

**PENGARUH FAKTOR PENGOTORAN TERHADAP
PERPINDAHAN PANAS PADA PENUKAR KALOR
SHELL AND TUBE TIPE 1-2 PASS**

SKRIPSI

**OLEH:
YUDI ADITYA
168130091**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2022**

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 27/6/22

Access From (repository.uma.ac.id)27/6/22

**PENGARUH FAKTOR PENGOTORAN TERHADAP
PERPINDAHAN PANAS PADA PENUKAR KALOR
SHELL AND TUBE TIPE 1-2 PASS**

SKRIPSI

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



Oleh:
YUDI ADITYA
168130091

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2022**

HALAMAN PENGESAHAN BUKU SKRIPSI

Judul Skripsi : Pengaruh Faktor Pengotoran Terhadap Perpindahan Panas
Pada Penukar Kalor *Shell And Tube* Tipe 1-2 Pass
Nama Mahasiswa : Yudi Aditya
NPM : 168130091
Bidang Keahlian : Konversi Energi

Disetujui Oleh Komisi Pembimbing

Dosen Pembimbing II



(Ir. Husin Ibrahim, MT)
NIDN : 0018106107

Dosen Pembimbing II



(Ir. H. Amirsyam Nasution, MT)
NIDN : 0025125606



(Dekan, Prof. M. Rahmat Syah, S.Kom, M.Kom)
NIDN : 0105058804



(Ketua Prodi Teknik Mesin, Prof. M. Rahmat Idris, S.T. .M.T)
NIDN : 0106058104

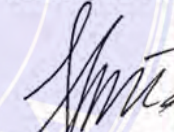
Tanggal Lulus : 03 Feburari 2022

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 dengan norma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah.

Saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang saya peroleh dan sanksi-sanksi lainnya dengan peraturan berlaku, apabila di kemudian hari ditemukan adanya plagiat dalam skripsi ini.

Medan, 03 Februari 2022



(Yudi Aditya)

NPM: 168130091



HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR/SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN
AKADEMIS


Sebagai civitas akademik Universitas Medan Area, Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Yudi Aditya
NIM : 168130091
Fakultas : TEKNIK
Program Studi : TEKNIK MESIN
Jenis Karya : Tugas Akhir / Skripsi

Demi pengembangan Ilmu Pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Medan Area Hak Bebas Royalti Non eksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul Pengaruh Faktor Pengotoran Terhadap Perpindahan Panas Pada Penukar Kalor *Shell And Tube* Tipe 1-2 Pass. Dengan Bebas Royalti Non Eksklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalih mediakan/formatkan, mengelola dalam bentuk perangkat 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 sebenar-benarnya.

Medan, 03 February 2022


(Yudi Aditya)
NPM: 168130091

ABSTRAK

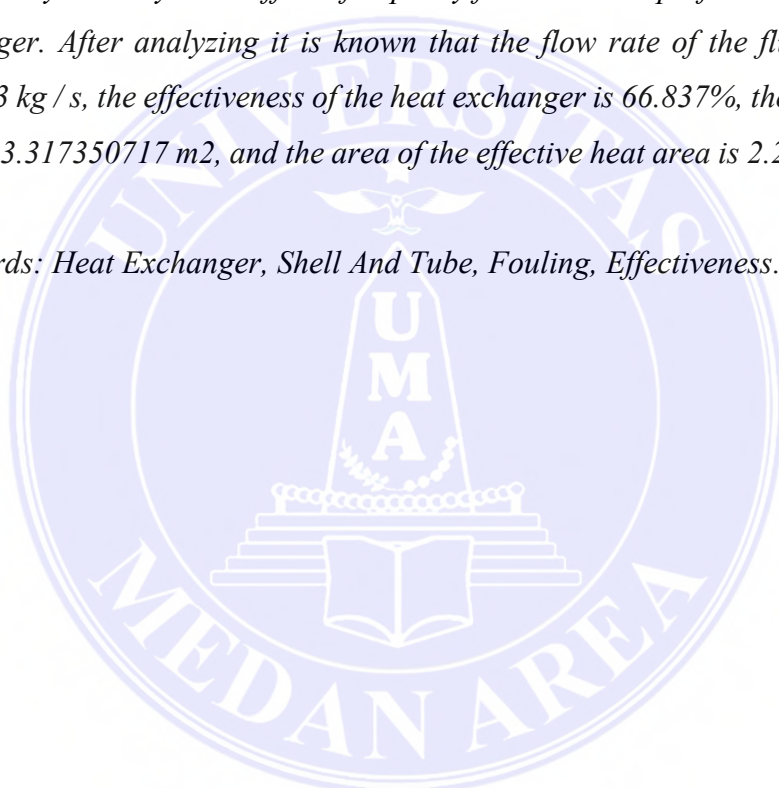
Alat penukar kalor merupakan peralatan yang berguna untuk mengubah temperatur maupun fasa fluida dengan cara menyerap atau melepaskan kalor antara fluida panas dengan fluida dingin. Salah satu jenis alat penukar kalor yang paling banyak digunakan di industry adalah *shell and tube*. alat penukar kalor yang optimal memiliki peranan penting guna menunjang kestabilan produksi diberbagai industri. Kinerja *heat exchanger shell and tube* dipengaruhi oleh faktor pengotor atau *fouling* yang merupakan pembentukan deposit pada permukaan alat penukar kalornya yang dapat menghambat perpindahan panas dan serta meningkatkan hambatan aliran fluida pada alat penukar kalor tersebut. Terkait faktor pengotor tersebut maka perlu dilakukan analisis mengenai pengaruh faktor pengotor terhadap kinerja dari alat penukar kalor tersebut. Setelah dilakukan analisis diketahui bahwa laju aliran masa gas buang adalah 0,06523 kg/s, efektifitas alat penukar kalor adalah 66,837%, luasan keseluruhan kotor adalah 3,317350717 m², serta luasan perpindahan panas efektif adalah 2,211567145 m².

Kata Kunci: Alat Penukar Kalor, *Shell And Tube*, Faktor Pengotoran, Efektifitas

ABSTRACT

Heat Exchanger is a tool that is useful for changing the temperature and fluid phase by absorbing or releasing heat between hot fluid and cold fluid. One type of heat exchanger that is most widely used in industry is shell and tube. The optimal performance heat exchanger has an important role in supporting the stability of production in various industries. The performance of the heat exchanger and tubing is influenced by fouling or fouling factors, which are deposits on the surface of the heat exchanger which can inhibit heat transfer and increase the resistance to fluid flow in the heat exchanger. Regarding these impurity factors, it is necessary to analyze the effect of impurity factors on the performance of the heat exchanger. After analyzing it is known that the flow rate of the flue gas flow is 0.06523 kg / s, the effectiveness of the heat exchanger is 66.837%, the overall gross area is 3.317350717 m², and the area of the effective heat area is 2.211567145 m².

Keywords: Heat Exchanger, Shell And Tube, Fouling, Effectiveness.



RIWAYAT HIDUP PENULIS



Penulis bernama Yudi Aditya dilahirkan di Medan pada Tanggal 05 Februari 1998. Penulis merupakan anak terakhir dari 3 bersaudara, pasangan dari Sri Boini dan Suyasir. Penulis menyelesaikan pendidikan di (SD) Swasta Taman Siswa Tanjung Sari Medan dan Tamat pada Tahun 2010. Pada Tahun yang sama Tahun 2010 penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Menengah Pertama (SMP) Swasta Taman Siswa Tanjung Sari Medan dan Tamat pada Tahun 2013. Pada Tahun yang sama Tahun 2013 penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Menengah Kejuruan (SMK) Swasta Al-Washliyah 4 Medan Jurusan Teknik Otomotif dan Tamat pada Tahun 2016. Pada Tahun yang sama 2016 penulis akhirnya bertekad untuk menyalurkan pendidikan dan mendaftar menjadi mahasiswa Fakultas Teknik Program Studi Teknik Mesin Universitas Medan Area dan selesai pada tahun 2021.

KATA PENGANTAR

Assalaamu'alaikum Warahmatullaahi Wabarakaatuh

Alhamdulillah, Puji dan syukur kehadiran Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, karena dengan rahmat dan hidayah Nya maka 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 : **Pengaruh Faktor Pengotoran Terhadap Perpindahan Panas Pada Penukar Kalor *Shell And Tube* Tipe 1-2 Pass**

Dalam penulisan tugas akhir ini, penulis sudah berusaha semaksimal mungkin untuk melakukan penyusunan dengan sebaik-baiknya. Namun penulis menyadari bahwa keterbatasan pengetahuan dan pengalaman masih banyak kekurangan yang terdapat didalam penyusunan skripsi ini. Oleh karena itu penulis sangat mengharapkan petunjuk dan saran dari semua pihak yang bersifat membangun untuk menyempurnakan skripsi ini.

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.
2. Bapak Dr. Rahmad Syah, S.M.Kom selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Medan Area.
3. Bapak Indra Hermawan, ST, MT selaku Wakil Dekan Bidang Kemahasiswaan Fakultas Teknik Universitas Medan Area.

4. Ibu Susilawati, S.kom, M.kom selaku Wakil Dekan Bidang Akademik Fakultas Teknik Universitas Medan Area.
5. Bapak Muhammad Idris, ST, MT selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Medan Area.
6. Bapak Dr. Iswandi, ST, MT selaku Sekretaris Program Studi Teknik Mesin Universitas Medan Area.
7. Bapak Ir. H. Amirsyam Nasution, MT selaku Pembimbing I dan Ir. Husin Ibrahim, MT selaku Pembimbing II selaku Pembimbing II dalam memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis.
8. Segenap Dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Medan Area dan Birokrasi Administrasi Fakultas Teknik.
9. Bapak Suyasir dan Ibu Sri selaku kedua orang tua saya, dimana telah banyak memberikan perhatian, motivasi, nasehat, doa, dan dukungan baik moral dan material sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan.
10. Wahyu Arifin selaku abang kandung dan Rudi Aditya selaku saudara kembar kandung saya yang ikut serta memberikan semangat, motivasi, dan membantu menyelesaikan tugas akhir ini.

Medan, 03 February 2022



(Yudi Aditya)
NPM: 168130091

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN BUKU SKRIPSI	ii
HALAMAN	
PERNYATAAN.....	Err
or! Bookmark not defined.	
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	iv
TUGAS AKHIR/SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	iv
ABSTRAK	v
RIWAYAT HIDUP PENULIS	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
DAFTAR NOTASI.....	xv
BAB. I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Batasan Masalah.....	2
C. Rumusan Masalah	3
D. Tujuan Penulisan.....	3
E. Manfaat Penulisan.....	4
BAB. II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
A. Alat Penukar Kalor Jenis Shell and Tube	5
B. Klasifikasi Alat Penukar Kalor (<i>Heat Exchanger</i>).....	6
C. Konstruksi Alat Penukar Kalor	11
D. Aliran Fluida dan Distribusi Temperatur Pada APK	11
E. Jumlah <i>Pass</i> Atau Lintasan pada APK.....	12
F. Komponen-komponen Alat Penukar Kalor Secara Umum.....	14
1. <i>Shell</i> (kerangka).....	14
2. <i>Tube</i>	15
3. Sekat (<i>Baffle</i>)	17
G. Keuntungan Yang Terdapat Pada <i>Shell & Tube Heat Exchanger</i> ..	18
H. Penentuan fluida <i>shell and tube Heat Exchanger</i> yaitu :	18
I. <i>Shell And Tube</i>	19
J. <i>Fouling Factor</i> (faktor Pengotoran).....	20
1. Proses Pembentukan	21
2. Penyebab Terjadinya Fouling:.....	22
3. Kondisi Terjadinya Fouling.....	22
4. Mekanisme Terjadinya Fouling	22
K. Proses Perpindahan Panas	23
L. Persamaan-persamaan yang di gunakan.....	24
1. Perpindahan panas secara Thermodinamika	24
2. <i>Efektivitas</i> Alat Penukar Kalor.....	26
M. Perpindahan Panas Dengan Menggunakan Metode LMTD.....	27
N. Penurunan Tekanan pada <i>Shell Side</i>	30
O. Penurunan Tekanan pada <i>Tube Side</i>	31

