

**ANALISIS PERPINDAHAN PANAS ALAT PENUKAR KALOR
SHELL AND TUBE PADA PIPA TEMBAGA DENGAN
TUBE SUSUNAN BUJUR SANGKAR
SKALA LABORATORIUM**

TUGAS AKHIR

*Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar sarjana pada
Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik
Universitas Medan Area*

**Disusun Oleh :
GUSDANTORO
12.813.0011**



PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS MEDAN AREA

MEDAN

2016

LEMBAR PENGESAHAN
ANALISIS PERPINDAHAN PANAS ALAT PENUKAR KALOR
***SHELL AND TUBE* PADA PIPA TEMBAGA DENGAN**
TUBE SUSUNAN BUJUR SANGKAR
SKALA LABORATORIUM

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar sarjana pada
Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik
Universitas Medan Area

Disusun Oleh :
GUSDIANTORO
12.813.0011

Diketahui :

(Dr. Ir. Suditama, MT)
Dosen Pembimbing I

(Ir. Husin Ibrahim, MT)
Dosen Pembimbing II

Disetujui Oleh :

(Prof. Dr. Dadan Ramdan, M.Eng , M.sc)
Dekan

(Bobby Umroh , ST, MT)
Ka. Prodi Teknik Mesin

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Gusdiantoro

NPM : 12.813.0011

Jurusan : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Judul Skripsi : “ Analisis perpindahan panas alat penukar *kalorshell and tube* pada pipa tembaga dengan tube susunan bujur sangkar skala laboratorium”

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir 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 yang telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah dan etika penulisan ilmiah .

Saya bersedia menerima sanksi – sanksi dengan peraturan yang berlaku , apabila di kemudian hari di temukan adanya plagiat dalam tugas akhir ini .

Medan , 12 January 2017

(**GUSDIANTORO**)

12.813.0011

ANALISIS PERPINDAHAN PANAS ALAT PENUKAR KALOR SHELL AND TUBE PADA PIPA TEMBAGA DENGAN TUBE SUSUNAN BUJUR SANGKAR SKALA LABORATORIUM

Gusdiantoro
Jurusan Teknik Mesin, Universitas Medan Area

ABSTRAK

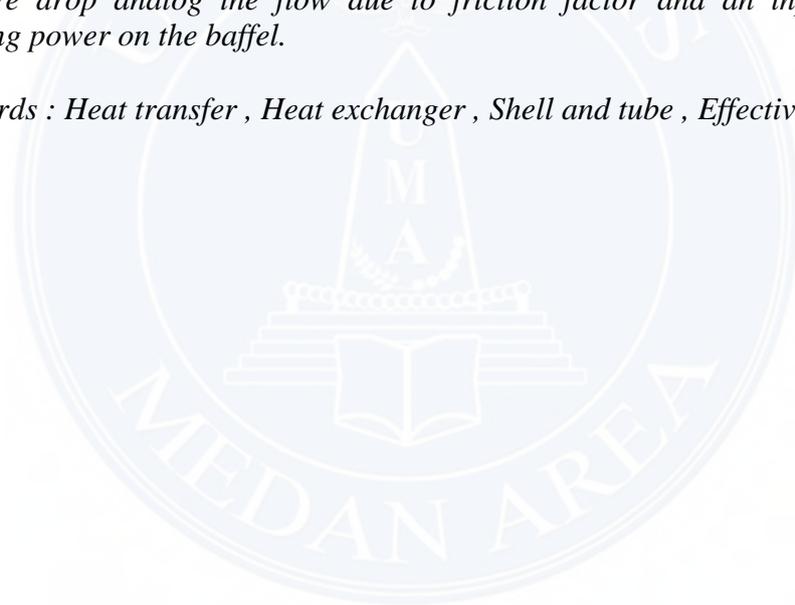
Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui Besar perpindahan kalor total dengan melakukan setelan aliran jumlah yang masuk ke dalam tabung shell. Spesimen yang digunakan dalam penelitian ini terbuat dari tembaga, yaitu tube dan stainless steel, sebagai shell dengan jarak dan jumlah tertentu. Spesimen tersebut dimasukkan dalam Shell kemudian diisolasi secara rapat untuk dilakukan pengujian. Air dingin dialirkan ke dalam shell dengan kecepatan tetap dan air panas dialirkan ke dalam tube dengan kecepatan tetap, ini dilakukan dalam jangka waktu 5 - 15 menit. Dengan mengukur perubahan suhu yang terjadi antara sisi masuk dan keluar shell dan tube, maka dapat dihitung besar dan koefisien perpindahan kalornya. Penelitian ini memberikan gambaran suatu hasil penelitian secara sistematis, dan faktual mengenai fenomena perubahan suhu di sisi shell dan tube. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Besar perpindahan panas yang paling besar terjadi apabila aliran fluida mengalir di kecepatan di 1 Gpm dan Besar perpindahan panas terkecil di 5 Gpm. Analisis ini dilakukan dengan mengukur suhu perubahan temperatur dengan menggunakan alat ukur termokopel dan water flow meter. Alat penukar kalor jenis shell and tube menggunakan baffle, yang berfungsi sebagai penyangga tube, sebagai pengarah aliran fluida di dalam shell dan untuk meredam getaran pada tube. Baffle umumnya terpasang dalam shell secara tegak lurus terhadap sumbu shell, sehingga menyebabkan aliran menjadi turbulen dan meningkatkan perpindahan kalor konveksi yang terjadi. Peningkatan perpindahan kalor konveksi, selalu diikuti oleh hal yang tidak menguntungkan, yaitu peningkatan penurunan tekanan (pressure drop) yang terjadi di sepanjang aliran. Penurunan tekanan tersebut menunjukkan faktor gesekan dan peningkatan daya pemompaan yang terjadi, sebagai akibat dari gesekan fluida pada baffle.

Kata kunci : Heat transfer (perpindahan kalor) , heat exchanger, shell and tube, Efektivitas

ABSTRACT

This study goal is to discover the total of heat transfer magnitude by employing an adjustment of incoming flow into the shell tube. This study utilizes made of copper, namely tube and stainless steel, whereas shell act as the precise distance and numbers. This sample was inserted into the shell with a constant velocity, and hot water was drained into the tube also with a constant speed in 5 to 15 minutes. By measuring the temperature alteration between inlets and outlets of shell and tube, hence the heat transfer and the coefficient can be calculated. This study illustrates a precise and factual result regarding temperature alteration phenomena in shell and tube. The outcome reveals that a biggest of heat transfer occurs if the fluid flows in 1 Gpm rate and the heat transfer in 5 Gpm. This analysis is conducted by measuring the temperature alteration using a thermocouple tool and water flow meter. Shell and tube heat exchangers used a baffle as cantilever to preventing vibration of the tubes caused by flow included eddies in the shell. Baffle usually installed in a vertical position with the axis of the shell to permit a turbulence flow and to increase the heat transfer convection. This circumstance has always been followed by a disadvantage which is the pressure drop analog the flow due to friction factor and an improvement of pumping power on the baffle.

