 \text{ W}$

2. Analisis Perpindahan panas konveksi, konduksi dan pada tekanan 2 bar

(2,039 kg/cm²)

a. Perpindahan Panas Secara Radiasi

$$R_{\text{rad}} = \frac{1}{\sigma A_1 \varepsilon_1 (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2)}$$

$$R_{\text{rad}} = \frac{1}{5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \cdot 0,0048 \text{ m}^2 \cdot 0,61 (718 \text{ k} + 657 \text{ k}) (718^2 \text{ k} + 657^2 \text{ k})}$$

$$R_{\text{rad}} = 4,626 \text{ kW}$$

b. Perpindahan Panas Secara Konduksi

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot L}$$

$$K = 73 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

R = Tahanan Termal

$$R_1 = \frac{D_1}{2} = \frac{4,4 \text{ cm}}{2} = 2,2 \text{ cm} = 0,022 \text{ m}$$

$$R_2 = r_1 + \text{tebal}$$

$$R_2 = 2,2 \text{ cm} + 0,3 \text{ cm} = 2,5 \text{ cm} = 0,025 \text{ m}$$

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{\ln \frac{2,5}{2,2}}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot L}$$

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{\ln \frac{0,025 \text{ m}}{0,022 \text{ m}}}{2 \cdot \pi \cdot 73 \text{ W/m}^\circ\text{C} \cdot 1,22 \text{ m}}$$

$$R_{\text{konduksi}} = 0,00203 \text{ kW}$$

c. Perpindahan Panas Secara Konveksi

$$Q_{\text{konveksi}} = \frac{1}{h \cdot A}$$

suhu film adalah $t_f = \frac{t_w + t_1}{2}$

$$t_f = \frac{384^\circ\text{C} + 445^\circ\text{C}}{2} = 414^\circ\text{C} = 687 \text{ K}$$

maka sifat-sifat udara pada atmosfer dengan suhu 687 k adalah

$$K = 0,05083$$

$$A = 0,0048 \text{ m}^2$$

$$v = 62,15 \times 10^{-6}$$

$$\beta = \frac{1}{687} = 1,45 \times 10^{-3}$$

$$Pr = 0,7$$

$$\begin{aligned} Gr \ Pr &= \frac{(g) (\beta) (t_w - t_\infty) (t)^3}{(v)^2} \\ &= \frac{(9,8) (1,45 \times 10^{-3}) (384^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}) (1,22 \text{ m})^3}{(62,15 \times 10^{-6})^2} \end{aligned}$$

$$Gr \ Pr = 2,164$$

Dimana:

Gr = Bilangan Grashof

Pr = Bilangan Prandelt (0,7)

G = Gravitasi Bumi (9,8 m/s²)

β = 1,45 x 10⁻³

T_w = Temperatur Pipa api (384 °C)

- T_{∞} = Temperatur sekeliling (60 °C)
 L = Tinggi Boiler (1,22 m)³
 ν = viskositas kinematik (62,15 x 10⁻⁶)
 A = luas penampang (0,0048 m²)

Berikut untuk mencari bilangan nusselt menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Nu = C (Gr Pr)^{1/4}$$

$$= 0,59 (2,164)^{1/4}$$

$$Nu = 0.319$$

Maka nilai koefisien konveksi (h) =

$$\dot{h} = \frac{(Nu)(k)}{t}$$

$$\dot{h} = \frac{(0.319)(0,05083)}{(1,22)^3} = 0,00893 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

dimana :

Nu = Bilangan nusselt (0,319)

k = konduktivitas thermal fluida (0,05083)

h = koefisien perpindahan kalor konveksi (0,00893 W/m².K)

L = Tinggi Boiler (1,22 m)³

Jika sudah ditentukan nilai dari bilangan Prandelt, Reyleight, dan nusselt maka hasil untuk koefisien konveksinya yaitu

$$Q_{\text{konveksi}} = \frac{1}{\dot{h} \cdot A}$$

$$= \frac{1}{0,00893 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \cdot 0,0048 \text{ m}^2}$$

$$Q_{\text{konveksi}} = 23,33 \text{ kW}$$

d. Perpindahan Panas Menyeluruh

$$Q = \frac{T_1 - T_4}{Q_{\text{radiasi}} + Q_{\text{konduksi}} + Q_{\text{konveksi}}}$$

$$Q = \frac{718 \text{ k} - 400 \text{ k}}{4,626 \text{ kW} + 0,00203 \text{ kW} + 23,33 \text{ kW}} = 11,374 \text{ W}.$$