BAB. III METODOLOGI PENELITIAN	33
A. Waktu dan Tempat Penelitian	33
1. Tempat.....	33
2. Waktu.....	33
B. Alat Dan Bahan	34
1. Alat.....	34
2. Bahan.....	36
C. Metode Penelitian.....	36
1. Proses Penelitian	36
2. Pengumpulan Data	37
D. Diagram Alir	38
BAB. IV HASIL DAN PEMBAHASAN	39
A. Data – Data Alat Penukar Kalor.....	39
B. Untuk mencari sebuah aliran massa gas (<i>mh</i>).....	40
C. Mencari Temperatur Gas Buang Keluar APK	40
1. Perpindahan panas secara termodinamika untuk fluida dingin.	40
2. Perpindahan panas secara thermodinamika untuk fluida panas.	41
D. Mencari Panjang Alat Penukar Kalor	43
E. Menghitung Efektivitas Alat Penukar Kalor.....	48
F. Mencari Penurunan Tekanan Didalam Shell And Tube	49
G. <i>Fouling</i> Terhadap Alat Penukar Kalor.....	51
H. Menghitung Perpindahan Panas (Q)	52
BAB. V KESIMPULAN DAN SARAN.....	58
A. Kesimpulan	58
B. Saran.....	58
DAFTAR PUSTAKA	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Bagian-bagian alat penukar kalor.....	8
Gambar 2.2.	Jenis <i>Fixed Tube Sheet</i>	9
Gambar 2.3.	Jenis <i>Kettle</i>	9
Gambar 2.4.	Jenis <i>Floating Tube Sheet</i>	10
Gambar 2.5.	Jenis <i>U-Tube (U-Bundle)</i>	10
Gambar 2.6.	Distribusi Temperatur Pada Alat Penukar Kalor Dengan Aliran. Sejajar (<i>Parallel Flow</i>).....	11
Gambar 2.7.	Distribusi Temperatur Pada Alat Penukar Kalor Dengan Aliran. Berlawanan (<i>Counter Flow</i>).....	12
Gambar 2.8.	Distribusi Temperatur Pada Alat Penukar Kalor Dengan Aliran. Gabungan.	12
Gambar 2.9.	Alat penukar kalor 1-1 pass.....	13
Gambar 2.10.	Alat penukar kalor 1-2 pass.....	14
Gambar 2.11.	<i>Shell</i> (Kerangka).....	15
Gambar 2.12.	Tipe Susunan <i>Tube</i>	17
Gambar 2.13.	<i>Shell and Tube</i>	19
Gambar 2.14.	<i>Fouling</i> (pengotoran) pada <i>shell and tube</i>	21
Gambar 2.15.	Alat penukar kalor jenis satu <i>shell and satu tube</i>	24
Gambar 3.1.	Termometer digital.....	34
Gambar 3.2.	Flowmeter.....	35
Gambar 3.3.	<i>Thermostat</i>	35
Gambar 3.4.	<i>Heat exchanger tipe shell and tube 1-2 pass</i>	36
Gambar 3.5.	Diagram Alir	38

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Jadwal Penelitian.....	33
Tabel 4.1. Hasil Temperatur keluar gas CO_2	43



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Tabel Sifat-sifat air	61
Lampiran 2 Tabel sifat-sifat air (air dibawah 1 atm, dan air jenuh diatas 100 °C)	62
Lampiran 3 Tabel sifat-sifat CO_2	63



DAFTAR NOTASI

NOTASI	KETERANGAN	SATUAN
A_s	Luas aliran sisi <i>shell</i>	m^2
A_t	Luas aliran sisi <i>tube</i>	m^2
$A_o = A_c$	Luas keseluruhan bersih	m^2
A_f	Luas keseluruhan kotor	m^2
A_{eff}	Luas keseluruhan efektif	m^2
B	Jarak <i>baffle</i> /sekat	M
C	Jarak antara <i>tube</i>	M
$C_{p_{air}}$	Panas jenis air	$J/kg^{\circ}C$
$C_{p_{gas}}$	Panas jenis gas	$J/kg^{\circ}C$
C_c	Kapasitas panas air	$kW/^{\circ}C$
C_h	Kapasitas panas gas	$kW/^{\circ}C$
D_e	Diameter ekivalen	M
D_s	Diameter dalam <i>shell</i>	M
F	Factor koreksi	-
f_t	Factor gesekan dalam <i>tube</i>	-
f_s	Factor gesekan dalam <i>shell</i>	-
G_c	Faktor konversi dimensional	1 kg.m/N.s^2
H_i	Koef. Perpan konveksi didalam <i>tube</i>	$kW/m^2^{\circ}C$
H_o	Koef. Perpan konveksi didalam <i>shell</i>	$kW/m^2^{\circ}C$

k_{gas}	Konduktivitas thermal gas	$\text{kW/m}^{\circ}\text{C}$
K_{tube}	Konduktivitas thermal tube	$\text{kW/m}^{\circ}\text{C}$
L	Panjang tube	m
LMTD	Beda suhu keseluruhan rata-rata logaritmik	$^{\circ}\text{C}$
\dot{m}_s	Laju aliran massa air didalam <i>shell</i>	kg/s
\dot{m}_t	Laju aliran massa gas didalam <i>tube</i>	kg/s
\dot{m}_h	Laju aliran massa gas	kg/s
K_{air}	Konduktivitas thermal air	$\text{kW/m}^{\circ}\text{C}$
N_b	Jumlah <i>baffle</i> /sekat	-
N_p	Jumlah pass/lintasan	-
N_t	Jumlah <i>tube</i>	-
NTU	Jumlah satuan perpindahan panas	-
Nu_s	Bilangan Nusselt disisi <i>shell</i>	-
Nu_t	Bilangan Nusselt disisi <i>tube</i>	-
OD_t	Diameter luar <i>tube</i>	m
P	Efektivitas thermal	-
Pr_{air}	Bilangan prandtl air	-
Pr_{gas}	Bilangan prandtl gas	-
P_t	Jarak antara dua pusat tube (<i>pitch</i>)	m
Q	Kalor yang berpindah secara perpindahan panas	Watt
q_c	Panas yang dilepas fluida dingin	Watt
q_h	Panas yang dilepas fluida panas	Watt

q_{maks}	Perpan maksimum yang mungkin terjadi	Watt
R	Perbandingan kapasitas panas	-
Re_s	Bilangan <i>Reynolds</i> disisi <i>shell</i>	-
Re_t	Bilangan <i>Reynolds</i> disisi <i>tube</i>	-
$T_{c,i}$	Temperatur masuk fluida dingin	°C
$T_{c,o}$	Temperatur keluar fluida dingin	°C
$T_{h,i}$	Temperatur masuk fluida panas	°C
$T_{h,o}$	Temperatur keluar fluida panas	°C
$U_o = U_c$	Koef. Perpindahan panas menyeluruh bersih	$W/m^2°C$
U_f	Koef. Perpindahan panas menyeluruh kotor	$W/m^2°C$
V_s	Kecepatan aliran air disisi <i>shell</i>	m/s
V_t	Kecepatan aliran gas disisi <i>tube</i>	m/s
W_b	Bilangan Nusselt disisi <i>tube</i>	M
Grup lambang yunani		
μ	Viskositas dinamik	kg/m.s
N	Viskositas kinematic	m^2/s
P	Densitas	kg/m^3
ΔP_s	Penurunan tekanan gas disisi <i>tube</i>	Pa
ΔP_t	Penurunan tekanan disisi <i>tube</i>	Pa

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Pada perusahaan industri, pabrik dan pembangkit listrik memegang peranan yang sangat penting dalam permintaan alat penukar panas, dan permintaan alat penukar panas semakin meningkat karena tingginya volume produksi yang dibutuhkan dalam industri. Penukar panas shell and tube dengan sistem 1-2 pass didefinisikan sebagai perangkat yang mendorong perpindahan panas dari satu fluida ke fluida lain dengan suhu yang berbeda dan mencegah dua fluida bercampur satu sama lain. Peran dari heat exchanger tidak terbatas pada proses pendinginan, tetapi juga mencakup proses pemanasan.

Jenis Alat Penukar Kalor pada PT. BBS PLTD 120 MW Belawan-Sumbagut ini adalah Shell and tube tipe 1-2 pass, yang berarti saluran 1 saluran uap (channel) dan 2 saluran air (channel) yang mengalir di dalam tabung.

Heat Exchanger juga dikenal sebagai penukar panas yang gunanya untuk mengubah suhu fase dengan menukar (menyerap) panas ke fluida.

Proses perpindahan panas dapat dilakukan secara langsung yaitu fluida panas dan fluida dingin dicampur secara langsung tanpa pemisah, atau dapat dilakukan secara tidak langsung yaitu fluida panas dan fluida dingin tidak bersentuhan langsung tetapi dipisahkan oleh pemisah. [1].

Salah satu jenis *heat exchanger* yang paling banyak digunakan adalah *shell and tube heat exchanger*. Alat ini terdiri dari cangkang luar silinder dan tabung di dalam. Suhu fluida di dalam tabung berbeda dengan suhu di luar tabung (di dalam cangkang), memungkinkan perpindahan panas antara aliran fluida di dalam tabung dan fluida luar tabung. Area yang bersesuaian dengan bagian dalam tabung disebut sisi tabung dan bagian luar disebut sisi cangkang [2].

Secara umum pengotoran dapat didefinisikan sebagai proses pembentukan endapan di mana permukaan penukar panas menghambat perpindahan panas dan meningkatkan resistensi terhadap aliran fluida di penukar panas.

Oleh karena itu, karena pengotoran, panas dipindahkan dari fluida yang bertemperatur lebih tinggi ke fluida yang bertemperatur lebih rendah. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk menghitung aliran massa gas yang terjadi, serta efektifitas dan pengaruh alat pada penukar kalor shell and tube tipe 1-2 pass”.

Fouling sudah menjadi masalah alat penukar kalor ini sejak ditemukannya api. Tidak sulit membayangkan betapa terganggunya nenek moyang kita, sejarah pencemaran memiliki sejarah yang panjang dan pencemaran masih berdampak penting pada efisiensi perubahan konversi energy [3].

B. Batasan Masalah

Untuk memecahkan masalah yang harus ada dalam rumusan masalah, maka perlu adanya batasan dan ruang lingkup masalah agar analisis selanjutnya dapat lebih mudah untuk analisis, batasan-batasan masalah tersebut yaitu :

1. Menentukan perubahan penurunan tekanan alat penukar kalor akibat fouling.
2. Tentukan perubahan efisiensi penukar panas karena pengotoran.
3. Batasan fouling faktornya.

C. Rumusan Masalah

Dalam penulisan ini adalah Pengaruh Faktor Pengotoran Terhadap Perpindahan Panas Pada Penukar Kalor Shell And Tube Tipe 1-2 Pass.

1. Berapa aliran massa gas (\dot{m}_h).
2. Berapa efektivitas alat penukar kalor.
3. Bagaimana pengaruh *fouling* terhadap alat penukar kalor.

D. Tujuan Penulisan

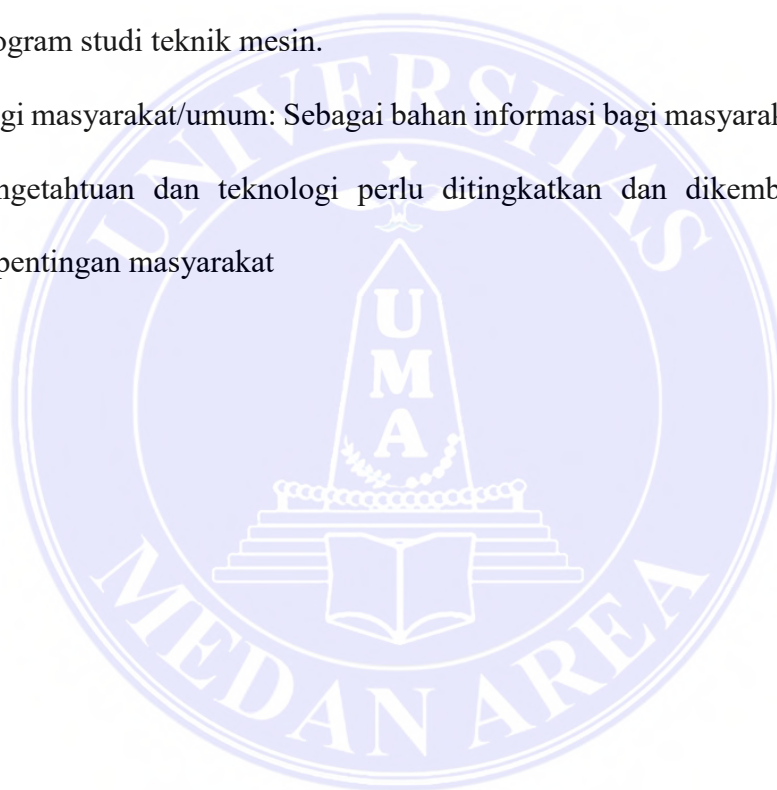
Adapaun tujuan penelitian tugas akhir ini adalah :

1. Menghitung laju aliran massa gas
2. Pengaruh pengotoran terhadap efektifitas alat penukar kalor
3. Mencari pengaruh *fouling* terhadap alat penukar kalor.