Keywords : Heat transfer, Heat exchanger, Shell and tube, Effectiveness



KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum warohmatullah wabarakatuh

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan karunia-Nya. Shalawat serta salam penulis junjungkan kepada Nabi Muhammad SAW yang telah menuntun manusia pada kehidupan yang lebih baik sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul “**ANALISIS**

PERPINDAHAN PANAS ALAT PENUKAR KALOR SHELL AND TUBE PADA PIPA TEMBAGA DENGAN TUBE SUSUNAN BUJUR SANGKAR SKALA LABORATORIUM ”

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu hingga terselesaikannya Skripsi ini. Adapun pihak tersebut adalah:

1. Bapak Drs. M. Erwin Siregar , MBA . Selaku Ketua Yayasan Pendidikan Haji Agus Salim Universitas Medan Area
2. Bapak Prof. Dr. H.A. Ya'kub Matondang, MA. Selaku Rektor Universitas Medan Area
3. Bpk Prof. Dr. Dadan Ramdan, M.Eng, M.Sc. selaku Dekan fakultas Teknik Universitas Medan Area,
4. Ibu Sherly Maulana , ST, MT. Selaku Wakil Bidang Akademik Universitas Medan Area
5. Bapak Ir. H. Darianto , MSc. Selaku Wakil Dekan Bidang Kemahasiswaan Universitas Medan Area
6. Bapak Bobby Umroh, ST. MT. Selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Medan Area
7. Bapak Dr. Ir. Suditama, MT selaku Dosen Pembimbing Skripsi I
8. Bapak Ir. Husin Ibrahim, MT selaku Dosen Pembimbing Skripsi II
9. Orang Tua saya, yang selalu mendukung dan mendoakan setiap

kegiatan positif yang saya lakukan, Baik bantuan Moril maupun materi sehingga saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini tepat pada waktunya

10. Keluarga besar saya yang telah memberikan dukungan dan semangat,
11. Dosen – Dosen Pengajar di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Medan Area,
12. Staf Administrasi, Laboratorium dan Perpustakaan di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Medan Area,
13. Keluarga besar Teknik Mesin UMA Angkatan 2012, terkhusus Nopa , Reza, Iwan , Syaiful , Wahyudi, dan Teman – teman Seangkatan yang lainnya yang tidak bisa saya ucapkan satu persatu
14. Semua pihak yang telah memberikan dukungan yang tidak bisa saya sebutkan.

Penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan dalam penulisan Skripsi ini. Oleh karena itu penulis menerima segala kritik dan saran yang bersifat membangun untuk kemajuan di masa yang akan datang.

Akhirnya penulis mengharapakan Skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua, Amiin.

Wassalamu'alaikum warohmatullah wabarakatuh..

Medan, 04 November 2016

Penulis

(GUSDANTORO)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERNYATAAN	iii
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	ix
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.4.1. Tujuan Umum.....	3
1.4.2. Tujuan Khusus.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Perpindahan Kalor	6
2.2. Perpindahan Kalor Konduksi	7
2.3. Perpindahan Kalor Radiasi	11
2.3.1. Perpindahan kalor Konveksi.....	11
2.3.2. Klasifikasi Alar penukar Kalor.....	13
2.4. Heat Excahnger (Alat penukar kalor)	15
2.4.1. Shell and Tube	17
2.4.2. Komponen – komponen Exchanger.	18
2.5. Perhitungan Perpindahan panas dan laju aliran	22
2.5.1. Keseimbangan Energi.....	22
2.5.2. Bilangan Reynold.....	22
2.5.3. Bilangan Nusselt dan Prandtl.....	24
2.5.4. Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh.....	25

2.6. Efektivitas.....	28
-----------------------	----

BAB III. METODELOGI PENELITIAN

3.1. Tempat dan Waktu	30
3.1.1. Tempat	30
3.1.2. Waktu	30
3.2. Studi Literatur	30
3.3. Bahan dan Alat	30
3.3.1. Bahan.....	30
3.3.2. Alat penelitian.....	33
3.4. Penentuan awal data analisa	38
3.5. Prosedur Penelitian.....	38
3.6. Diagram Alir Penelitian.....	40
3.7. Jadwal Penelitian Tugas Akhir.....	41

BAB IV. PERHITUNGAN DAN ANALISA DATA

4.1. Data Pengukuran	42
4.1.1. Data pengukuran hasil percobaan.....	42
4.1.2. Perpindahan Panas LMTD.....	51
4.2. Mencari sekat Baffle, Lb.....	51
4.3. Mencari Bilangan Reynold fluida panas.....	51
4.3.1. Mencari Bilangan Nusselt dalam tabung fluida panas	53
4.3.2. Mencari Koefisien Perpindahan Panas dalam Tube.....	54
4.3.3. Mencari Koefisien Perpindahan Panas dalam Shell.....	55
4.4. Menghitung Diameter Ekvivalen susunan bujur sangkar dan Re air dingin....	57
4.4.1. Mencari Bilangan Prandtl air fluida dingin.....	58
4.4.2. Mencari Koefisien Perpindahan Panas diluar pipa.....	59
4.5. Menghitung Koefisien Perpindahan panas Menyeluruh.....	60
4.6. Menghitung Luas Permukaan Perpindahan Panas.....	63
4.7. Menghitung Efektivitas.....	64
4.7.1. Mencari Kapasitas minimum fluida dingin.....	63
4.7.2. Mencari Kapasitas minimum Fluida panas.....	64
4.7.3. Menghitung Perpindahan Panas Maximum.....	65

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan 68

5.2. Saran69

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



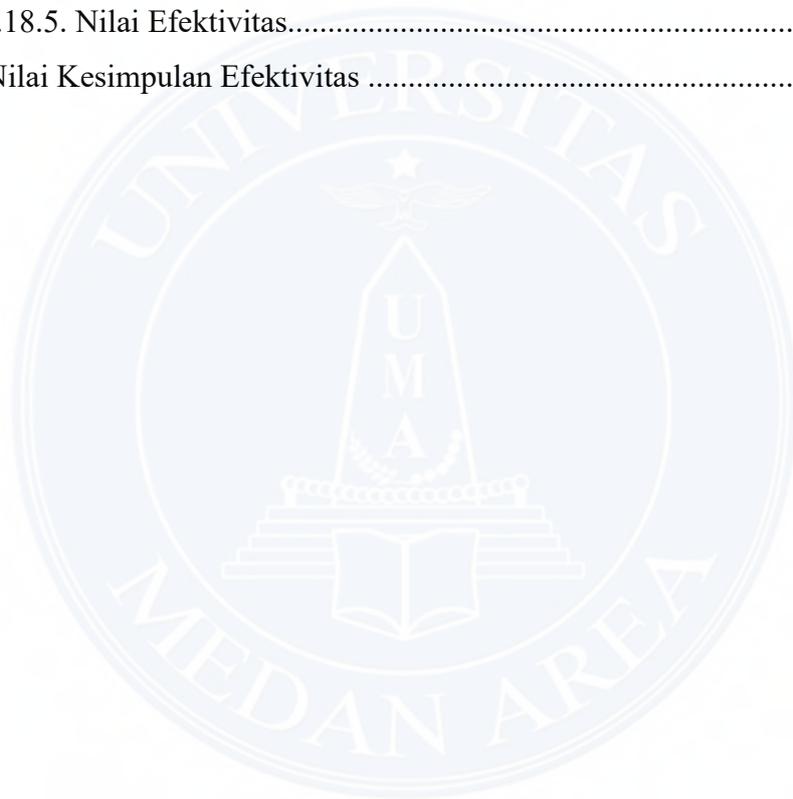
DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1. Distribusi Suhu Untuk konduksi keadaan steady	7
2.2. Sketsa melukiskan perjanjian tentang tanda untuk aliran konduksi	6
2.3. Penukar Kalor pipa Konsentris.....	15
2.4. Penukar kalor aliran menyilang.....	15
2.5. Gambar Heat exchanger Shell And tube.....	18
2.6. Bentuk- bentuk Shell.....	18
2.7. Tipe – tipe Susunan Tube	19
2.8. Daerah lapisan plat rata	20
2.9. Diagram aliran dalam Tabung.....	21
2.10. Aliran temperatur pada aliran searah.....	24
2.11. Aliran temperatur pada aliran berlawanan.....	24
3.1. Alat penukar kalor	32
3.2. Termokopel	32
3.3. Water Flow Meter	33
3.4. Water Heater.....	34
3.5. Pompa Air.....	34
3.6. Stop kran.....	35
4.1. Grafik Hubungan Laju aliran Fluida dingin Terhadap Q.....	45
4.2. Grafik Hubungan Laju aliran fluida panas Terhadap Q.....	46
4.3. Grafik bilangan Reynold dingin terhadap Q.....	60
4.4. Grafik bilangan Reynold panas terhadap Q.....	61
4.5. Grafik efektivitas terhadap laju aliran (Gpm).....	64