Jadi perpindahan panas menyeluruh pada tekanan $2,039 \text{ kg/cm}^2$ adalah $11,374 \text{ W}$

3. Analisis Perpindahan panas Radiasi, konveksi, dan konduksi pada tekanan 3 bar ($3,059 \text{ kg/cm}^2$)

a. Perpindahan Panas Secara Radiasi

$$R_{\text{rad}} = \frac{1}{\sigma A_1 \varepsilon_1 (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2)}$$

$$R_{\text{rad}} = \frac{1}{5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \cdot 0,0048 \text{ m}^2 \cdot 0,61 (728 \text{ K} + 678 \text{ K}) (728^2 \text{ K} + 678^2 \text{ K})}$$

$$R_{\text{rad}} = 4,330 \text{ kW}$$

Dimana :

$$\varepsilon_1 = \text{Emisivitas (0,61)}$$

$$\sigma = \text{Konstanta Boltzmann (} 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \text{)}$$

$$A_1 = \text{Luas Penampang (} 0,0048 \text{ m}^2 \text{)}$$

$$T_1 - T_2 = \text{Perbedaan temperatur (K)}$$

b. Perpindahan Panas Secara Konduksi

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot L}$$

$$K = 73 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

R = Tahanan Termal

$$R_1 = \frac{D_1}{2} = \frac{4,4 \text{ cm}}{2} = 2,2 \text{ cm} = 0,022 \text{ m}$$

$$R_2 = r_1 + \text{tebal}$$

$$R_2 = 2,2 \text{ cm} + 0,3 \text{ cm} = 2,5 \text{ cm} = 0,025 \text{ m}$$

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{\ln \frac{2,5}{2,2}}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot L}$$

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{\ln \frac{0,025 \text{ m}}{0,022 \text{ m}}}{2 \cdot \pi \cdot 73 \text{ W/m}^\circ\text{C} \cdot 1,22 \text{ m}}$$

$$R_{\text{konduksi}} = 0,00203 \text{ kW}$$

Dimana :

$$R_{\text{konduksi}} = \text{Laju perpindahan panas } 0,00203 \text{ kW}$$

$$K = \text{Konduktivitas Material } (73 \text{ W/m}^\circ\text{C})$$

$$L = \text{Tinggi Boiler } (1,22 \text{ m})$$

$$r_1 = \text{jari-jari diameter dalam. } (0,022 \text{ m})$$

$$R_2 = \text{jari-jari diameter luar } (0,025 \text{ m})$$

c. **Perpindahan Panas Secara Konveksi**

$$R_{\text{konveksi}} = \frac{1}{h \cdot A}$$

$$\text{suhu film adalah } t_f = \frac{t_w + t_1}{2}$$

$$t_f = \frac{405^\circ\text{C} + 455^\circ\text{C}}{2} = 430^\circ\text{C} = 703 \text{ K}$$

maka sifat-sifat udara pada atmosfer dengan suhu 703 k adalah

$$K = 0,05230$$

$$A = 0,0048 \text{ m}^2$$

$$\nu = 66,25 \times 10^{-6}$$

$$\beta = \frac{1}{703} = 1,42 \times 10^{-3}$$

$$\text{Pr} = 0,7$$

$$\text{Gr Pr} = \frac{(g) (\beta) (t_w - t_\infty) (t)^3}{(\nu)^2}$$

$$= \frac{(9,8) (1,42 \times 10^{-3}) (405^{\circ}\text{C} - 65^{\circ}\text{C}) (1,22 \text{ m})^3}{(66,25 \times 10^{-6})^2}$$

$$\text{Gr Pr} = 1,957$$

Dimana:

- Gr = Bilangan Grashof
- Pr = Bilangan Prandelt (0,7)
- G = Gravitasi Bumi (9,8 m/s²)
- β = 1,51 x 10⁻³
- T_ω = Temperatur Pipa api (350 °C)
- T_∞ = Temperatur sekeliling (50 °C)
- L = Tinggi Boiler (1,22 m)³
- v = viskositas kinematik (58,51 x 10⁻⁶)
- A = luas penampang (0,0048 m²)

Berikut untuk mencari bilangan nusselt menggunakan persamaan sebagai

berikut :

$$\text{Nu} = C (\text{Gr.Pr})^{1/4}$$

$$\text{Nu} = 0,59 (1,957)^{1/4}$$

$$\text{Nu} = 0,289$$

Maka nilai koefisien konveksi (\dot{h}) =

$$\dot{h} = \frac{\text{Nu.k}}{L^3}$$

$$\dot{h} = \frac{0,289 \cdot 0,05230}{(1,22 \text{ m})^3}$$

$$\dot{h} = 0,00919 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$$

dimana :

- Nu = Bilangan nusselt (0,289)
- k = konduktivitas thermal fluida (0,05230)
- \dot{h} = koefisien perpindahan kalor konveksi (0.00919 W/m².°C)
- L = Tinggi Boiler (1,22 m)³

Jika sudah ditentukan nilai dari bilangan Prandelt, Reyleight, dan nusselt maka hasil untuk koefisien konveksinya yaitu

$$R_{\text{konveksi}} = \frac{1}{h \cdot A}$$

$$= \frac{1}{0,00919 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \cdot 0,0048 \text{ m}^2}$$

$$R_{\text{konveksi}} = 22,66 \text{ kW}$$

d. Perpindahan Panas Menyeluruh

$$Q = \frac{T_1 - T_4}{R_{\text{radiasi}} + R_{\text{konduksi}} + R_{\text{konveksi}}}$$

$$Q = \frac{728 \text{ k} - 411 \text{ k}}{4,330 \text{ kW} + 0,00203 \text{ kW} + 22,66 \text{ kW}} = 11,744 \text{ W}$$

Jadi perpindahan panas menyeluruh pada tekanan 3,059 kg/cm² adalah 11,744 W

4. Analisis Perpindahan panas Radiasi, konveksi, dan konduksi pada tekanan 4 bar (4,079 kg/cm²)

a. Perpindahan Panas Secara Radiasi

$$R_{\text{rad}} = \frac{1}{\sigma A_1 \varepsilon_1 (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2)}$$

$$R_{\text{rad}} = \frac{1}{5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \cdot 0,0048 \text{ m}^2 \cdot 0,61 (738 \text{ K} + 698 \text{ K}) (738^2 \text{ K} + 698^2 \text{ K})}$$

$$R_{\text{rad}} = 4,066 \text{ kW}$$

Dimana :

$$\varepsilon_1 = \text{Emisivitas (0,61)}$$

$$\sigma = \text{Konstanta Boltzmann (5,669 . 10}^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \text{)}$$

$$A_1 = \text{Luas Penampang (0,0048 m}^2 \text{)}$$

$$T_1 - T_2 = \text{Perbedaan temperatur (K)}$$

b . Perpindahan Panas Secara Konduksi

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot L}$$

$$K = 73 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

R = Tahanan Termal

$$R_1 = \frac{D_1}{2} = \frac{4,4 \text{ cm}}{2} = 2,2 \text{ cm} = 0,022 \text{ m}$$

$$R_2 = r_1 + \text{tebal}$$

$$R_2 = 2,2 \text{ cm} + 0,3 \text{ cm} = 2,5 \text{ cm} = 0,025 \text{ m}$$

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{\ln \frac{2,5}{2,2}}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot L}$$

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{\ln \frac{0,025 \text{ m}}{0,022 \text{ m}}}{2 \cdot \pi \cdot 73 \text{ W/m}^\circ\text{C} \cdot 1,22 \text{ m}}$$

$$R_{\text{konduksi}} = 0,00203 \text{ kW}$$

Dimana :

R_{konduksi} = Laju perpindahan panas 0,00203 kW

K = Konduktivitas Material (73 W/m°C)