E. Manfaat Penulisan

Diharapkan penelitian ini dapat membawa manfaat dan wawasan bagi penulis dan pihak-pihak berkepentingan, yaitu sebagai berikut:

1. Agar penulis dapat memahami sistem kerja heat exchanger dan Analisis Perpindahan Panas Pada Penukar Kalor Shell And Tube Tipe 1-2 Pass.
2. Bagi perguruan tinggi diwilayah Universitas Medan Area, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi tambahan referensi civitas khususnya akademika program studi teknik mesin.
3. Bagi masyarakat/umum: Sebagai bahan informasi bagi masyarakat/umum ilmu pengetahuan dan teknologi perlu ditingkatkan dan dikembangkan untuk kepentingan masyarakat



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Alat Penukar Kalor Jenis Shell and Tube

Alat penukar kalor ini merupakan salah satu jenis alat penukar kalor yang secara rinci adanya sekumpulan “*tube*” yang dipasangkan di dalam “*shell*” berbentuk silinder di mana dua jenis fluida yang saling bertukar kalor mengalir secara terpisah, masing–masing melalui sisi “*tube*” dan sisi “*shell*”. Dalam satu fluida dimana dapat mengalir di dalam pipa tersebut, sedangkan fluida lainnya dapat mengalir di *shell*, maka aliran yang terdapat di shell dapat meningkatkan koefisien perpindahan panas secara konveksi, sehingga shell dapat dipasang sebagai penyekat (*baffle*). Alat penukar kalor ini dirancang untuk menggunakan panas dari satu aliran fluida untuk memanaskan aliran fluida lain atau fluida dingin. Sehingga terdapat jadi dua fungsi sekaligus yaitu:

1. Memanaskan fluida yang temperaturnya rendah.
2. Mendinginkan fluida yang temperaturnya tinggi.

Menurut *Dean A Barlet* (1996), tujuan alat penukar kalor adalah untuk mengontrol suatu sistem (suhu) dengan menambahkan atau memindahkan energi panas dari satu fluida ke fluida lainnya. Dimana terdapat banyak perbedaan dalam ukuran, kecanggihan, jenis penukar panas, semua penukar panas yang menggunakan elemen konduktif termal umumnya berbentuk "tabung" (*tube*) atau pelat untuk memisahkan dua fluida.

B. Klasifikasi Alat Penukar Kalor (*Heat Exchanger*)

Dalam industri, khususnya pembangkit listrik, masalah transfer energi panas merupakan suatu keharusan. Perpindahan panas terjadi dalam suatu alat penukar panas (*heat exchanger*), suatu alat mekanis yang digunakan untuk mentransfer energi panas secara langsung atau tidak langsung dari fluida bertemperatur tinggi ke fluida bertemperatur rendah. Proses perpindahan panas dapat terjadi secara langsung maupun tidak langsung yang artinya :

1. Alat penukar kalor yang langsung

Alat penukar langsung adalah fluida panas yang dicampur langsung dengan fluida dingin (tanpa separator) di dalam bejana atau ruangan tertentu Contoh : jet condenser, pesawat desuperheater pada ketel, pesawat dearator yaitu antara air ketel dengan uap yang diinjeksikan, dan sebagainya.

2. Alat penukar kalor yang tidak langsung

Alat penukar kalor tidak langsung adalah fluida panas yang tidak bersentuhan langsung dengan fluida dingin. Jadi proses perpindahan panas memiliki media perantara, seperti tabung, pelat atau jenis lainnya. Contoh : condenser pada turbin uap, pesawat pemanas uap lanjut pada ketel, economizer, pemanas udara pembakaran (*preheater*) dan sebagainya.

Di pembangkit listrik, alat penukar kalor *shell and tube* banyak digunakan untuk memanaskan dan/atau mendinginkan cairan atau produk yang disimpan dalam tangki penyimpanan. Alat penukar kalor dapat dibagi menjadi beberapa kelompok, yaitu:

1. Berdasarkan proses perpindahan kalor :
 - a. Perpindahan kalor secara langsung
 - b. Perpindahan kalor secara tak langsung
2. Berdasarkan konstruksi :
 - a. Konstruksi tabung (*tubular*)
 - b. Konstruksi tipe pelat
 - c. Konstruksi dengan luas permukaan diperluas
 - d. Konstruksi regeneratif
3. Berdasarkan jenis aliran :
 - a. Alat penukar kalor aliran yang sejajar (*Parallel Flow*)
 - b. Alat penukar kalor aliran yang berlawanan (*Counter Flow*)
 - c. Alat penukar kalor aliran yang silang (*Cross Flow*)
4. Berdasarkan pengaturan aliran :
 - a. Aliran dengan satu pass
 - b. Aliran dengan multi pass
5. Berdasarkan banyaknya fluida yang digunakan :
 - a. Dua jenis fluida
 - b. Tiga jenis fluida atau lebih
6. Berdasarkan mekanisme perpindahan kalor :
 - a. Konveksi satu fasa
 - b. Konveksi dua fasa
 - c. Kombinasi perpindahan kalor secara konveksi dan radiasi

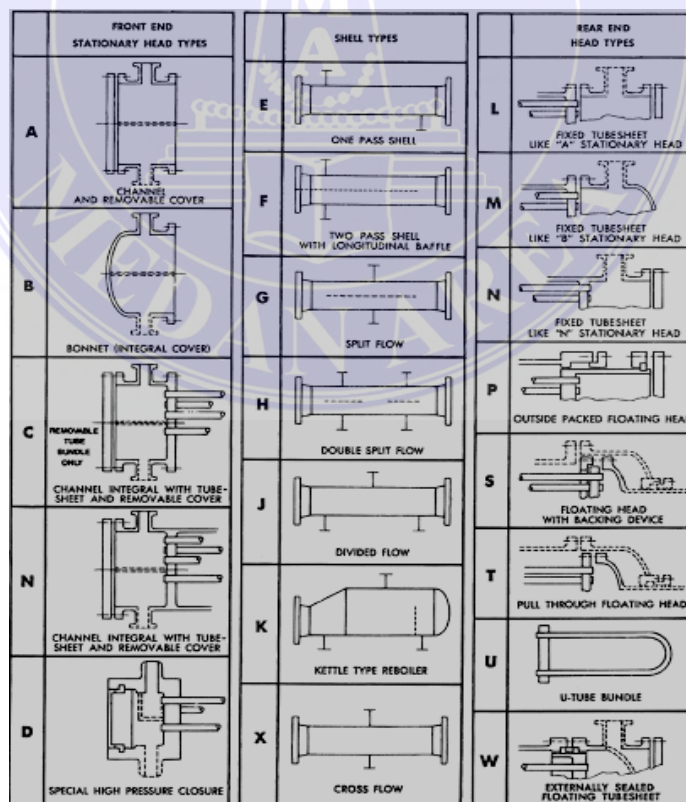
Menurut standar "*Tubular Heat Exchanger Manufacturers Association*"

(TEMA), Alat penukar kalor dibagi menjadi 3 (tiga) kategori:

1. Kelas R, untuk peralatan yang bekerja dengan kondisi berat. Biasa digunakan di industri minyak .
2. Kelas C, dibuat untuk penggunaan secara umum. Didasarkan pada segi ekonomis dan ukuran kecil, digunakan untuk proses – proses umum industri.
3. Kelas B, untuk pelayanan proses kimia.

Standar TEMA juga dapat mengklasifikasikan alat penukar kalor menurut tipe “*stationary head*”, “*shell*” dan “*rear head*” kedalam tiga kode huruf, yaitu :

1. Huruf pertama terdiri dari 4 tipe : A, B, C, N dan D Menunjukkan tipe ujung muka.
2. Huruf kedua terdiri dari 6 tipe: E, F, G, H, J, K dan X Menunjukkan tipe shell.
3. Huruf ketiga terdiri dari 8 tipe: L, M, D, U, P, S, T dan W Menunjukkan tipe ujung belakang.



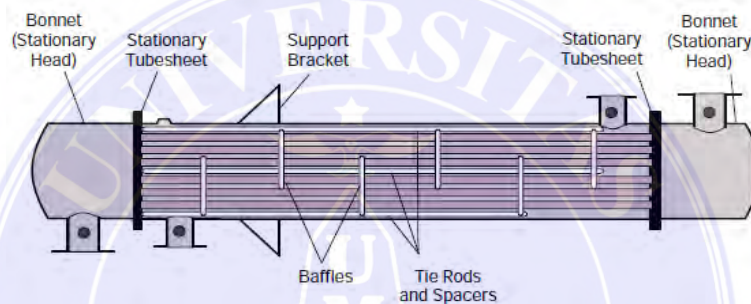
Gambar 2.1. Bagian-bagian alat penukar kalor (Berdasarkan Standart TEMA)

Berdasarkan gambar 2.1. bagian-bagian alat penukar kalor (Berdasarkan Standart TEMA), maka didapat tipe Alat Penukar Kalor dibawah ini:

Beberapa bentuk alat penukar kalor jenis *Shell and Tube* :

1. Jenis *Fixed Tube Sheet*

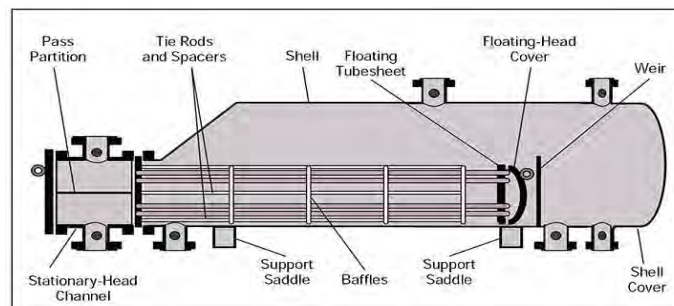
Jenis ini digunakan untuk kondisi operasi pada temperatur yang *relative* rendah, dimana pembuaian bahan pada temperature operasi sangat singkat berdasarkan Gambar 2.3. Jenis *Fixed Tube Sheet* dibawah ini.



Gambar 2.2. Jenis *Fixed Tube Sheet*

2. Jenis *Kettle*

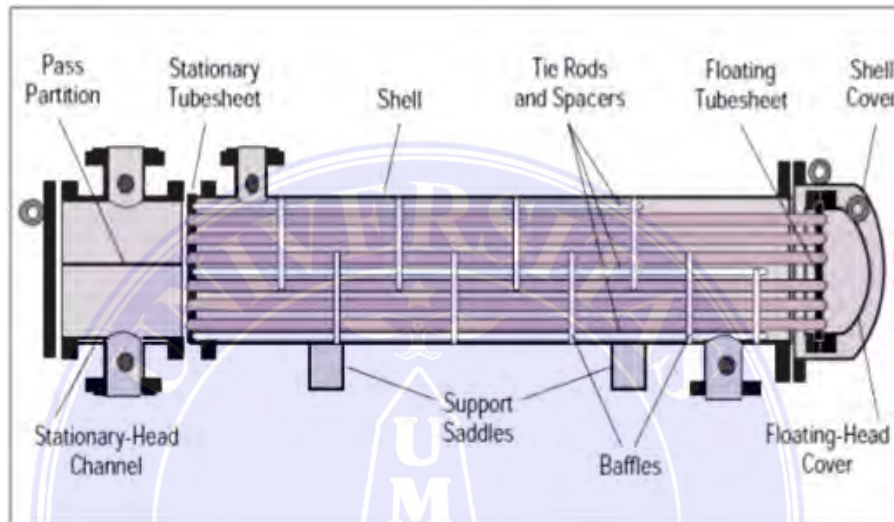
Pada jenis ini dirancang khusus untuk proses penguapan atau pendidihan fluida. Fluida yang berubah fasa dari air ke uap, dialirkan kedalam *Shell* diluar *Tube*. Bentuk *Shell* yang mengembang dimasukkan untuk menampung fluida yang mengembang, fluida panas dialirkan di dalam pipa. Berikut dibawah ini gambar 2.4 Jenis *Kettle*.