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1. Nilai Konduktivitas Termal bahan.....	9
2.2. Konstanta persamaan untuk pipa aliran menyilang.....	24
4.1. Tabel Percobaan.....	42
4.2. Nilai Rata – Rata air (fluida dingin dan panas).....	43
4.3. Nilai ρ air fluida dingin.....	43
4.4. Nilai ρ air fluida dingin.....	44
4.4.1. Nilai Konversi GPM Ke LPM.....	44
4.4.2. Nilai Perhitungan laju aliran fluida dingin.....	45
4.4.3. Nilai Perhitungan laju aliran fluida panas.....	45
4.5. Nilai Cp air fluida dingin.....	46
4.6. Nilai Cp air fluida panas.....	46
4.6.1. Nilai perhitungan Besar kalor yang diserap.....	47
4.6.2. Nilai Perhitungan Besar kalor yang dilepaskan.....	48
4.7. Nilai perhitungann laju aliran fluida.....	46
4.8. Pengaruh laju aliran fluida dingin terhadap Q.....	47
4.9. Pengaruh laju aliran fluida Panas terhadap Q.....	47
4.9.1. Nilai perpindahan panas LMTD.....	50
4.9.2. Nilai perhitungan m_1 (Mdot).....	51
4.10. Nilai Viskositas Kinematik fluida panas.....	52
4.10.1. Nilai perhitungan bilangan Reynold fluida panas.....	53
4.11. Nilai bilangan Prandlt Air untuk fluida panas.....	53
4.11.1. Nilai perhitungan bilangan Nusselt fluida panas.....	54
4.12. Nilai Konduktivitas Termal Fluida panas.....	54
4.12.1. Koefisien perpindahan panas didalam pipa tube.....	55
4.12.2. Kecepatan Massa air didalam Shell.....	56
4.13. Nilai Viskositas Kinematik fluida dingin.....	57
4.13.1. Bilangan Reynold Fluida dingin.....	58
4.14. Nilai Prandlt air fluida dingin.....	58
4.15. Nilai Bilangan Nusselt air (fluida dingin).....	59

4.16. Nilai Konduktivitas termal fluida dingin.....	59
4.16.1. Koefisien perpindahan panas diluar pipa.....	58
4.16.2. Koefisien perpindahan panas menyeluruh.....	60
4.17. Pengaruh Bilangan Reynold air dingin terhadap Q.....	61
4.18. Pengaruh Bilangan Reynold air panas terhadap Q.....	62
4.18.1. Nilai Luas permukaan perpindahan panas	63
4.18.2. Kapasitas panas minimum fluida dingin.....	64
4.18.3. Kapasitas panas minimum fluida panas.....	64
4.18.4. Kapasitas panas maximum.....	65
4.18.5. Nilai Efektivitas.....	66
4.19. Nilai Kesimpulan Efektivitas	66



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar belakang

Heat exchanger adalah suatu peralatan yang digunakan untuk melakukan proses pertukaran kalor antara dua fluida baik cair (panas atau dingin), maupun gas dimana fluida ini mempunyai temperatur yang berbeda. Heat exchanger banyak digunakan di industri tenaga atau industri lainnya , dikarenakan mempunyai beberapa keuntungan , antara lain konstruksi sederhana , aman dan kokoh , Biaya yang digunakan relatif murah dan juga Kemampuan untuk bekerja pada tekanan dan temperatur yang tinggi serta tidak membutuhkan tempat yang luas . Dikarenakan , banyak jenis alat penukar kalor , maka alat penukar kalor dapat di kelompokkan berdasarkan pertimbangan – pertimbangan yaitu Proses perpindahan kalornya, Jumlah fluida yang mengalir dan Kontruksi dan pengaturan aliran

Dalam kehidupan sehari – hari banyak di jumpai peralatan rumah tangga maupun Industri yang prinsip kerjanya menggunakan konsep perpindahan panas . dari tahun ke tahun maupun zaman ke zaman , alat ini terus mengalami perkembangan dari berbagai segi . Salah satu contoh pemanfaatan untuk alat penukar kalor adalah pemanfaatan Air panas yang di keluar dari perut bumi pada daerah tertentu . Pengembangan dan ilmu untuk pemanfaatan Air panas di kembangkan karena dapat membantu usaha penghematan energi dari segi panas yang di timbulkan seperti pemanasan air dan lain sebagainya. Berdasarkan konstruksi Secara umum heat exchanger dapat di kelompokkan menjadi 3 yaitu : Regenerator, Heat Exchanger Type tertutup dan type terbuka Sedangkan , untuk

type heat exchanger berdasarkan aliran fluidanya dapat di kelompokkan menjadi *parallel flow* (aliran searah), *counter flow* (aliran berlawanan), dan *cross flow* (aliran silang).

Dalam aplikasi heat exchanger di lapangan banyak permasalahan yang masih ditimbulkan , misalnya panas yang di transfer oleh heat exchanger belum maksimal hal ini berkaitan dengan jenis tube atau pipa penghantar panas yang digunakan misalnya terbuat dari : Tembaga , Alumunium coil , Besi , Dll, Lalu untuk susunan tube juga mempengaruhi kemampuan untuk melepas atau menerima panas suatu alat penukar kalor yang di pengaruhi oleh besarnya luas permukaan (heating surface), dan besarnya luas permukaan itu tergantung dari panjang , ukuran , dan jumlah tube yang di pergunakan pada heat exchanger tersebut . Susunan tubes itu mempengaruhi besarnya penurunan tekanan aliran fluida dalam shell .