L = Tinggi Boiler (1,22 m)

r_1 = jari-jari diameter dalam. (0,022 m)

R_2 = jari-jari diameter luar (0,025 m)

c. Perpindahan Panas Secara Konveksi

$$R_{\text{konveksi}} = \frac{1}{h \cdot A}$$

suhu film adalah $t_f = \frac{t_\omega + t_1}{2}$

$$t_f = \frac{425^\circ\text{C} + 465^\circ\text{C}}{2} = 445^\circ\text{C} = 718 \text{ K}$$

maka sifat-sifat udara pada atmosfer dengan suhu 718 k adalah

$$K = 0,05330$$

$$A = 0,0048 \text{ m}^2$$

$$\nu = 69,01 \times 10^{-6}$$

$$\beta = \frac{1}{718} = 1,39 \times 10^{-3}$$

$$Pr = 0,7$$

$$\begin{aligned} Gr Pr &= \frac{(g) (\beta) (t_{\omega} - t_{\infty}) (t)^3}{(\nu)^2} \\ &= \frac{(9,8) (1,42 \times 10^{-3}) (425^{\circ}\text{C} - 70^{\circ}\text{C}) (1,22 \text{ m})^3}{(69,01 \times 10^{-6})^2} \end{aligned}$$

$$Gr Pr = 2,001$$

Dimana:

- Gr = Bilangan Grashof
- Pr = Bilangan Prandelt (0,7)
- G = Gravitasi Bumi (9,8 m/s²)
- β = 1,51 x 10⁻³
- T_ω = Temperatur Pipa api (425 °C)
- T_∞ = Temperatur sekeliling (70 °C)
- L = Tinggi Boiler (1,22 m)³
- ν = viskositas kinematik (58,51 x 10⁻⁶)
- A = luas penampang (0,0048 m²)

Berikut untuk mencari bilangan nusselt menggunakan persamaan sebagai

berikut :

$$Nu = C (Gr.Pr)^{1/4}$$

$$Nu = 0,59 (2,001)^{1/4}$$

$$Nu = 0,295$$

Maka nilai koefisien konveksi (\dot{h}) =

$$\dot{h} = \frac{Nu.k}{L^3}$$

$$\dot{h} = \frac{0,295 \cdot 0,05330}{(1,22 \text{ m})^3}$$

$$\dot{h} = 0.00936 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

dimana :

$$\text{Nu} = \text{Bilangan nusselt (0,289)}$$

$$k = \text{konduktivitas thermal fluida (0,05330)}$$

$$\dot{h} = \text{koefisien perpindahan kalor konveksi (0.00936 W/m}^2 \cdot \text{°C)}$$

$$L = \text{Tinggi Boiler (1,22 m)}^3$$

Jika sudah ditentukan nilai dari bilangan Prandelt,Reyleight, dan nusselt maka hasil untuk koefisien konveksinya yaitu

$$R_{\text{konveksi}} = \frac{1}{\dot{h} \cdot A}$$

$$= \frac{1}{0.00936 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \cdot 0.0048 \text{ m}^2}$$

$$R_{\text{konveksi}} = 22,26 \text{ kW}$$

d. Perpindahan Panas Menyeluruh

$$Q = \frac{T_1 - T_4}{R_{\text{radiasi}} + R_{\text{konduksi}} + R_{\text{konveksi}}}$$

$$Q = \frac{738 \text{ k} - 419 \text{ k}}{4,066 \text{ kW} + 0,00203 \text{ kW} + 22,26 \text{ kW}} = 12,116 \text{ W}$$

Jadi perpindahan panas menyeluruh pada tekanan 4,079 kg/cm² adalah 12,116 W.