Gambar 2.3. Jenis *Kettle*

3. Jenis *Floating Tube Sheet*

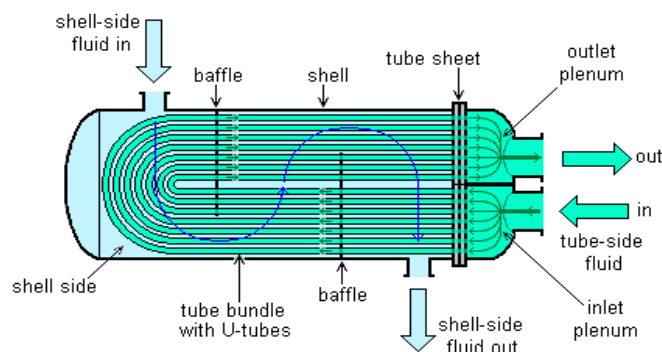
Pada jenis ini bila terjadi pemuaian pada tube tidak akan meninggalkan tegangan pada *shell* maupun *tube*, karena salah satu *tubesheet* nya tidak terikat pada *sheet (floating)* sehingga jenis ini sangat cocok dioperasikan pada temperatur tinggi. Berdasarkan gambar 2.5 Jenis *Floating Tube Sheet*.



Gambar 2.4. Jenis *Floating Tube Sheet*

4. Jenis U-Tube (*U-Bundle*)

Pada jenis ini digunakan satu *tubesheet* saja. Pada ujung lainnya pipa dibengkokkan dengan bentuk U. *Heat Exchanger* jenis ini dapat bekerja pada tekanan tinggi. Seperti menunjukkan gambar dibawah ini yaitu gambar 2.6 Jenis U-Tube (*U-Bundle*)



Gambar 2.5. Jenis U-Tube (*U-Bundle*)

C. Konstruksi Alat Penukar Kalor

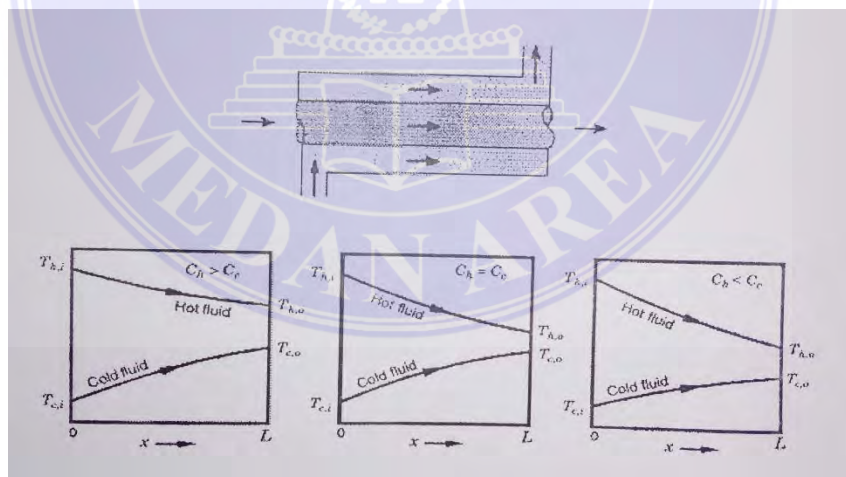
Ditinjau dari segi konstruksi dan alat penukar kalor jenis *Shell and Tube*, maka secara umum konstruksinya dibagi dalam 4 bagian, yaitu:

1. Bagian depan yang tetap atau *Front Head Stationery Head*.
2. *Shell* atau bahan alat penukar kalor.
3. Bagian yang belakang atau *Rear End Head*.
4. Berkas *Tube and Bundle*, kumpulan *tube* yang dimasukkan kedalam *tube* alat penukar kalor.

D. Aliran Fluida dan Distribusi Temperatur Pada APK

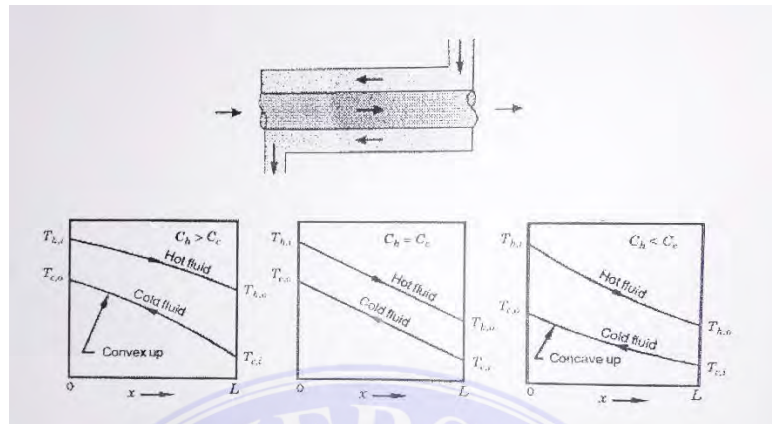
Dimana diketahui aliran fluida pada alat penukar kalor dapat dibagi dalam 3 macam aliran yaitu :

1. Aliran Sejajar atau *Parallel Flow* sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 2.6. dibawah ini.



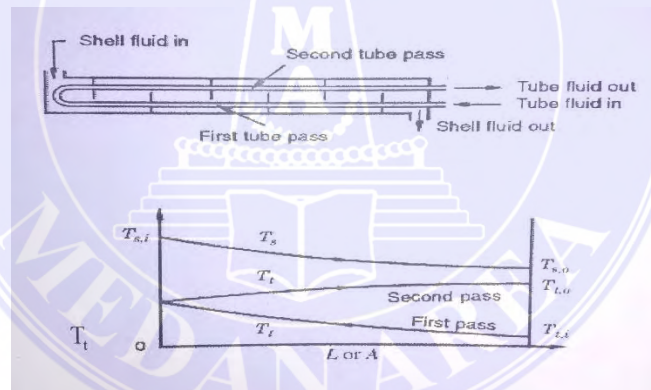
Gambar 2.6. Distribusi Temperatur Pada Alat Penukar Kalor Dengan Aliran Sejajar (*Parallel Flow*)

2. Distribusi Temperatur Pada Alat Penukar Kalor Dengan Aliran Berlawanan (*Counter Flow*) sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 2.7. dibawah ini.



Gambar 2.7 Distribusi Temperatur Pada Alat Penukar Kalor Dengan Aliran Berlawanan (*Counter Flow*)

3. Aliran Kombinasi, Gabungan aliran Sejajar dan Berlawanan sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 2.8 dibawah ini.



Gambar 2.8. Distribusi Temperatur Pada Alat Penukar Kalor Dengan Aliran Gabungan.

E. Jumlah *Pass* Atau Lintasan pada APK

Dimana yang dimaksud dengan *pass* dalam alat penukar kalor ialah merupakan suatu lintasan yang dilakukan oleh fluida didalam *shell* atau fluida dalam *tube*. Sehingga dapat diketahui 2 jenis lintasan alat penukar kalor, yakni :

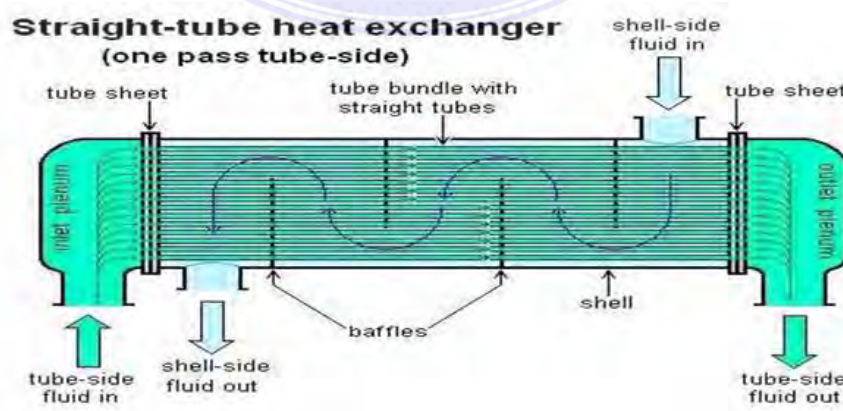
1. *Shell pass* atau lintasan *shell*.
2. *Tube pass* atau lintasan *tube*.

Dimana yang dimaksud dengan pas *shell* ialah merupakan lintasan yang dapat dilakukan oleh fluida sejak masuk mulai saluran masuk (*inlet nozzle*), sehingga dapat melalui bagian dalam *shell* dan mengelilingi *tube*, keluar dari saluran buang (*outlet nozzle*). Kemudian apabila lintasan itu dilakukan 1 kali maka dapat disebut 1 *pass shell*. Dan apabila terjadi 2 kali maka dari itu melintas bagian dalam serta melewati *tube* maka disebut dengan 2 atau *pass shell*.

Untuk fluida didalam *tube*, dimana fluida masuk kedalam penukar kalor melalui salah satu ujung (*front head*), dapat mengalir kedalam tube dan langsung keluar dari ujung *tube* yang melalui *rear head*, maka dari itu dapat disebut dengan 1 *pass tube*. Apabila jika fluida itu membelok lagi masuk kedalam *tube*, maka dapat terjadi 2 kali lintasan fluida dalam *tube*, maka dapat disebut dengan 2 *pass tube*. Pada bagian lain dibahas lebih luas tentang *pass* pada penukar kalor, antara lain 1-1 *pass*, dan 1-2 *pass*.

a. Alat penukar kalor 1-1 *pass*

Yang dimaksud dengan alat penukar kalor 1-1 *pass* itu adalah aliran fluida yang berada dalam *shell* 1 *pass* dan aliran fluida yang mengalir dalam *tube* 1 *pass* juga. Secara sederhana konstruksinya nampak pada gambar 2.9.

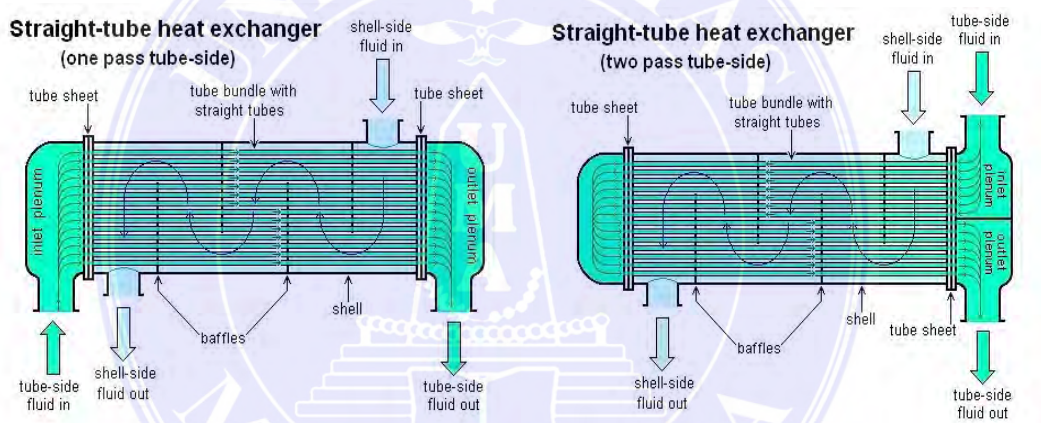


Gambar 2.9. Alat penukar kalor 1-1 *pass*

Pada gambar 2.9. aliran fluida sebelah shell akan berbelok-belok mengikuti sekat-sekat yang ada. Jumlah sekat yang dipasang itu akan mempengaruhi perpindahan panasnya. Tidak ada satu ketentuan mengharuskan fluida panas selalu disalurkan kedalam tube atau sebaliknya.

b. Alat Penukar kalor dengan 1-2 pass

Yang dimaksud sebagai alat penukar kalor 1-2 pass yaitu aliran didalam shell 1 pass dan aliran fluida pada sisi tube ada 2 pass. Untuk memperoleh aliran 2 pass pada sisi tube, dipergunakan *Floating head*. Pada gambar 2.10. diperlihatkan sebelah shell dengan menggunakan sekat (baffle).