1.2. Rumusan Masalah

Adapun yang menjadi rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Analisa Heat Transfer pipa penghantar yang digunakan sebagai mekanisme perpindahan panas
2. Mencari kemampuan melepas dan menerima panas Pada alat penukar kalor Shell and tube
3. Efektivitas pada Alat penukar kalor
4. Koefisien Perpindahan panas menyeluruh pada Alat penukar kalor shell and tube

1.3. Batasan Masalah

Untuk mengetahui analisis data dari perpindahan panas heat exchanger shell and tube., maka batasan masalah dalam analisis ini adalah sbb :

1. menganalisa dengan menggunakan Variabel – variabel yang ada terhadap suatu masalah . Variabel disini yang maksudnya perubahan suhu dan perubahan tekanan serta besarnya luas permukaan alat tersebut.
2. Mencari Perpindahan kalor (suatu proses berpindahnya panas dari suhu yang Lebih tinggi ke suhu yang lebih rendah melalui perantara , konduksi , konveksi dan radiasi).
3. Pipa (tube) yang dipakai pada heat exchanger shell and tube sebagai Mekanisme perpindahan panas nya yaitu Pipa tembaga dengan bahan ASTM B88
4. Susunan tube yang dipakai pada alat penukar panas ini adalah susunan Bujur sangkar yang mempunyai film koefisien dan tekanan yang rendah.

1.4. Tujuan Penelitian

1.4.1 Tujuan Umum

Analisis perpindahan panas alat penukar kalor *shell and tube* pada pipa tembaga dengan tube susunan segaris (bujur sangkar / segiempat)

1.4.2 . Tujuan Khusus

Adapun Tujuan Khusus dari analisis perpindahan panas ini adalah :

1. Mengetahui temperatur atau suhu maximal yang dapat dicapai dari spesifikasi alat penukar kalor yang digunakan untuk skala laboratorium.

2. Mengetahui penurunan tekanan kerja pompa dan fluida yang digunakan pada heat exchanger shell and tube.
3. Dan Mengetahui bagaimana proses perpindahan kalor terjadi secara tidak langsung didalam suatu Shell atau silinder.
4. Mengetahui besar panas maximum yang terjadi pada alat penukar kalor shell and tube
5. Mengetahui seberapa besar Efektivitas alat penukar kalor jenis shell and tube

1.5. Manfaat penelitian

1. Dapat menambah pengetahuan mengenai pengaruh variasi dari material atau bahan dari pipa penghantar panas serta variasi terhadap susunan dari tube heat exchanger shell and tube yang dipakai
2. Dapat memberikan informasi dan masukan kepada pembaca maupun penulis sebagai pengetahuan dan pengembangan serta penyempurnaan heat exchanger yaitu ‘analisis perpindahan panas alat penukar kalor *shell and tube* pada pipa tembaga dengan tube susunan segiempat
3. Sebagai laporan pertanggung jawaban mahasiswa atas pengerjaan tugas akhir kepada pihak yang berkepentingan
4. Dapat dijadikan pedoman Untuk khalayak Umum Untuk bagaimana Proses perpindahan panas secara tidak langsung

5. Sebagai masukan yang bermanfaat dan tambahan informasi bagi perusahaan apabila dipublikasikan dalam meningkatkan proses produksi didunia industri
6. Sebagai tambahan literatur kepustakaan di bangku perkuliahan khususnya mengenai proses perpindahan panas
7. Sebagai referensi yang dapat menjadi pertimbangan bagi peneliti lain yang ingin meneliti objek yang sejenis dan juga
8. Sebagai pengembangan penelitian di masa yang akan datang



BAB II

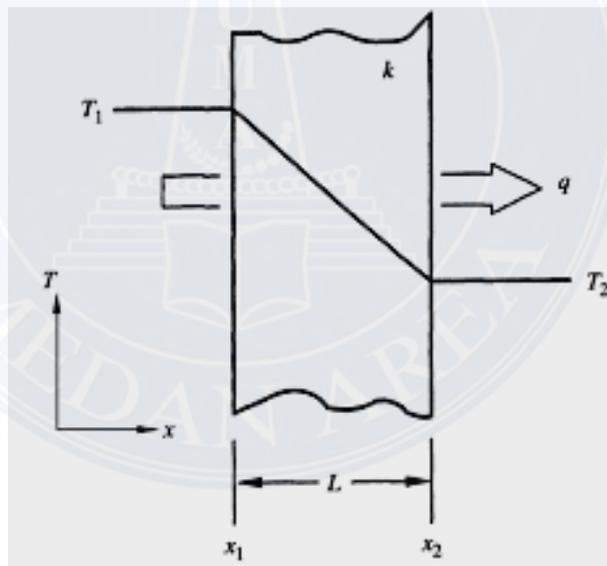
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor (*heat transfer*) ialah ilmu untuk meramalkan perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan suhu di antara benda atau material. Pada termodinamika telah kita ketahui bahwa energi yang pindah itu dinamakan kalor (*heat*). Ilmu perpindahan kalor tidak hanya mencoba menjelaskan bagaimana energi kalor itu berpindah dari suatu benda ke benda lain, tetapi juga dapat meramalkan laju perpindahan yang terjadi pada kondisi-kondisi tertentu. Kenyataan di sini yang menjadi sasaran analisis ialah masalah laju perpindahan, inilah yang membedakan ilmu perpindahan kalor dari ilmu termodinamika. Termodinamika membahas sistem dalam keseimbangan, ilmu ini dapat digunakan untuk meramal energi yang diperlukan untuk mengubah sistem dari suatu keadaan seimbang ke keadaan seimbang lain, tetapi tidak dapat meramalkan kecepatan perpindahan itu. Hal ini disebabkan karena pada waktu proses perpindahan itu berlangsung, sistem tidak berada dalam keadaan seimbang. Ilmu perpindahan kalor melengkapi hukum pertama dan kedua termodinamika, yaitu dengan memberikan beberapa kaidah percobaan yang dapat dimanfaatkan untuk menentukan perpindahan energi. Sebagaimana juga dalam ilmu termodinamika, kaidah – kaidah percobaan yang digunakan dalam masalah perpindahan kalor cukup sederhana, dan dapat dengan mudah dikembangkan sehingga mencakup berbagai ragam situasi praktis (Holman, 1997).

2.2. Perpindahan Kalor Konduksi

Perpindahan kalor konduksi adalah perpindahan energi sebagai kalor melalui sebuah proses medium stasioner, seperti tembaga, air, atau udara. Di dalam benda-benda padat maka perpindahan tenaga timbul karena atom-atom pada temperatur yang lebih tinggi bergetar dengan lebih bergairah, sehingga atom-atom tersebut dapat memindahkan tenaga kepada atom-atom yang lebih lesu yang berada di dekatnya dengan kerja mikroskopik, yakni kalor. Di dalam logam-logam, elektron-elektron bebas juga membuat kontribusi kepada proses hantaran kalor. Di dalam sebuah cairan atau gas, molekul-molekul juga mudah bergerak, dan tenaga juga dihantar oleh tumbukan-tumbukan molekul. (Reynold dan Perkins, 1983)

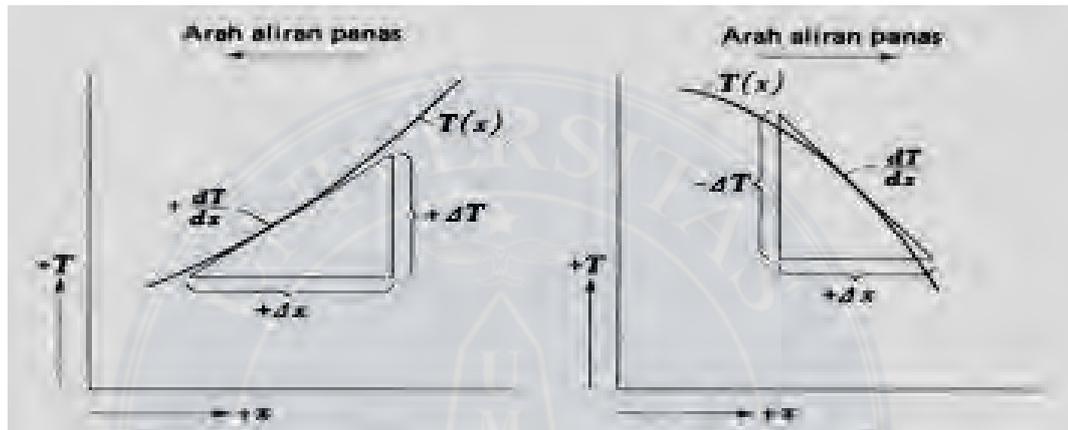


Gambar 2.1. Distribusi suhu untuk konduksi keadaan stedy melalui dinding datar.