5. Analisis Perpindahan panas Radiasi, konveksi, dan konduksi pada tekanan 5 bar (5,099 kg/cm²)

a. Perpindahan Panas Secara Radiasi

$$R_{\text{rad}} = \frac{1}{\sigma A_1 \epsilon_1 (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2)}$$

$$R_{\text{rad}} = \frac{1}{5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \cdot 0,0048 \text{ m}^2 \cdot 0,61(585 \text{ K} + 688 \text{ K})(585^2 \text{ K} + 688^2 \text{ K})}$$

$$R_{\text{rad}} = 5,803 \text{ kW}$$

Dimana :

$$\varepsilon_1 = \text{Emisivitas (0,61)}$$

$$\sigma = \text{Konstanta Boltzmann (5,669} \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \text{)}$$

$$A_1 = \text{Luas Penampang (0,0048 m}^2 \text{)}$$

$$T_1 - T_2 = \text{Perbedaan temperatur (K)}$$

b . Perpindahan Panas Secara Konduksi

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot L}$$

$$K = 73 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

R = Tahanan Termal

$$R_1 = \frac{D_1}{2} = \frac{4,4 \text{ cm}}{2} = 2,2 \text{ cm} = 0,022 \text{ m}$$

$$R_2 = r_1 + \text{tebal}$$

$$R_2 = 2,2 \text{ cm} + 0,3 \text{ cm} = 2,5 \text{ cm} = 0,025 \text{ m}$$

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{\ln \frac{2,5}{2,2}}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot L}$$

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{\ln \frac{0,025 \text{ m}}{0,022 \text{ m}}}{2 \cdot \pi \cdot 73 \text{ W/m}^\circ\text{C} \cdot 1,22 \text{ m}}$$

$$R_{\text{konduksi}} = 0,00203 \text{ kW}$$

Dimana :

$$R_{\text{konduksi}} = \text{Laju perpindahan panas } 0,00203 \text{ kW}$$

$$K = \text{Konduktivitas Material (73 W/m}^\circ\text{C)}$$

$$L = \text{Tinggi Boiler (1,22 m)}$$

$$r_1 = \text{jari-jari diameter dalam. (0,022 m)}$$

$$R_2 = \text{jari-jari diameter luar (0,025 m)}$$

c. Perpindahan Panas Secara Konveksi

$$R_{konveksi} = \frac{1}{h.A}$$

suhu film adalah $t_f = \frac{t_\omega + t_1}{2}$

$$t_f = \frac{415^\circ\text{C} + 312^\circ\text{C}}{2} = 363^\circ\text{C} = 636 \text{ K}$$

maka sifat-sifat udara pada atmosfer dengan suhu 636 k adalah

$$K = 0,04871$$

$$A = 0,0048 \text{ m}^2$$

$$\nu = 56,50 \times 10^{-6}$$

$$\beta = \frac{1}{636} = 1,57 \times 10^{-3}$$

$$Pr = 0,7$$

$$Gr Pr = \frac{(g) (\beta) (t_\omega - t_\infty) (L)^3}{(\nu)^2}$$

$$= \frac{(9,8) (1,57 \times 10^{-3}) (415^\circ\text{C} - 45^\circ\text{C}) (1,22 \text{ m})^3}{(56,50 \times 10^{-6})^2}$$

$$Gr Pr = 3,238$$

Dimana:

- Gr = Bilangan Grashof
- Pr = Bilangan Prandelt (0,7)
- G = Gravitasi Bumi (9,8 m/s²)
- β = 1,51 x 10⁻³
- T_ω = Temperatur Pipa api (415 °C)
- T_∞ = Temperatur sekeliling (45 °C)
- L = Tinggi Boiler (1,22 m)³
- ν = viskositas kinematik (58,51 x 10⁻⁶)
- A = luas penampang (0,0048 m²)

Berikut untuk mencari bilangan nusselt menggunakan persamaan sebagai

berikut :

$$Nu = C (Gr.Pr)^{1/4}$$

$$Nu = 0,59 (3,238)^{1/4}$$

$$Nu = 0,478$$

Maka nilai koefisien konveksi (\dot{h}) =

$$\dot{h} = \frac{Nu.k}{L^3}$$

$$\dot{h} = \frac{0,478 \cdot 0,04871}{(1,22 \text{ m})^3}$$

$$\dot{h} = 0.01282 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

dimana :

$$Nu = \text{Bilangan nusselt (0,478)}$$

$$k = \text{konduktivitas thermal fluida (0,04871)}$$

$$\dot{h} = \text{koefisien perpindahan kalor konveksi (0.01282 W/m}^2 \cdot \text{°C)}$$