Gambar 2.10. Alat penukar kalor 1-2 pass

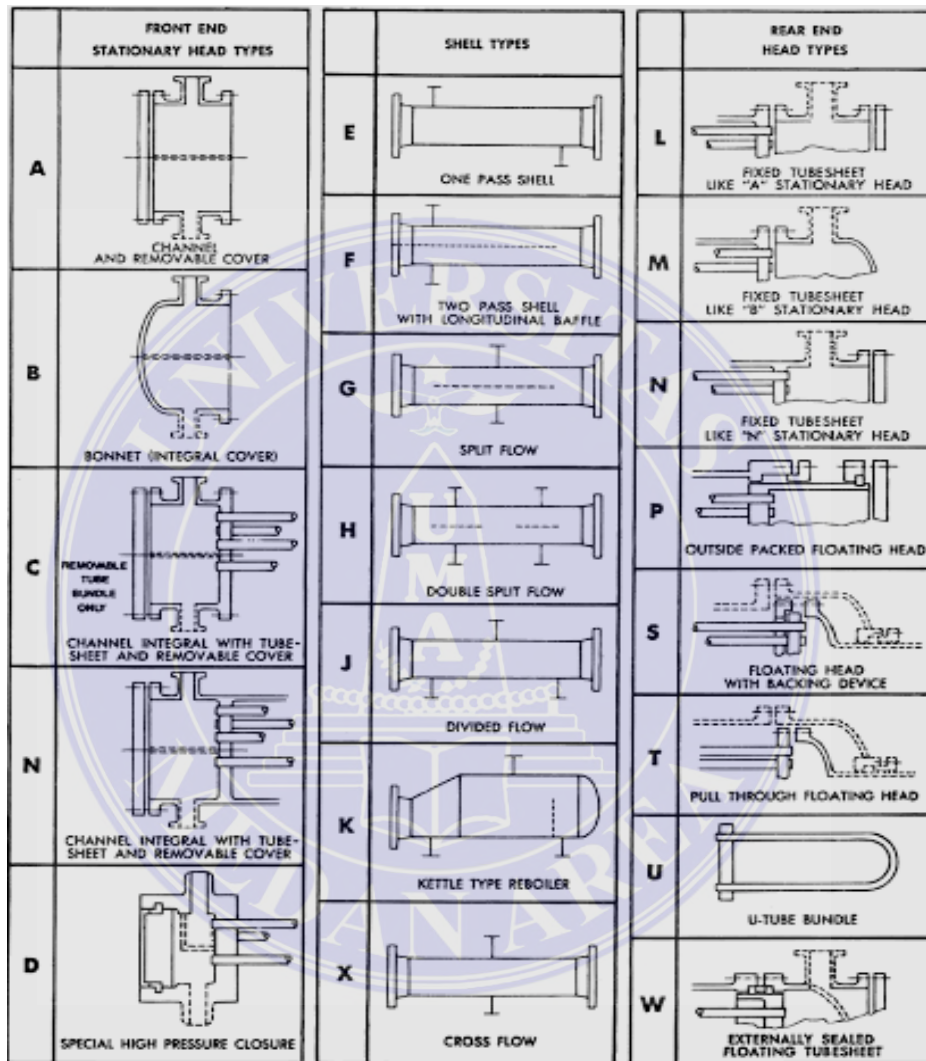
Pada gambar 2.10. aliran fluida sebelah shell akan berbelok-belok mengikuti sekat-sekat yang ada. Jumlah sekat yang dipasang itu akan mempengaruhi perpindahan panasnya. Tidak ada satu ketentuan mengharuskan fluida panas selalu disalurkan kedalam tube atau sebaliknya.

F. Komponen-komponen Alat Penukar kalor Secara Umum

1. *Shell* (kerangka)

Konstruksi dari shell sangat ditentukan oleh keadaan tube (tabung) yang akan ditempatkan didalamnya.

Sehingga *shell* ini bisa dapat dibuat dari pipa yang berukuran besar atau plat logam yang dapat dirol. Maka dari itu *shell* merupakan salah satu badan dari heat exchanger, yang mana didapat *tube bundle*. Bentuk-bentuk *shell* yang umum dipakai ditunjukkan pada gambar 2.11 berikut :



Gambar 2.11. *Shell* (Kerangka)

2. Tube

Tube atau pipa/tabung merupakan bidang pemisah antara kedua jenis fluida yang mengalir didalamnya dan sekaligus juga sebagai bidang perpindahan panas.

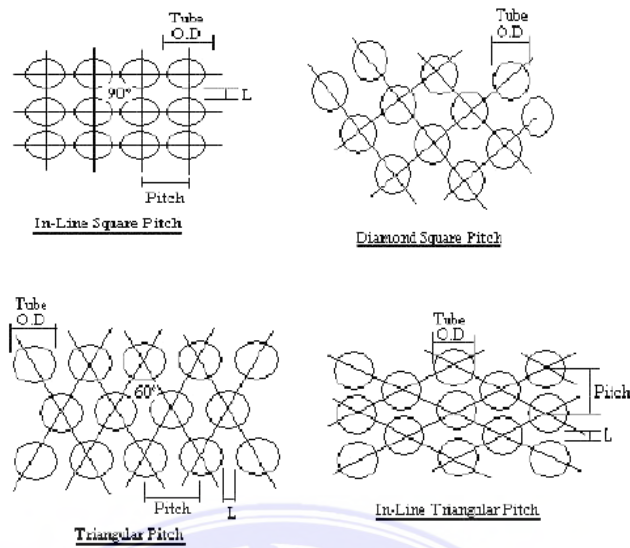
Dimana ketebalan dan bahan dari sebuah pipa harus dipilih pada tekanan operasi (kerja) fluida. Sehingga bahan pada pipa tersebut tidak boleh mudah korosi oleh fluida kerja.

Diameter yang terdapat dalam *tube* merupakan diameter dalam aktual dengan memiliki ukuran inch, dengan toleransi yang sangat cepat. *Tube* yang terdapat dibuat dari berbagai jenis logam, seperti besi, tembaga, perunggu, tembaga-nikel, aluminium perunggu, aluminium dan *stainless steel* serta lain sebagainya. Dimana ukuran ketebalan pipanya berbeda-beda dan yang dinyatakan dalam bilangan disebut *Birmingham Wire Gage* (BWG).

Ukuran pipa yang pada umumnya dapat digunakan untuk biasanya mengikuti ukuran-ukuran yang telah baku, semakin besar bilangan BWG, maka semakin tipis pipanya. Jenis-jenis *tube pitch* yang utama adalah:

- a. Lapangan persegi
- b. Nada segitiga
- c. Lapangan persegi diutar
- d. Pitch segitiga dengan jalur pembersihan (Kern, 1950)

Susunan dari tube atau tabung dibawah dibuat berdasarkan pertimbangan yang matang untuk menghasilkan jumlah pipa yang banyak dan juga untuk kemudahan perawatan (pembersihan permukaan pipa).

Gambar 2.12. Tipe Susunan *Tube*

3. Sekat (*Baffle*)

Fungsi dari pemasangan sekat (*baffle*) pada alat heat exchanger ini antara lain yaitu:

- Sebagai penahan dari tube bundle
- Untuk menambah atau mengurangi terjadinya getaran.
- Merupakan alat yang untuk mengarahkan sebuah arah aliran fluida yang ada di dalam tube.

Dilihat dari segi konstruksinya *baffle* bisa diklasifikasikan dalam empat kelompok, yaitu:

- Sekat plat yang berbentuk segmen.
- Sekat bintang (*rod baffle*).
- Sekat mendatar.
- Sekat *impingement*.

G. Keuntungan Yang Terdapat Pada *Shell & Tube Heat Exchanger*

Alat penukar panas *shell and Tube Heat Exchanger* mempunyai keuntungan sebagai berikut:

- a. Memiliki permukaan perpindahan panas yang memiliki persatuan volume yang lebih besar
- b. Mempunyai susunan mekanik baik dengan bentuk yang cukup baik untuk mengoperasikan tekanan.
- c. Tersedia dalam berbagai bahan konstruksi
- d. Prosedur pengoperasian lebih mudah
- e. Memiliki metode perancangan yang lebih baik, sehingga telah tersedia.
- f. Pembersihan dapat dilakukan dengan mudah.

H. Penentuan fluida *shell and tube Heat Exchanger* yaitu :

1. Fluida bertekanan tinggi yang dialirkan di dalam tube, memiliki standar yang cukup kuat menahan tekanan yang lebih tinggi.
2. Fluida berpotensi fouling yang dialirkan pada tube, dimana agar pembersihan lebih mudah dilakukan.
3. Fluida korosif dialirkan di dalam tube karena proses pengalirannya yang terdapat di dalam shell yang membutuhkan bahan konstruksi yang lebih mahal dan lebih banyak.
4. Fluida yang memiliki bertemperature tinggi yang secara umumnya untuk memanfaatkan panasnya sehingga dialirkan di dalam tube karena dengan ini kehilangan panas dapat dihindarkan.

5. Fluida yang memiliki viskositas yang lebih rendah, dapat dialirkan di dalam tube karena proses pengaliran fluidanya dengan viskositas tinggi di dalam penampang alir yang kecil membutuhkan energi yang lebih besar.
6. Fluida yang memiliki viskositas tinggi terdapat ditempatkan di *shell*, karena dapat digunakan *baffle* untuk menambah laju perpindahan panas.
7. Fluida dengan mengetahui laju alir yang rendah dapat dialirkan di dalam *tube*. Memiliki diameter tube yang kecil menyebabkan dimana kecepatan linier fluida (*velocity*) masih cukup tinggi, sehingga dapat menghambat fouling dan mempercepat perpindahan panas.
8. Fluida yang memiliki volume besar dapat dilewatkan melalui *tube*, karena adanya memiliki cukup ruangan.

I. *Shell And Tube*

Shell and Tube adalah salah satu jenis alat penukar kalor yang menurut konstruksinya dicirikan oleh adanya sekumpulan *tube* (*tube bundles*) yang dipasangkan didalam *shell* dengan dua jenis fluida. Seperti pada gambar 2.13 di bawah ini :



Gambar 2.13. *Shell and Tube*

Keuntungan dari *shell and tube*:

1. Konfigurasi yang dibuat akan memberikan luas permukaan yang besardengan bentuk atau volume yang kecil.
2. Mempunyai lay-out mekanik yang baik, bentuknya cukup baik untuk operasi bertekanan.
3. Menggunakan teknik fabrikasi yang sudah mapan (*well-established*).
4. Dapat dibuat dengan berbagai jenis material, dimana dapat dipilih jenis material yang digunakan sesuai dengan temperatur dan tekanan operasi.
5. Mudah membersihkannya.
6. Prosedur perencanaannya sudah mapan (*well-established*).
7. Konstruksinya sederhana, pemakaian ruangan relatif kecil.
8. Pengoperasiannya tidak berbelit-belit, sangat mudah dimengerti (diketahui oleh para operator yang berlatar belakang pendidikan rendah).
9. Konstruksinya dapat dipisah-pisah satu sama lain, tidak merupakan satu kesatuan yang utuh, sehingga pengangkutannya relatif gampang.

J. *Fouling Factor* (faktor Pengotoran)

Fouling (pengotoran) adalah endapan yang terbentuk pada permukaan perpindahan panas suatu bahan atau senyawa yang tidak pernah hilang selama alat penukar kalor digunakan. Faktor pengotoran ini dapat sangat mempengaruhi perpindahan panas pada proses alat penukar kalor. Ketika penukar panas berjalan, pengotoran selalu terjadi di dalam dan di luar tabung. Kotoran atau endapan pada permukaan luar tabung dapat meningkatkan ketahanan panasnya.

Sehingga hal ini akan dapat menurunkan koefisien perpindahan panas keseluruhan seperti pada gambar 2.14 dibawah ini:



Gambar 2.14. *Fouling* (pengotoran) pada *shell and tube*

Selama alat penukar kalor ini dioperasikan maka pengaruh pengotoran pasti akan terjadi. Dimana ada beberapa faktor yang dipengaruhi oleh akibat pengotoran sebagai berikut :

- a. Temperatur fluida
 - b. Temperatur dinding tube
 - c. Material tube serta ketelitian pengerjaan
 - d. Kecepatan aliran fluida
 - e. Natural fluids dan deposit material
 - f. Waktu atau lamanya beroperasi dari pembersihan terakhir.
1. Proses Pembentukan

Berdasarkan proses terbentuknya endapan atau kotoran, faktor pengotoran terbagi beberapa jenis yaitu :

- a. Pengotoran akibat reaksi kimia (*chemical reaction fouling*).
- b. Pengotoran akibat korosi (*corrosion fouling*).
- c. Pengotoran akibat aktifitas biologi (*biological fouling*).
- d. Pengotoran akibat pengendapan yang terdapat pada zat padat dalam larutan tersebut (*precipitation fouling*).