Perpindahan kalor konduksi satu dimensi melalui padatan diatur oleh hukum Fourier, yang dalam bentuk satu dimensi dapat dinyatakan sebagai,

$$Q_x = - K A \left(\frac{dT}{dx} \right) \dots\dots\dots (2.1)$$

di mana q adalah laju perpindahan kalor dan dt/dx merupakan gradien suhu ke arah perpindahan kalor. Konstanta positif k disebut konduktivitas atau *thermal conductivity* benda itu, sedangkan tanda minus diselipkan agar memenuhi hukum kedua termodinamika, yaitu bahwa kalor mengalir ke tempat yang lebih rendah dalam skala suhu. (Holman, 1997)



Gambar 2.2. Sketsa yang melukiskan perjanjian tentang tanda untuk aliran

panas konduksi.

Persamaan (2.1) merupakan persamaan dasar tentang konduktivitas termal. Berdasarkan rumusan itu maka dapatlah dilaksanakan pengukuran dalam percobaan untuk menentukan konduktivitas termal berbagai bahan. Untuk gas-gas pada suhu agak rendah, pengolahan analitis teori kinetik gas dapat dipergunakan untuk meramalkan secara teliti nilai-nilai yang diamati dalam percobaan. Mekanisme konduksi termal pada gas cukup sederhana.

Energi kinetik molekul ditunjukkan oleh suhunya, jadi pada bagian bersuhu tinggi molekul-molekul mempunyai kecepatan yang lebih tinggi daripada yang berada pada bagian bersuhu rendah. Molekul-molekul itu selalu berada dalam gerakan rambang atau acak, saling bertumbukkan satu sama lain, di mana terjadi pertukaran energi dan momentum.

Jika suatu molekul bergerak dari daerah bersuhu tinggi ke daerah bersuhu rendah, maka molekul itu mengangkut energi kinetik ke bagian sistem yang suhunya lebih rendah, dan di sini menyerahkan energinya pada waktu bertumbukkan dengan molekul yang energinya lebih rendah. Nilai konduktivitas termal itu menunjukkan berapa cepat kalor mengalir dalam bahan tertentu. Energi termal dihantarkan dalam zat padat menurut salah satu dari dua modus, melalui getaran kisi (*lattice vibration*) atau dengan angkutan melalui elektron bebas. Dalam konduktor listrik yang baik, dimana terdapat elektron bebas yang bergerak di dalam struktur kisi bahan-bahan, maka elektron, di samping dapat mengangkut muatan listrik, dapat pula membawa energi termal dari daerah bersuhu tinggi ke daerah bersuhu rendah, sebagaimana halnya dalam gas. Energi dapat pula berpindah sebagai energi getaran dalam struktur kisi bahan. Namun, pada umumnya perpindahan energi melalui getaran ini tidaklah sebanyak dengan cara angkutan elektron. Karena itu penghantar listrik yang baik selalu merupakan penghantar kalor yang baik pula, seperti halnya tembaga, aluminium dan perak. Sebaliknya isolator listrik yang baik merupakan isolator kalor. (Holman, 1997)

Nilai konduktivitas thermal suatu bahan menunjukkan laju perpindahan panas yang mengalir dalam suatu bahan. Konduktivitas thermal kebanyakan bahan merupakan fungsi suhu, dan bertambah sedikit kalau suhu naik, akan tetapi variasinya kecil dan sering kali diabaikan. Jika nilai konduktivitas thermal suatu bahan makin besar, maka makin besar juga panas yang mengalir melalui benda tersebut.

Karena itu, bahan yang harga k -nya besar adalah penghantar panas yang baik, sedangkan bila k -nya kecil bahan itu kurang menghantar atau merupakan isolator.

Tabel 2.1. Nilai Konduktivitas Bahan (Holman, 1997).

Bahan Logam	K (W / m .C)	Bahan non Logam	K (W / m .C)
Perak	410	Kuarsa	41,6
Tembaga	385	Magnesit	4,15
Alumunium	202	Marmar	2,08 – 2,94
Nikel	93	Batu Pasir	1,83
Besi	73	Kaca, Jendela	0,78
Baja karbon	43	Kayu	0,08
Timbal	35	Serbuk Gergaji	0,059
Baja Krom Nikel	16,3	Wol kaca	0,038
Emas	314	Karet	0,2
		Polystyrene	0,157
		Polythylene	0,33
		Polypropylene	0,16
		Polyvynil Clorida	0,09
		Kertas	0,166
Zat Cair		Gas	
Air raksa	8 , 21	Hidrogen	0,175
Air	0, 556	Helium	0,141
Amonia	0, 540	Udara	0,024
Minyak pelumas SAE 50	0, 147	Uap air (jenuh)	0,0206
Freon 12	0, 73	Karbon dioksida	0,166

2.3. Perpindahan Kalor Radiasi

Perpindahan kalor radiasi adalah perpindahan energi oleh penjaran (rambatan) foton yang tak terorganisir. Setiap benda yang terus memancarkan foton-foton secara serampangan di dalam arah dan waktu, dan tenaga netto yang dipindahkan oleh foton-foton ini diperhitungkan sebagai kalor. Bila foton-foton ini berada di dalam jangkauan panjang gelombang 0,38 sampai 0,76 μm , maka foton-foton tersebut mempengaruhi mata kita sebagai sinar cahaya yang tampak (dapat dilihat). Bertentangan dengan itu, maka setiap tenaga foton yang terorganisir, seperti transmisi radio, dapat diidentifikasi secara mikroskopik dan tak dipandang sebagai kalor. (Reynold dan Perkins, 1983)

Pembahasan termodinamika menunjukkan bahwa radiator (penyinar) ideal, atau benda hitam (*blackbody*), memancarkan energi dengan laju yang sebanding dengan pangkat empat suhu absolut benda itu dan berbanding langsung dengan luas permukaan.

$$q_{\text{pancaran}} = \sigma \cdot A \cdot T^4 \dots\dots\dots (2.2)$$

Di mana σ adalah konstanta Stefan-Boltzmann dengan nilai $5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^2$ Persamaan (2) disebut hukum Stefan-Boltzmann tentang radiasi termal, dan berlaku hanya untuk radiasi benda hitam. (Reynold dan perkins , 1983)

2.3.1. Perpindahan Kalor Konveksi

Bila sebuah fluida lewat di atas sebuah permukaan padat panas, maka energi dipindahkan kepada fluida dari dinding oleh hantaran panas.

Energi ini kemudian diangkut atau dikonveksikan (*convected*), ke hilir oleh fluida, dan didifusikan melalui fluida oleh hantaran di dalam fluida tersebut.