$$L = \text{Tinggi Boiler (1,22 m)}^3$$

Jika sudah ditentukan nilai dari bilangan Prandelt,Reyleight, dan nusselt maka hasil untuk koefisien konveksinya yaitu

$$R_{\text{konveksi}} = \frac{1}{\dot{h}.A}$$

$$= \frac{1}{0.01282 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \cdot 0,0048 \text{ m}^2}$$

$$R_{\text{konveksi}} = 16,25 \text{ kW}$$

d. Perpindahan Panas Menyeluruh

$$Q = \frac{T_1 - T_4}{R_{\text{radiasi}} + R_{\text{konduksi}} + R_{\text{konveksi}}}$$

$$Q = \frac{585 \text{ k} - 426 \text{ k}}{5,803 \text{ kW} + 0,00203 \text{ kW} + 16,25 \text{ kW}} = 7,209 \text{ W}$$

Jadi perpindahan panas menyeluruh pada tekanan 5,099 kg/cm² adalah 7,209 W

6. Analisis Perpindahan panas Radiasi, konveksi, dan konduksi pada tekanan 6 bar (6,118 kg/cm²)

a. Perpindahan Panas Secara Radiasi

$$R_{\text{rad}} = \frac{1}{\sigma A_1 \varepsilon_1 (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2)}$$

$$R_{\text{rad}} = \frac{1}{5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \cdot 0,0048 \text{ m}^2 \cdot 0,61 (583 \text{ K} + 673 \text{ K}) (583^2 \text{ K} + 673^2 \text{ K})}$$

$$R_{\text{rad}} = 6,050 \text{ kW}$$

Dimana :

$$\varepsilon_1 = \text{Emisivitas (0,61)}$$

$$\sigma = \text{Konstanta Boltzmann (5,669} \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

$$A_1 = \text{Luas Penampang (0,0048 m}^2)$$

$$T_1 - T_2 = \text{Perbedaan temperatur (K)}$$

b. Perpindahan Panas Secara Konduksi

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot L}$$

$$K = 73 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

R = Tahanan Termal

$$R_1 = \frac{D_1}{2} = \frac{4,4 \text{ cm}}{2} = 2,2 \text{ cm} = 0,022 \text{ m}$$

$$R_2 = r_1 + \text{tebal}$$

$$R_2 = 2,2 \text{ cm} + 0,3 \text{ cm} = 2,5 \text{ cm} = 0,025 \text{ m}$$

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{\ln \frac{2,5}{2,2}}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot L}$$

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{\ln \frac{0,025 \text{ m}}{0,022 \text{ m}}}{2 \cdot \pi \cdot 73 \text{ W/m}^\circ\text{C} \cdot 1,22 \text{ m}}$$

$$R_{\text{konduksi}} = 0,00203 \text{ kW}$$

Dimana :

$$R_{\text{konduksi}} = \text{Laju perpindahan panas } 0,00203 \text{ kW}$$

$$K = \text{Konduktivitas Material (73 W/m}^\circ\text{C)}$$

$$L = \text{Tinggi Boiler (1,22 m)}$$

$$r_1 = \text{jari-jari diameter dalam. (0,022 m)}$$

$$R_2 = \text{jari-jari diameter luar (0,025 m)}$$

c. Perpindahan Panas Secara Konveksi

$$R_{\text{konveksi}} = \frac{1}{h.A}$$

$$\text{suhu film adalah } t_f = \frac{t_\omega + t_1}{2}$$

$$t_f = \frac{400^\circ\text{C} + 310^\circ\text{C}}{2} = 355^\circ\text{C} = 628 \text{ K}$$

maka sifat-sifat udara pada atmosfer dengan suhu 628 k adalah

$$K = 0,04821$$

$$A = 0,0048 \text{ m}^2$$

$$v = 55,35 \times 10^{-6}$$

$$\beta = \frac{1}{628} = 1,59 \times 10^{-3}$$

$$Pr = 0,7$$

$$\begin{aligned} Gr Pr &= \frac{(g) (\beta) (t_\omega - t_\infty) (t)^3}{(v)^2} \\ &= \frac{(9,8) (1,59 \times 10^{-3}) (400^\circ\text{C} - 42^\circ\text{C}) (1,22 \text{ m})^3}{(55,35 \times 10^{-6})^2} \end{aligned}$$