- e. Pengotoran akibat pengendapan yang memiliki partikel padat yang terdapat pada fluida tersebut (*particulate fouling*).

Dalam hal ini dapat disimpulkan bahwa semakin tebal pengotoran pada alat penukar kalor semakin besar pula gangguan (hambatannya) yang terjadi.

2. Penyebab Terjadinya Fouling:

- a. Adanya pengotoran berat, dimana pengotoran nya berbentuk kerak keras yang berasal dari hasil korosi atau coke keras.
- b. Adanya pengotoran berpori, yang proses pengotoran nya berbentuk kerak lunak yang berasal dari dekomposisi kerak keras.

3. Kondisi Terjadinya Fouling

Kondisi yang mempengaruhi terjadinya fouling yaitu :

- a. Parameter operasi alat penukar kalor, yaitu: kecepatan, suhu permukaan, dan suhu cairan.
- b. Sifat-sifat fluida, yaitu: Padatan tersuspensi, padatan terlarut, gas terlarut, dan elemen jejak.

4. Mekanisme Terjadinya Fouling

Pada umumnya mekanisme terjadinya *fouling*, pembentukan dan pertumbuhan deposit, terdiri dari :

1. Transport partikel ke permukaan
 - a. secara mekanik *infaaction*
 - b. secara *turbulen difusion*
 - c. *Thermophoresis* dan *Electrophoresis*
2. *Adhesi* dan *Kohesi* pada permukaan.
3. *Lampiran (Attchment)*, Awal dari terbentuknya lapisan deposit.

Menurut Bambang Setioko (2011), terdapat beberapa hal tentang mekanisme pembentukan fouling, antara lain :

- a. *Sedimentation fouling* Pengendapan pengotor sangat dipengaruhi oleh kecepatan aliran dan sedikit dipengaruhi oleh temperatur dinding
- b. *Chemical reaction fouling* Pengotoran terjadi akibat reaksi kimia di dalam fluida, di atas permukaan perpindahan panas, dimana material bahan permukaan perpindahan panas tidak ikut bereaksi, seperti adanya reaksi polimerisasi, dan lain-lain. Mekanisme pengotor ini meliputi perubahan-perubahan fisik *Corrosion product fouling*.
- c. *Biological fouling* Pengotoran ini berhubungan dengan aktifitas organisme biologi yang terdapat atau terbawa dalam aliran fluida seperti lumut, jamur, dan lain-lain.
- d. *Combined mechanism* Sebagian besar dari proses pengotoran di atas dapat terjadi secara kombinasi. Umumnya adalah kombinasi dari *sedimentation fouling* *inverse solubility fouling pada cooling tower water*.

K. Proses Perpindahan Panas

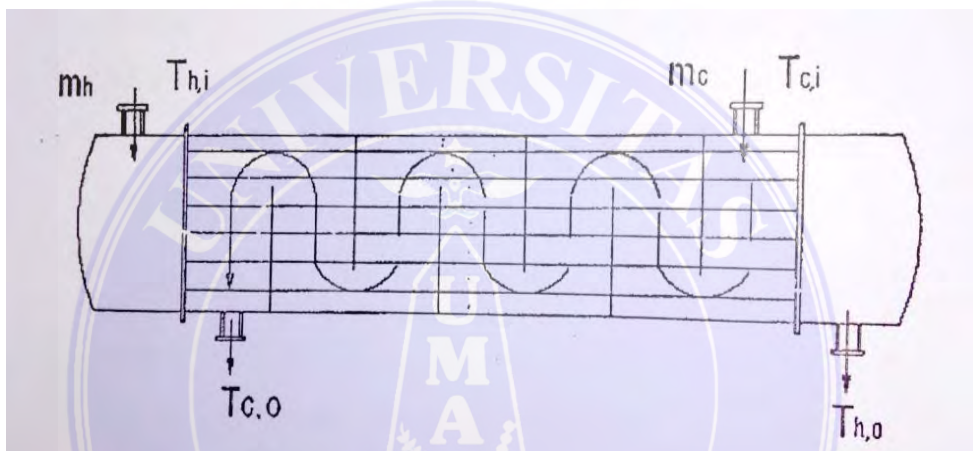
Perpindahan kalor dari suatu zat ke zat lain sering kali terjadi dalam industry proses. Pada penguapan dan pada umumnya juga pada pelarutan, kalor harus dimasukkan, adalah hukum alam bahwa kalor itu suatu bentuk energi. Kalor yang mengalir dengan sendirinya dari suhu yang tinggi ke suhu yang rendah. Maka dari itu akan tetapi, gaya dorong untuk aliran ini adalah merupakan perbedaan suhu.

Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa energy tidak musnah yaitu seperti hukum asas yang lain, contohnya hukum kekekalan masa dan momentum,

ini artinya kalor tidak hilang. Energy hanya berubah bentuk dari bentuk yang pertama kebentuk kedua.

L. Persamaan-persamaan yang di gunakan.

Pada alat penukar kalor yang dapat digunakan adalah merupakan suatu jenis tipe *shell and tube* yang berlawanan arah dengan standart yang ditentukan yaitu TEMA atau tipe E, dimana satu lintas *shell* dan satu lintas *tube*. Pada gambar 2.14. skema alat penukar kalor yang digunakan ialah.



Gambar 2.15. alat penukar kalor jenis satu *shell and satu tube*.

Pada tipe E tersebut dimana dalam hal ini media pemanas dapat diambil dari gas buang mesin diesel yang memiliki aliran didalam tube dan fluida nya mengalir disisi shell.

1. Perpindahan panas secara Thermodinamika

Besarnya kalor yang diserap oleh fluida dingin menurut *William S* yaitu:

$$q_c = \dot{m}_c \times C_{p_{air}} \times \Delta T_c$$

$$q_c = \dot{m}_c \times C_{p_{air}} \times (T_{c,o} - T_{c,i}) \dots\dots\dots 2.1$$

Dimana :

q_c = Kalor yang diserap fulida dingin (kW)

\dot{m}_c = Laju aliran massa air (kg/s)

Cp_{air} = Panas jenis air (kJ/kg°C)

$T_{c,o}$ = Temperatur air keluar tube (°C)

$T_{c,i}$ = Temperatur air masuk tube (°C)

Sifat fluida dingin dapat dievaluasi pada temperatur yang dingin nya mencapai rata-rata, yakni:

$$T_c = \frac{T_{c,i} + T_{c,o}}{2}$$

Besarnya kalor yang diserap oleh fluida dingin menurut *William S* yaitu:

$$q_h = \dot{m}_h \times Cp_{gas} \times \Delta T_h$$

$$q_h = \dot{m}_h \times Cp_{gas} \times (T_{h,i} - T_{h,o}) \dots\dots\dots 2.2$$

Dimana :

q_h = Kalor yang diserap fluida panas (kW)

\dot{m}_h = Laju aliran massagas (kg/s)

Cp_{gas} = Panas jenis gas (kJ/kg°C)

$T_{h,i}$ = Temperatur gas keluar *shell* (°C)

$T_{h,o}$ = Temperatur gas masuk *shell* (°C)

Sifat fluida panas dapat dievaluasi pada temperatur yang diamanpanas nya mencapai rata-rata, yakni:

$$T_h = \frac{T_{h,i} + T_{h,o}}{2} \dots\dots\dots 2.3$$

2. Efektivitas Alat Penukar Kalor

Efektivitas merupakan dimana suatu alat penukar kalor yang dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara perpindahan kalor yang nyata dengan demikian perpindahan panas memiliki maksimum yang mungkin dapat terjadi dalam suatu APK tersebut:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{maks}}$$

Sehingga untuk dapat menentukan efektivitas alat penukar kalor, yang dimana menurut *William S* harus ditentukan fluida minimum, serta dimana kapasitas panas yang minimum dapat dipilih dari :

a. Untuk fluida dingin : $C_c = \dot{m}_c \times C_{p_{air}}$

b. Untuk fluida panas : $C_h = \dot{m}_h \times C_{p_{gas}}$

Dimana : C_c = Kapasitas panas air (kW/°C)

C_h = Kapasitas panas gas (kW/°C)

Jika fluida dingin sebagai fluida minimum, sehingga maka efektivitas alat penukar kalor nya dapat diperoleh dari persamaan sebagai berikut :

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{maks}} = \frac{(T_{c,o} - T_{c,i})}{(T_{h,i} - T_{c,i})} \dots\dots\dots 2.4$$

Jika fluida panas sebagai fluida minimum, sehingga maka efektivitas alat penukar kalor nya dapat diperoleh dari persamaan sebagai berikut :

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{maks}} = \frac{(T_{h,i} - T_{h,o})}{(T_{h,i} - T_{c,i})} \dots\dots\dots 2.5$$

Dimana:

ε = Efektivitas alat penukar kalor (%)

q = Perpindahan kalor nyata (kW)

q_{maks} = Perpindahan kalor yang maksimum yang dapat mungkin terjadi (kW)

Jika perpindahan panas maksimum maka menurut *William S* yaitu:

$$q_{maks} = C_{min} \times (T_{h,i} - T_{c,i}) \dots\dots\dots 2.6$$

Dimana :

Jika $C_c < C_h$ maka $C_{min} = C_c$

Jika $C_h < C_c$ maka $C_{min} = C_h$

M. Perpindahan Panas Dengan Menggunakan Metode LMTD

a. Menurut *William S* kalor yang dapat berpindah secara perpindahan panas yaitu

$$q = U_o \times A_o \times F \times LMTD \dots\dots\dots 2.7$$

Dimana:

q = Kalor yang berpindah secara perpindahan panas (kW)

U_o = Koefisien perpindahan panas menyeluruh (kW/m²°C)

F = Faktor Koreksi

$LMTD$ = *Log Mean Temperature Difference* (°C)

b. Luas perpindahan panas keseluruhan menurut *William S* yaitu :

$$A_o = N_t \times \pi \times OD_t \times L \dots\dots\dots 2.8$$

Dimana:

A_o = Luas perpindahan panas (m²)

OD_t = Diameter luar tube (m)

L = Panjang tube (m)

N_t = Jumlah tube

c. Koefisien perpindahan panas menyeluruh (U_o) tanpa pengotoran menurut *JP*.

Holman.

$$U_o = \frac{1}{\frac{OD_t}{ID_t} \times \frac{1}{h_i} + \frac{OD_t}{2 \times k_{tube}} \times \ln \frac{OD_t}{ID_t} + \frac{1}{h_o}} \dots\dots\dots 2.9$$

Dimana :

h_i = Koefisien perpindahan panas didalam *tube* (kW/m²°C)

h_o = Koefisien perpindahan panas luar *tube* (kW/m²°C)

k_{tube} = Konduksi panas *tube* (kW/m²°C)

ID_t = Diameter dalam *tube* (m)

Bilangan *Reynolds* (Re_t) menurut *William S* :

$$Re_t = \frac{\dot{m}_h \times ID_t}{\rho_{gas} \times A_t \times v_{gas}} \dots\dots\dots 2.10$$

Dimana : Re_t = Bilangan *reynolds* didalam *tube*

ID_t = Diameter dalam *tube* (m)

ρ_{gas} = Densitas gas (kg/m³)

v_{gas} = Viscositas kinematik gas (m²/s)

A_t = Luas aliran masa sisi *tube* (m²)

Luas aliran sisi *tube* A_t menurut *William S* yaitu:

$$A_t = \frac{N_t \times \pi \times (ID_t)^2}{4 \times N_p} \dots\dots\dots 2.11$$

Dimana : N_t = Jumlah *tube*

N_p = Jumlah *pass* *tube*

Menurut *Perry* bilangan *Nusselt* didalam *tube* :

$$Nu_t = \frac{h_i \times ID_t}{k_{gas}} = 0,116 (Re_t^{2/3} - 125) \times \left[1 + \left(\frac{ID_t}{L} \right)^{2/3} \right] \times P_{rgas}^{1/3} \dots\dots\dots 2.12$$

Dimana : Nu_t = Bilangan *nusselt* didalam tube

k_{gas} = Konduktivitas thermal air (kW/m °C)