Jenis proses perpindahan energi ini dinamakan perpindahan panas konveksi (*convection heat transfer*). (Stoecker dan Jones, 1982)

Jika proses aliran fluida tersebut diinduksikan oleh sebuah pompa atau sistem pengedar (*circulating system*) yang lain, maka digunakan istilah konveksi yang dipaksakan (*forced convection*). Bertentangan dengan itu, jika aliran fluida timbul karena gaya apung fluida yang disebabkan oleh pemanasan, maka proses tersebut dinamakan konveksi bebas (*free*) atau konveksi alami (*natural*). Persamaan dasar untuk menghitung laju perpindahan panas konveksi yaitu:

$$Q = h A \Delta T \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana : q = Laju perpindahan panas (W)

h = Koefisien perpindahan panas konveksi ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

A = Luas permukaan (m^2)

ΔT = Perbedaan temperatur ($^\circ C$)

Banyak parameter yang mempengaruhi perpindahan kalor konveksi di dalam sebuah geometri khusus. Parameter-parameter ini termasuk luas permukaan (A), konduktivitas termal fluida (k), biasanya kecepatan fluida (V), kerapatan (ρ) viskositas (μ), panas jenis (C_p), dan kadang-kadang faktor lain yang berhubungan dengan cara-cara pemanasan (temperatur dinding seragam atau temperatur dinding berubah-ubah). Fluks kalor dari permukaan padat akan bergantung juga pada temperatur permukaan (T_s) dan temperatur fluida (T_f), tetapi biasanya dianggap bahwa ($\Delta T = T_s - T_f$) yang penting. Akan tetapi, jika sifat-sifat fluida berubah dengan nyata pada daerah pengkonveksi (*convection region*), maka temperatur-temperatur absolute T_s dan T_f dapat juga merupakan faktor-faktor penting didalam korelasi.

Jelaslah bahwa dengan sedemikian banyak variable-variabel penting, maka korelasi spesifik akan sulit dipakai, dan sebagai konsekuensinya maka korelasi-korelasi biasanya disajikan dalam pengelompokan-pengelompokan tak berdimensi (*dimensionless groupings*) yang mengizinkan representasi-representasi yang jauh lebih sederhana, Juga faktor-faktor dengan pengaruh yang kurang penting, seperti variasi sifat fluida dan distribusi temperatur dinding, seringkali diabaikan untuk menyederhanakan korelasi-korelasi tersebut. (Stoecker dan Jones, 1982) .

2.3.2. Klasifikasi alat penukar kalor

Alat penukar kalor dapat di klasifikasikan berdasarkan bermacam- macam pertimbangan Yaitu :

1. Klasifikasi berdasarkan proses perpindahan panas
 - 1.1. Tipe kontak langsung
 - a. Tipe yang langsung dipindahkan
 - b. Tipe satu fase
 - c. Tipe banyak fase
 - d. Tipe yang di timbun (storage type)
 - e. Tipe fluidized
 - 1.2. Tipe yang kontak langsung
 - a. Immiscible fluids
 - b. Gas fluids
 - c. Liquid vapor
2. Klasifikasi berdasarkan jumlah fluida yang mengalir
 - a. dua jenis fluida

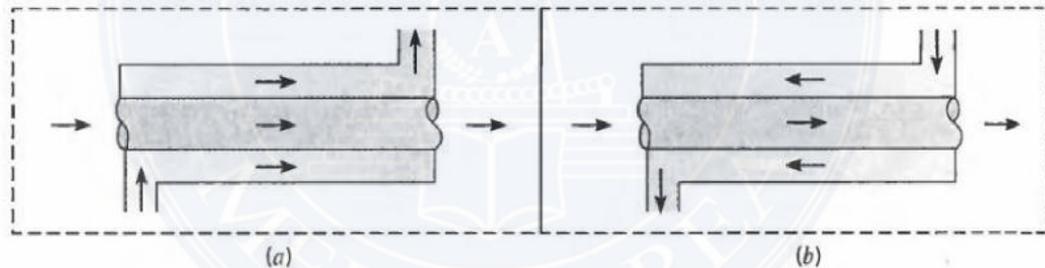
- b. tiga jenis fluida
 - c. N- jenis fluida
3. Klasifikasi berdasarkan Kompaknya permukaan
- a. Tipe penukar kalor yang kompak , density luas permukaanya $> 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$
 - b. Tipe penukar kalor yang tidak kompak density luas permukaanya < 700
4. Klasifikasi berdasarkan mekanisme perpindahan panas
- a. Dengan cara konveksi , satu fase pada kedua sisi alirannya.
 - b. Dengan konveksi pada satu sisi aliran dan pada sisi yang lainya terdapat cara konveksi dua aliran
 - c. Dengan cara konveksi apada kedua sisi alirannya serta masing-masing terdapat dua pass aliran
 - d. Kombinasi cara konveksi dan radiasi
5. Klasifikasi berdasarkan kontruksi
- 5.1. Kontruksi tubular (shell and tube)
- a. Pipa ganda (duoble tube)
 - a. kontruksi shell and tube
 - b. sekat plat (plat baffle)
 - c. sekat batang (rod baffle)
 - d. kontruksi tube spiral
- 5.2. Kontruksi tipe plat
- a. Tipe plat
 - b. Tipe lamela
 - c. Tipe spiral

2.4. Heat Exchanger (Alat Penukar Kalor)

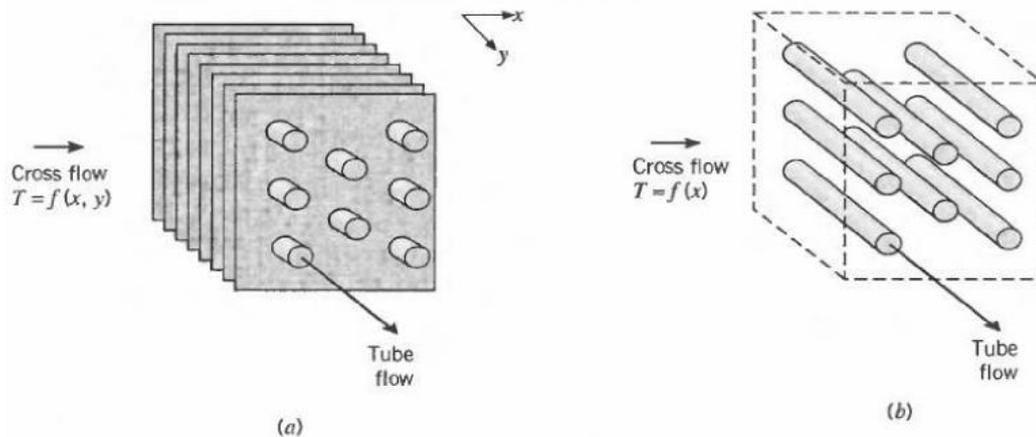
Heat Exchanger merupakan peralatan yang digunakan untuk perpindahan panas antara dua atau lebih fluida. Banyak jenis *Heat Exchanger* yang dibuat dan digunakan dalam pusat pembangkit tenaga, unit pendingin, unit produksi udara, proses di industri, sistem turbin gas, dan lain lain. Dalam *heatexchanger* tidak terjadi pencampuran seperti dalam halnya suatu *mixing chamber*. Dalam radiator mobil misalnya, panas berpindah dari air yang panas yang mengalir dalam pipa radiator ke udara yang mengalir dengan bantuan fan. Suatu *heat exchanger* terdiri dari elemen penukar kalor yang disebut sebagai inti atau matrix yang berisikan di dinding penukar panas, dan elemen distribusi fluida seperti tangki, *nozzle* masukan, *nozzle* keluaran, pipa-pipa, dan lain-lain. Biasanya, tidak ada pergerakan pada bagian-bagian dalam *heat exchanger*. Namun, ada perkecualian untuk *regenerator rotary* dimana matriksnya digerakan berputar dengan kecepatan yang dirancang. Dinding permukaan *heat exchanger* adalah bagian yang bersinggungan langsung dengan fluida yang mentransfer panasnya secara konduksi. (Kuppan, 2000) Hampir disemua *heat exchanger*, perpindahan panas didominasi oleh konveksi dan konduksi dari fluida panas ke fluida dingin, dimana keduanya dipisahkan oleh dinding. Perpindahan panas secara konveksi sangat dipengaruhi oleh bentuk geometri *heat exchanger* dan tiga bilangan tak berdimensi, yaitu bilangan Reynold, bilangan Nusselt dan bilangan Prandtl fluida.