$$Gr Pr = 3,306$$

Dimana:

$$Gr = \text{Bilangan Grashof}$$

- Pr = Bilangan Prandelt (0,7)
 G = Gravitasi Bumi (9,8 m/s²)
 β = 1,51 x 10⁻³
 T_ω = Temperatur Pipa api (400 °C)
 T_∞ = Temperatur sekeliling (42 °C)
 L = Tinggi Boiler (1,22 m)³
 ν = viskositas kinematik (55,35 x 10⁻⁶)
 A = luas penampang (0,0048 m²)

Berikut untuk mencari bilangan nusselt menggunakan persamaan sebagai

berikut :

$$Nu = C (Gr.Pr)^{1/4}$$

$$Nu = 0,59 (3,306)^{1/4}$$

$$Nu = 0,488$$

Maka nilai koefisien konveksi (\dot{h}) =

$$\dot{h} = \frac{Nu.k}{L^3}$$

$$\dot{h} = \frac{0,488 \cdot 0,04821}{(1,22 \text{ m})^3}$$

$$\dot{h} = 0,01296 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

dimana :

Nu = Bilangan nusselt (0,488)

k = konduktivitas thermal fluida (0,04821)

\dot{h} = koefisien perpindahan kalor konveksi (0,01296 W/m².°C)

L = Tinggi Boiler (1,22 m)³

Jika sudah ditentukan nilai dari bilangan Prandelt,Reyleight, dan nusselt maka hasil untuk koefisien konveksinya yaitu

$$R_{\text{konveksi}} = \frac{1}{\dot{h}.A}$$

$$= \frac{1}{0,01296 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \cdot 0,0048 \text{ m}^2}$$

$$R_{\text{konveksi}} = 16,075 \text{ kW}$$

d. Perpindahan Panas Menyeluruh

$$Q = \frac{T_1 - T_4}{R_{\text{radiasi}} + R_{\text{konduksi}} + R_{\text{konveksi}}}$$

$$Q = \frac{583 \text{ k} - 434 \text{ k}}{6,050 \text{ kW} + 0,00203 \text{ kW} + 16,075 \text{ kW}} = 6,734 \text{ W}$$

Jadi perpindahan panas menyeluruh pada tekanan $6,118 \text{ kg/cm}^2$ adalah $6,734 \text{ W}$.

7. Analisis Perpindahan panas Radiasi, konveksi, dan konduksi pada tekanan 7 bar ($7,138 \text{ kg/cm}^2$)

a. Perpindahan Panas Secara Radiasi

$$R_{\text{rad}} = \frac{1}{\sigma A_1 \epsilon_1 (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2)}$$

$$R_{\text{rad}} = \frac{1}{5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \cdot 0,0048 \text{ m}^2 \cdot 0,61 (667 \text{ K} + 663 \text{ K}) (667 \text{ K} + 663^2 \text{ K})}$$

$$R_{\text{rad}} = 5,121 \text{ kW}$$

Dimana :

$$\epsilon_1 = \text{Emisivitas} (0,61)$$

$$\sigma = \text{Konstanta Boltzmann} (5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

$$A_1 = \text{Luas Penampang} (0,0048 \text{ m}^2)$$

$$T_1 - T_2 = \text{Perbedaan temperatur} (\text{K})$$

b. Perpindahan Panas Secara Konduksi

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot L}$$

$$K = 73 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

R = Tahanan Termal

$$R_1 = \frac{D_1}{2} = \frac{4,4 \text{ cm}}{2} = 2,2 \text{ cm} = 0,022 \text{ m}$$

$$R_2 = r_1 + \text{tebal}$$

$$R_2 = 2,2 \text{ cm} + 0,3 \text{ cm} = 2,5 \text{ cm} = 0,025 \text{ m}$$

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{\text{Ln} \frac{2,5}{2,2}}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot L}$$