P_{rgas} = Bilangan prandtl gas

Diameter ekivalen (De) menurut *William S* yaitu :

Susunan segitiga:

$$De = \frac{(3.44 \times P_t^2) - \pi \times OD_t^2}{\pi \times OD_t} \dots\dots\dots 2.13$$

Dimana : De = Diameter ekivalen (m)

P_t = Jarak antara dua pusat tube / *pitch* (m)

OD_t = Diameter luar tube (m)

Luas aliran sisi *shell* menurut *William S* yaitu :

$$A_s = \frac{D_s \times C \times B}{P_t} \dots\dots\dots 2.14$$

Dimana : A_s = luas aliran sisi shell (m²)

D_s = Diamete dalam shell (m)

P_t = Jarak antara dua pusat tube / *pitch* (m)

C = Jarak antara dua permukaan tube/*Clereance* (m)

B = Jarak antara sekat/*baffle* (m)

Jarak anatar dua permukaan *tubeClereance* (C) menurut *William S* yaitu :

$$C = P_t - OD_t \dots\dots\dots 2.15$$

Jarak antara sekat/ *baffe* (B) :

$$B = \frac{L}{N_b + 1} \dots\dots\dots 2.16$$

Menurut *JP. Holman*, bilangan *Nusselt* didalam *shell* diperoleh dari persamaan :

$$Nu_s = \frac{h_o \times D_e}{K_{air}} = [0,35 + 0,56 \times (Re_s)^{0,52}] \times (Pr_{air})^{0,3} \dots\dots\dots 2.17$$

Dimana: Nu_s = Bilangan *nusselt* didalam shell

K_{air} = Konduktivitas panas air (kW/m °C)

Pr_{air} = Bilangan prandtl air

h_o = Koef. Perpan konveksi didalam shell (kW/m² °C)

D_e = Diameter ekivalen (m)

N. Penurunan Tekanan pada *Shell Side*

Jika mencari besarnya penurunan tekanan pada sisi shell dalam alat penukar kalor, masalahnya proporsional dengan beberapa kali fluida itu melalui tube bundle diantara sekat-sekat. Dimana sehingga terdapat besarnya penurunan tekanan pada isothermal untuk fluida yang dipanaskan atau didinginkan.

Menurut *William S* penurunan tekanan yang terdapat didalam shell (ΔP_s) dapat dirumuskan dengan :

$$\Delta P_s = \frac{\rho_{air} \times V_s^2}{2 \times g_c} \frac{D_s}{D_e} \times f_s \times (N_b + 1) \dots\dots\dots 2.18$$

Dimana:

ΔP_s = Penurunan tekanan didalam shell (Pa)

V_s = Kecepatan aliran CO₂ didalam shell (m/s)

g_c = Faktor konversi dimensional (1 kg.m/N.s²)

f_s = Faktor gesekan dalam shell

N_b = Jumlah baffle/sekat

Menurut *William S*, dimana faktor gesekan didalam *tube* (f_s), dapat dirumuskan sebagai :

$$f_s = \exp(0.576 - 0.19 \ln(Re_s)) \dots \dots \dots 2.19$$

Dimana : f_s = Faktor gesekan dalam shell

Re_s = Bilangan reynolds disisi shell

Kecepatan aliran didalam *shell* (V_s) menurut *William S* yaitu :

$$V_s = \frac{\dot{m}_h}{\rho_{air} \times A_s} \dots \dots \dots 2.20$$

Dimana : V_s = Kecepatan aliran air disisi shell (m/s)

\dot{m}_h = Laju aliran massa gas (kg/s)

ρ_{air} = Densitas air (kg/m³)

A_s = Laju aliran sisi shell (m²)

O. Penurunan Tekanan pada *Tube Side*

Besarnya penurunan tekanan yang terdapat pada *tube side* dalam alat penukar kalor yang telah sudah diformulasikan (dirumuskan). Untuk dapat persamaan yang terhadap pada faktor gesekan dari fluida yang didinginkan atau yang dipanaskan didalam *tube*.

Menurut *William S* penurunan tekanan yang terdapat didalam tube (ΔP_t) dapat dirumuskan dengan :

$$\Delta P_t = \frac{\rho_t \times V_t^2}{2 \times g_c} \left[\frac{f_t \times L \times N_p}{D_{p,i}} + (4 \times N_p) \right] \dots \dots \dots 2.21$$

Dimana: ΔP_t = Penurunan tekanan dalam tube (Pa)

V_t = Kecepatan air dalam tube (m/s)

g_c = konstanta dalam satuan internasional (1 kg.m/N.s^2)

f_t = Faktor gesekan dalam tube

N_p = Jumlah pass/lintasan

Menurut *William S*, dimana faktor gesekan didalam *tube* (ft), dapat dirumuskan

sebagai : $f_t = [(0,79 \times \ln(Re_t)) - 1,64]^{-2}$ 2.22

Dimana : f_s = Faktor gesekan dalam tube

Re_t = Bilangan reynolds disisi tube

Kecepatan aliran air didalam tube (V_t) menurut *William S* yaitu :

$$V_t = \frac{\dot{m}}{\rho_{gas} \times A_t} \dots\dots\dots 2.23$$

Dimana : V_t = Kecepatan aliran gas disisi tube (m/s)

\dot{m}_c = Laju aliran massa air (kg/s)

ρ_{gas} = Densitas gas (kg/m^3)

A_t = Laju aliran sisi tube (m^2)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

1. Tempat

Penelitian ini dilaksanakan di PT. Berkat Bima Sentana PLTD 120 MW berlokasi di Jl. Pulau Sicanang Belawan-Sumbangut..

2. Waktu

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Agustus 2020, dengan detail jadwal tugas akhir seperti terlihat pada tabel 3.1 berikut ini:

Tabel 3. 1. Jadwal Penelitian

Aktifitas	2020				2021-2022		
	April	Mei	Juni	Agustus	November	Januari	Februari
Pengajuan Judul	■						
Penyeselaian		■					
Proposal		■					
Seminar			■				
Proposal			■				
Pengumpulan				■			
Data				■			
Analisis Data					■		
Seminar Hasil						■	
Sidang Sarjana							■

B. Alat Dan Bahan

1. Alat

a. Digital Infrared Thermometer

Termometer infra merah digital adalah alat ukur yang memiliki kemampuan untuk mendeteksi suhu atau suhu optik (selama suatu objek diamati), dengan menggunakan pengukuran energi radiasi infra merah.



Gambar 3.1. Termometer digital

SPECIFICATION	
Temperature range	-30~1500°C (-22~2732°F)
Accuracy	0~1500°C(32~2732°F) :±1.5°C(±2.7°F) or±1.5% -30~0°C(-22~32°F):±3°C (±5°F) Whichever is greater
Resolution	0.1°C or 0.1°F
Repeatability	1% of reading or 1°C
Response time	500 mSec, 95% response
Spectral response	5-14 um
Emissivity	0.10~1.00 Adjustable (0.95 Preset)
Distance to Spot size	50:1
Operating Temperature	0 ~40°C (32 ~ 104°F)
Operating Humidity	10~95%RH non-condensing, up to 30°C(86°F)
Storage Temperature	-20 ~ 60°C (-4~140°F)
Power	9V Alkaline or NiCd battery
Typical battery life (Alkaline)	Non-laser mode: 22 hrs; Laser Models: 12 hrs
Weight	270g
Dimension	141*60*200mm
Number of data stored	80

b. Flowmeter

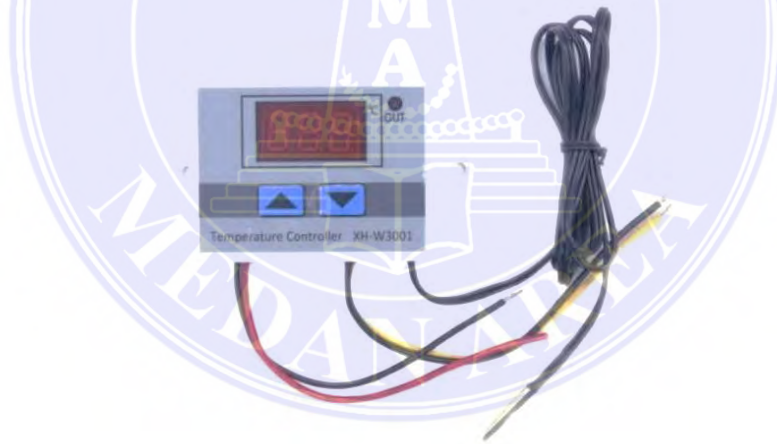
Flowmeter adalah untuk menentukan aliran di masing-masing pipa yang membawa cairan panas dan yang membawa cairan dingin.



Gambar 3.2. Flowmeter

c. Thermostat

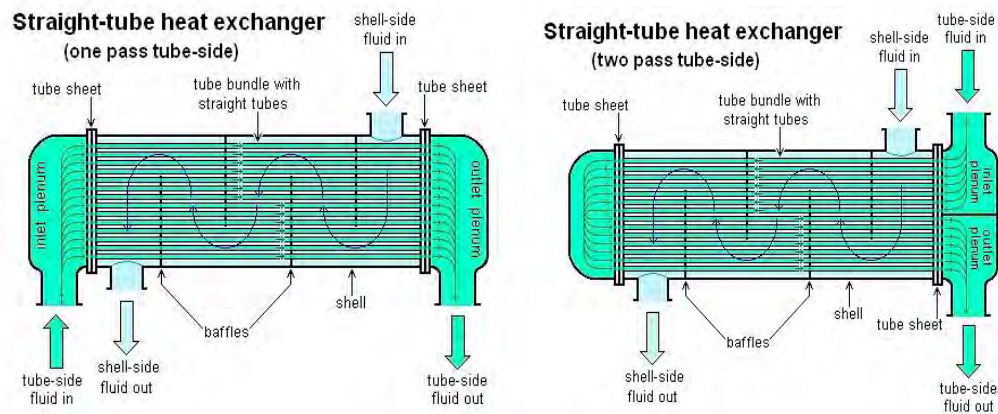
Fungsi Thermostat adalah untuk mengatur tekanan termal yang diberikan oleh air, yang akan digunakan sebagai fluida pemanas dalam penelitian ini.



Gambar 3.3. Thermostat

d. Heat exchanger

Tipe 1-2 shell and tube heat exchanger, heat exchanger adalah suatu alat yang menggunakan energi panas dari fluida temperatur tinggi untuk memanaskan fluida temperatur rendah atau sebaliknya. Alat ini merupakan subjek utama penelitian.



Gambar 3.4. Heat exchanger tipe shell and tube 1-2 pass

2. Bahan

Bahan yang menjadi objek pada penelitian ini terdiri dari :

a. Air Laut

Seperti yang kita semua tahu, air berasal dari laut, yang pertama kali mengalami proses termal.

C. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah dengan menganalisis secara langsung objek yang akan dianalisis dan mengumpulkan data yang diperlukan untuk analisis.

1. Proses Penelitian

a. Observasi

Observasi merupakan proses pertama yang dilakukan dalam penelitian ini karena penelitian ini mencakup berbagai studi empiris, antara lain studi kasus dan studi lapangan. Observasi penelitian ini dilakukan di PT. Berkat Bima Sentana PLTD 120 MW berlokasi di Belawan-Sumbangut.

b. Teori

Teori-teori penelitian dikembangkan dan relevan dengan masalah yang dihadapi di lapangan sebagai dasar untuk tahap selanjutnya. Dalam konteks ini, penelitian kepustakaan dilakukan dengan mempelajari teori-teori yang digunakan untuk mencapai tujuan penelitian yang ingin dicapai. Studi kepustakaan ini diperoleh dari berbagai sumber, antara lain materi teori dasar di PT. Berkat Bima Sentana PLTD 120 MW berlokasi di Belawan-Sumbangut, serta beberapa jurnal dan buku, sesuai dengan pokok bahasan judul tugas akhir..