Besar konveksi yang terjadi dalam suatu *double-pipe heat exchanger* akan berbeda dengan *cross-flow heat exchanger* atau *compact heat exchanger* atau *plate heat exchanger* untuk berbeda temperatur yang sama. Sedang besar ketiga bilangan tak berdimensi tersebut tergantung pada kecepatan aliran serta *property*

fluida yang meliputi massa jenis, viskositas absolut, panas jenis dan konduktivitas panas. (Cengel, 2003). Alat penukar kalor (*Heat Exchanger*) secara tipikal diklasifikasikan berdasarkan susunan aliran (*flow arrangement*) dan tipe konstruksi. Penukar kalor yang paling sederhana adalah satu penukar kalor yang mana fluida panas dan dingin bergerak atau mengalir pada arah yang sama atau berlawanan dalam sebuah pipa berbentuk bundar (atau pipa rangkap dua). Pada susunan aliran sejajar (*parallel-flow arrangement*) yang ditunjukkan gambar 5 (a) fluida panas dan dingin masuk pada ujung yang sama, mengalir dalam arah yang sama dan keluar pada ujung yang sama. Pada susunan aliran berlawanan (*counter flow arrangement*) yang ditunjukkan gambar 5 (b) kedua fluida tersebut pada ujung yang berlawanan, mengalir dalam arah yang berlawanan, dan keluar pada ujung yang berlawanan. (Incropera, 2007)



Gambar 2.3. Penukar kalor pipa konsentris (a) *parallel flow* (b) *counterflow*



Gambar 2.4.: Penukar kalor aliran melintang (a) bersirip dengan kedua fluidanya tidak campur (b) tidak bersirip dengan satu fluida campur dan satu fluida lagi tidak campur.

Sebagai alternatif, fluida panas dan dingin bergerak dalam arah melintang (tegak lurus satu dengan yang lain), seperti yang ditunjukkan oleh alat penukar kalor berbentuk pipa bersirip dan tidak bersirip pada gambar 6. Kedua konfigurasi ini secara tipikal dibedakan oleh sebuah perlakuan terhadap fluida di luar pipa sebagai fluida campur atau fluida tak campur.

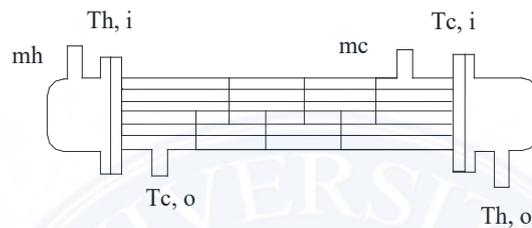
Gambar 6 (a), fluida disebut fluida tak campur karena sirip-sirip menghalangi gerakan fluida dalam satu arah y gerak tersebut melintang ke arah aliran utama x . (Incropera, 2007)

2.4.1. Shell and Tube

Jenis ini merupakan jenis yang paling banyak digunakan dalam industri perminyakan. Alat ini terdiri dari sebuah *shell* (tabung/slinder besar) dimana di dalamnya terdapat suatu *bundle* (berkas) pipa dengan diameter yang *relative* kecil. Satu jenis fluida mengalir di dalam pipa-pipa sedangkan fluida lainnya mengalir di bagian luar pipa tetapi masih di dalam *shell*.

Alat penukar panas cangkang dan buluh terdiri atas suatu bundel pipa yang dihubungkan secara parallel dan ditempatkan dalam sebuah pipa mantel (cangkang). Fluida yang satu mengalir di dalam bundel pipa, sedangkan fluida yang lain mengalir di luar pipa pada arah yang sama, berlawanan, atau bersilangan. Kedua ujung pipa tersebut dilas pada penunjang pipa yang menempel pada mantel. Untuk meningkatkan efisiensi pertukaran panas, biasanya pada alat penukar panas cangkang dan buluh dipasang sekat *buffel*

Ini bertujuan untuk membuat turbulensi aliran fluida dan menambah waktu tinggal (*residence time*), namun pemasangan sekat akan memperbesar *pressure drop* operasi dan menambah beban kerja pompa, sehingga laju alir fluida yang dipertukarkan panasnya harus diatur.



Gambar : Heat Exchanger Jenis Shell and Tube

Gambar 2.5 : Heat Exchanger Shell and tube

2.4.2. Komponen-komponen Heat Exchanger

Dalam penguraian komponen-komponen *heat exchanger* jenis *shell and tube* akan dibahas beberapa komponen yang sangat berpengaruh pada konstruksi *heat exchanger*. Untuk lebih jelasnya disini akan dibahas beberapa komponen dari *heat exchanger* jenis *shell and tube*.

a. Shell

Konstruksi *shell* sangat ditentukan oleh keadaan *tubes* yang akan ditempatkan didalamnya. *Shell* ini dapat dibuat dari pipa yang berukuran besar atau pelat logam yang dirol. *Shell* merupakan badan dari *heat exchanger*, dimana didapat *tube bundle*. Untuk temperatur yang sangat tinggi kadang-kadang *shell* dibagi dua disambungkan dengan sambungan ekspansi. Bentuk-bentuk *shell* yang lazim digunakan ditunjukkan pada gambar berikut :