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{\text{Ln} \frac{0,025 \text{ m}}{0,022 \text{ m}}}{2 \cdot \pi \cdot 73 \text{ W/m}^\circ\text{C} \cdot 1,22 \text{ m}}$$

$$R_{\text{konduksi}} = 0,00203 \text{ kW}$$

Dimana :

$$R_{\text{konduksi}} = \text{Laju perpindahan panas } 0,00203 \text{ kW}$$

$$K = \text{Konduktivitas Material } (73 \text{ W/m}^\circ\text{C})$$

$$L = \text{Tinggi Boiler } (1,22 \text{ m})$$

$$r_1 = \text{jari-jari diameter dalam. } (0,022 \text{ m})$$

$$R_2 = \text{jari-jari diameter luar } (0,025 \text{ m})$$

c. **Perpindahan Panas Secara Konveksi**

$$R_{\text{konveksi}} = \frac{1}{h \cdot A}$$

$$\text{suhu film adalah } t_f = \frac{t_w + t_1}{2}$$

$$t_f = \frac{390^\circ\text{C} + 394^\circ\text{C}}{2} = 392^\circ\text{C} = 665 \text{ K}$$

maka sifat-sifat udara pada atmosfer dengan suhu 628 k adalah

$$K = 0,05036$$

$$A = 0,0048 \text{ m}^2$$

$$v = 60,33 \times 10^{-6}$$

$$\beta = \frac{1}{665} = 1,50 \times 10^{-3}$$

$$\text{Pr} = 0,7$$

$$\begin{aligned} \text{Gr Pr} &= \frac{(g) (\beta) (t_{\omega} - t_{\infty}) (t)^3}{(v)^2} \\ &= \frac{(9,8) (1,50 \times 10^{-3}) (390^{\circ}\text{C} - 46^{\circ}\text{C}) (1,22 \text{ m})^3}{(60,33 \times 10^{-6})^2} \end{aligned}$$

$$\text{Gr Pr} = 2,523$$

Dimana:

- Gr = Bilangan Grashof
- Pr = Bilangan Prandelt (0,7)
- G = Gravitasi Bumi (9,8 m/s²)
- β = $1,51 \times 10^{-3}$
- T_{ω} = Temperatur Pipa api (390 °C)
- T_{∞} = Temperatur sekeliling (46 °C)
- L = Tinggi Boiler (1,22 m)³
- v = viskositas kinematik (60,33 x 10⁻⁶)
- A = luas penampang (0,0048 m²)

Berikut untuk mencari bilangan nusselt menggunakan persamaan sebagai

berikut :

$$\text{Nu} = C (\text{Gr.Pr})^{1/4}$$

$$\text{Nu} = 0,59 (2,523)^{1/4}$$

$$\text{Nu} = 0,372$$

Maka nilai koefisien konveksi (\dot{h}) =

$$\dot{h} = \frac{\text{Nu.k}}{L^3}$$

$$\dot{h} = \frac{0,372 \cdot 0,05036}{(1,22 \text{ m})^3}$$

$$\dot{h} = 0.01032 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$$

dimana :

$$\text{Nu} = \text{Bilangan nusselt (0,488)}$$

k = konduktivitas thermal fluida (0,05036)

\dot{h} = koefisien perpindahan kalor konveksi (0.01032 W/m².°C)

L = Tinggi Boiler (1,22 m)³

Jika sudah ditentukan nilai dari bilangan Prandelt, Reyleight, dan nusselt maka hasil untuk koefisien konveksinya yaitu

$$R_{\text{konveksi}} = \frac{1}{\dot{h}.A}$$

$$= \frac{1}{0.01032 \text{ W/m}^2.\text{K} \cdot 0,0048 \text{ m}^2}$$

$$R_{\text{konveksi}} = 20,187 \text{ kW}$$

d. Perpindahan Panas Menyeluruh

$$Q = \frac{T_1 - T_4}{R_{\text{radiasi}} + R_{\text{konduksi}} + R_{\text{konveksi}}}$$

$$Q = \frac{667 \text{ k} - 441 \text{ k}}{5,121 \text{ kW} + 0,00203 \text{ kW} + 20,187 \text{ kW}} = 8,929 \text{ W}$$

Jadi perpindahan panas menyeluruh pada tekanan 7,138 kg/cm² adalah 8,929 W.