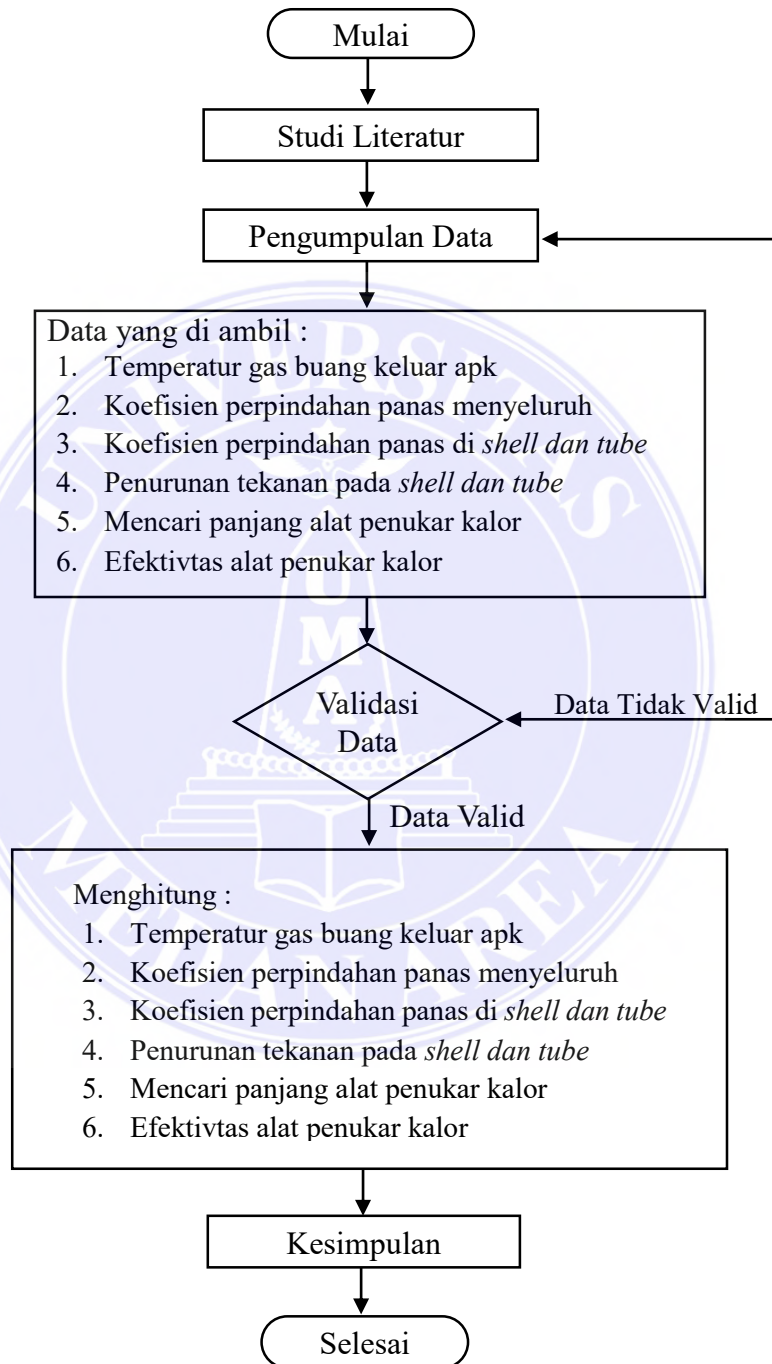
2. Pengumpulan Data

Pengumpulan data adalah suatu prosedur yang sistematis dan baku untuk memperoleh data yang dibutuhkan. Metode pengumpulan data dilakukan dengan cara mencatat suhu tubuh subjek yang diteliti. Data yang diperlukan meliputi:

- a. Mencari Temperatur Gas Buang Keluar APK
- b. Menghitung Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh
- c. Menghitung koefisien perpindahan panas di shell dan Tube
- d. Menghitung penurunan tekanan pada Shell dan tube
- e. Mencari Panjang Alat Penukar Kalor
- f. Menghitung Efektivitas Alat Penukar Kalor

D. Diagram Alir

Metodelogi penelitian yang digunakan selama penyusunan tugas akhir ini disajikan dalam flow chart berikut ini :



Gambar 3.5. Diagram Alir

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Setelah melakukan analisis dengan judul “Pengaruh Faktor Pengotoran Terhadap Alat Penukar Kalor Tipe Shell And Tube Tipe 1 – 2 Pase”, berdasarkan data yang dihitung, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Laju aliran massa gas buang alat penukar kalor adalah $m_h = 0,06523 \text{ kg/s}$.
2. Efektifitas alat penukar kalor adalah 66,837%.
3. Akibat dari pengaruh fouling pada alat penukar kalor maka diketahui luasan keseluruhan kotor adalah $A_f = 3,3173507171 \text{ m}^2$ sehingga luas perpindahan panas efektif adalah $A_{eff} = 2,211567145 \text{ m}^2$.

B. Saran

1. Ada banyak jenis penukar panas, dan perlu dipahami kegunaannya, masing-masing dengan kelebihan dan kekurangannya sendiri.
2. Peneliti selanjutnya diharapkan dapat menghitung heat exchanger lain yang sudah ada PLTD Berkat Bima Sentana Sumbagut. contohnya adalah evaporator atau kondensor
3. Upaya yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kinerja heat exchanger adalah dengan mengganti material. Bahan perumahan dapat diganti dengan baja tahan karat yang dilapisi dengan isolator, dan tabung dapat diganti dengan tembaga. Ini dirancang untuk meningkatkan nilai koefisien perpindahan panas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Lazim, " TUBE, PENGARUH KECEPATAN DAN SIFAT FLUIDA PENDINGIN TERHADAP KOEFISIEN PERPINDAHAN KALOR PADA PENUKAR KALOR SHELL AND," *Jurnal Desiminasi Teknologi*, vol. 1, pp. 50-58, January 2013.
- [2] R. S. I. Bizzy, "STUDI PERHITUNGAN ALAT PENUKAR KALOR TIPE SHELL AND TUBE DENGAN PROGRAM HEAT TRANSFER RESEARCH INC. (HTRI)," *JURNAL REKAYASA MESIN*, vol. 13, pp. 67-77, maret 2013.
- [3] K. Sunandar, "ANALISIS BILANGAN TAK BERDIMENSI PADA PROSES FOULING DI KONDENSER," 2003J. P. Holman, *Perpindahan Kalor*, Jakarta: Erlangga, 1984.
- [4] . P. S. A. M. L. Reind Junsupratyo, "ANALISIS EFISIENSI EFEKTIF HIGH PRESSURE HEATER (HPH) TIPE VERTIKAL U SHAPE DI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP AMURANG UNIT 1," *JURNAL ONLINE POROS TEKNIK MESIN*, vol. 7, no. 1, pp. 37-45, 2018. D. Q. Kern, *Process Heat Transfer*, New York: McGraw-Hill, 1965.
- [5] A. S. H. I. Ahmad Budiman, "Analisis Perpindahan Panas Dan Efisiensi Efektif High Pressure Heater (Hph) Di Pltu Asam-Asam," *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Unlam*, vol. 03, pp. 76-82, 2014.

- [6] E. Somerscales, *Fouling Of Heat transfer Surfaces An Historical Review*, New York: Heat Transfer Engineering, 1990.
- [7] Muchammad, "ANALISIS PENURUNAN PERFORMA HEAT EXCHANGER STABILIZER REBOILER 011E120 DI PT. PERTAMINA REFINERY UNIT IV CILACAP," *Momentum*, vol. 13, pp. Hal. 72-77, Oktober 2017.
- [8] Chandrasa,S dan Antonius Anton., "Pengaruh Karakteristik Dinamik Tahanan Termal Deposit Terhadap Kinerja Sebuah Condenser", *Proceedings The 2000 FTUI Seminar-Quality in Research*,vol.:III, III-1-4-1 s.d III-1-4-9, Jakarta, (2000).
- [9] S. S. Muhammad Furqan¹, "KAJI EKSPERIMENTAL DAN ANALISA KINERJA PENUKAR PANAS UDARA TYPE SHELL AND TUBE JENIS ALIRAN BERLAWANAN," *JURNAL MESIN SAINS TERAPAN*, vol. 4, FEBRUARI 2020.
- [10] G. J. U. Yohanes M. V. Lebo, "Analisa Unjuk Kerja Alat Penukar Kalor TipeShellAndTubeUntukPendinginan Minyak Pelumas Pada Sistem PenggerakInduced Draft Fan," *Jurnal Teknik Mesin Undana*, vol. 2, pp. 60-64, Oktober 2015.
- [11] J. P. Holman, *Perpindahan Kalor*, Jakarta: Erlangga, 1984.
- [12] D. Q. Kern, *Process Heat Transfer*, New York: McGraw-Hill, 1965.
- [13] J. H. Lienhard, *Heat Transfer*, New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1987.

Lampiran 1

Tabel Sifat-sifat air

°F	°C	C_p (kJ/kg. °C)	ρ (kg/m ³)	μ (kg/m. s)	k (W/m. °C)	Pr
32	0	4225	999,8	$1,79 \times 10^{-3}$	0,566	13,25
40	4,44	4208	999,8	1,55	0,575	11,35
50	10	4195	999,2	1,31	0,585	9,40
60	15,56	4179	998,6	1,12	0,595	7,88
70	21,11	4179	997,4	$9,8 \times 10^{-4}$	0,604	6,78
80	26,67	4174	995,8	8,6	0,614	5,85
90	32,22	4174	994,9	7,65	0,623	5,12
100	37,78	4174	993,0	6,82	0,630	4,53
110	43,33	4174	990,6	6,16	0,637	4,04
120	48,89	4174	988,8	5,62	0,644	3,64
130	54,44	4179	985,7	5,13	0,649	3,30
140	60	4179	983,3	4,71	0,654	3,01
150	65,55	4183	980,3	4,3	0,659	2,73
160	71,11	4186	977,3	4,01	0,665	2,53
170	76,67	4191	973,7	3,72	0,668	2,33
180	82,22	4195	970,2	3,47	0,673	2,16
190	87,78	4199	966,7	3,27	0,675	2,03
200	93,33	4204	963,2	3,06	0,678	1,90
220	104,4	4216	955,1	2,67	0,684	1,66
240	115,6	4229	946,7	2,44	0,685	1,51
260	126,7	4250	937,2	2,19	0,685	1,36
280	137,8	4271	928,1	1,98	0,685	1,24
300	148,9	4296	918,0	1,86	0,684	1,17
350	176,7	4371	890,4	1,57	0,677	1,02
400	204,4	4467	859,4	1,36	0,6665	1,00
450	232,2	4585	825,7	1,20	0,646	0,85
500	260	4731	785,2	1,07	0,616	0,83
550	287,7	5024	735,5	$9,51 \times 10^{-5}$		
600	315,6	5703	678,7	8,68		

Sumber "Alat Penukar Kalor (*Heat Exchanger*)", T. M. Sitompul

Lampiran 2

Tabel sifat-sifat air (air dibawah 1 atm, dan air jenuh diatas 100 °C)

Temperature (°C)	Kerapatan (kg/l)	Vikositas kinematik (m ² /s)	Tekanan Uap Jenuh (kgf/cm ²)
0	0,9998	1,792 x 10 ⁻⁶	0,00623
5	1,0000	1,520	0,00889
10	0,9998	1,307	0,01251
20	0,9983	1,004	0,02383
30	0,9957	0,801	0,04325
40	0,9923	0,658	0,07520
50	0,9980	0,554	0,12578
60	0,9832	0,475	0,20313
70	0,9777	0,413	0,3178
80	0,9716	0,365	0,4829
90	0,9652	0,326	0,7149
100	0,9581	0,295	1,0332
120	0,9431	0,244	2,0246
140	0,9261	0,211	3,685
160	0,9073	0,186	6,303
180	0,8869	0,168	10,224
200	0,8647	0,155	15,855
220	0,8403	0,150	23,656
240	0,814	0,136	34,138
260	0,784	0,131	47,869
280	0,751	0,128	65,468
300	0,712	0,127	87,621

Lampiran 3

Tabel sifat-sifat CO_2

T, K	C_p (kJ/kg. °C)	ρ (kg/m ³)	ν (m ² /s)	k (W/m. °C)	Pr
220	0,783	2,4733	4,490 x 10 ⁻⁶	0,010805	0,818
250	0,804	2,1654	5,813	0,012884	0,793
300	0,871	1,7973	8,321	0,016572	0,770
350	0,900	1,5362	11,19	0,02047	0,755
400	0,942	1,3424	14,39	0,02461	0,738
450	0,980	1,1918	17,90	0,02897	0,721
500	1,013	1,0732	21,67	0,03352	0,702
550	1,047	0,9739	25,74	0,03821	0,685
600	1,076	0,8938	30,02	0,04311	0,668

Sumber "Perpindahan Panas" J.P Holman