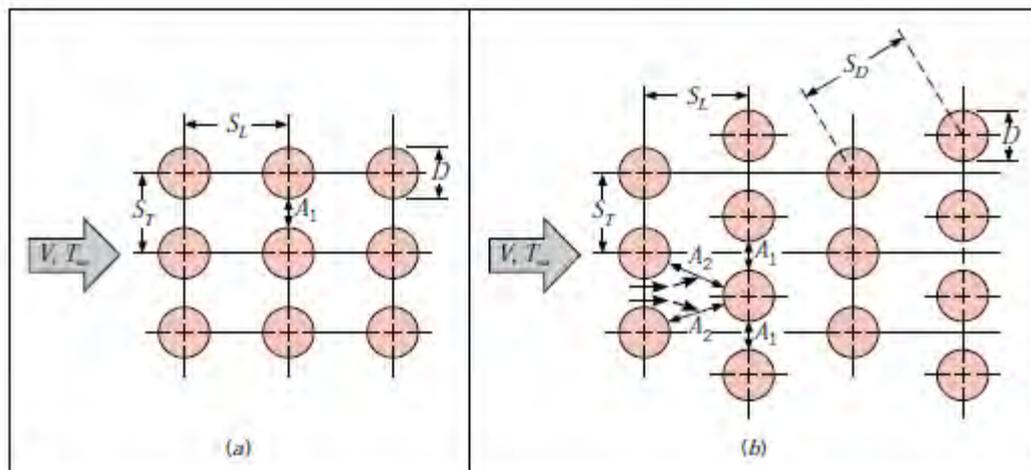
	FRONT END STATIONARY HEAD TYPES		SHELL TYPES		REAR END HEAD TYPES
A	 CHANNEL AND REMOVABLE COVER	E	 ONE PASS SHELL	L	 FIXED TUBESHEET LIKE "A" STATIONARY HEAD
B	 BONNET (INTEGRAL COVER)	F	 TWO PASS SHELL WITH LONGITUDINAL BAFFLE	M	 FIXED TUBESHEET LIKE "B" STATIONARY HEAD
C	 REMOVABLE TUBE BUNDLE ONLY CHANNEL INTEGRAL WITH TUBESHEET AND REMOVABLE COVER	G	 SPLIT FLOW	N	 FIXED TUBESHEET LIKE "N" STATIONARY HEAD
N	 CHANNEL INTEGRAL WITH TUBESHEET AND REMOVABLE COVER	H	 DOUBLE SPLIT FLOW	P	 OUTSIDE PACKED FLOATING HEAD
D	 SPECIAL HIGH PRESSURE CLOSURE	J	 DIVIDED FLOW	S	 FLOATING HEAD WITH BACKING DEVICE
		K	 KETTLE TYPE REBOILER	T	 PULL THROUGH FLOATING HEAD
		X	 CROSS FLOW	U	 U-TUBE BUNDLE
				W	 EXTERNALLY SEALED FLOATING TUBESHEET

Gambar 2.6. Bentuk-bentuk *shell* dan penutupnya

(TEMA, 2007)

b. *Tube* (Pipa)

Tube atau pipa merupakan bidang pemisah antara kedua jenis fluida yang mengalir didalamnya dan sekaligus sebagai bidang perpindahan panas. Ketebalan dan bahan pipa harus dipilih pada tekanan operasi fluida kerjanya. Selain itu bahan pipa tidak mudah terkorosi oleh fluida kerja. Adapun beberapa tipe susunan *tube* dapat dilihat disamping ini :



Gambar 2.7. Tipe susunan tube (a) *aligned* (b) *staggered*

(Incopera, 2007)

Susunan dari tube ini dibuat berdasarkan pertimbangan untuk mendapatkan jumlah pipa yang banyak atau untuk kemudahan perawatan (pembersihan permukaan pipa).

c. Sekat (*Baffle*)

Adapun fungsi dari pemasangan sekat (*baffle*) pada *heat exchanger* ini antara lain adalah untuk :

1. Sebagai penahan dari *tube bundle*.
2. Untuk mengurangi atau menambah terjadinya getaran.
3. Sebagai alat untuk mengarahkan aliran fluida yang berada di dalam tube

Untuk mencari jarak sekat baffle di tentukan Oleh batas range 0,4- 0,6 sampai diameter shell. Dengan rumus sbb : $L_b = 0,4 - D_s$

2.5. Perhitungan Perpindahan Panas dan Laju Aliran

2.5.1. Kestimbangan Energi

Aliran di dalam celah adalah tertutup sempurna, maka kestimbangan energi dapat digunakan untuk menentukan temperatur fluida yang bervariasi dan nilai total transfer panas konveksi Q_{conv} tergantung dari laju aliran massa. Jika perubahan energi kinetik dan energi potensial diabaikan, maka pengaruh yang signifikan adalah perubahan energi thermal dan fluida kerja. Sehingga kestimbangan energi tergantung pada 3 variable, yang dapat dirumuskan sebagai berikut (Incopera, 2007)

$$Q = m_c \cdot C_{p,c} \cdot \Delta T_c = m_h \cdot C_{p,h} \cdot \Delta T_h \dots\dots\dots (2.4)$$

Q = Laju perpindahan panas

m_c = aliran massa yang melalui tube (Kg/s)

m_h = aliran massa yang melalui shell (Kg/s)

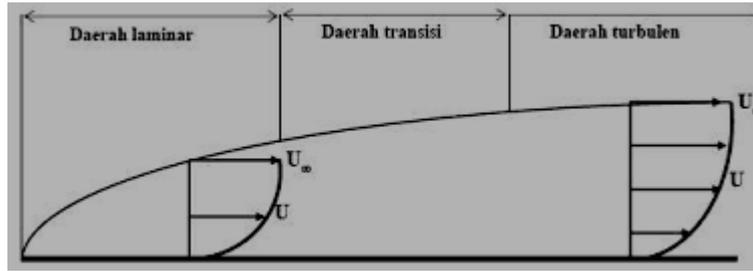
$C_{p,c}$ = koefisien perpindahan panas (Kj/kg.s)

ΔT_c = Beda temperatur fluida dingin melalui tube (°C)

ΔT_h = Beda temperatur fluida panas melalui shell (°C)

2.5.2. Bilangan Reynold

Setiap aliran fluida mempunyai nilai bilangan Reynolds yang merupakan pengelompokan aliran yang mengalir, pada plat datar dapat dilihat pada gambar disamping berikut



Gambar 2.8. Daerah aliran lapisan batas plat rata

Pengelompokan aliran yang mengalir tersebut dapat diketahui dengan bilangan Reynold, sebagai berikut :

$$Re = \frac{U \infty x}{\nu} = \frac{\rho U \infty x}{\mu} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana:

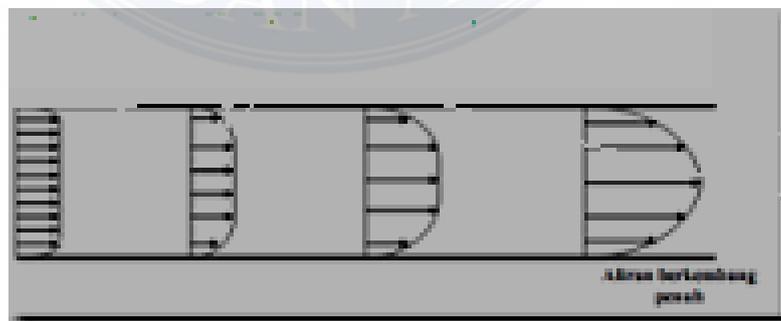
Re : Bilangan Reynold

U : Kecepatan aliran bebas (m/s)

X : Jarak dari tepi depan (m)

$\nu = \mu / \rho$: Viskositas kinematik (m^2/s)

Transisi dari aliran laminar menjadi turbulen terjadi bila $Re > 5 \cdot 10^5$, untuk aliran sepanjang plat rata, lapisan batas selalu turbulen untuk $Re > 4 \cdot 10^6$. Untuk aliran dalam tabung dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 2.9. Diagram aliran dalam tabung

Pada aliran dalam tabung, aliran turbulen biasanya pada:

$$Re = \frac{U_m d}{\nu} = \frac{\rho U_m d}{\mu} > 2300 \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana:

Re : Bilangan Reynold

U_m : Kecepatan aliran (m/s)

d : diameter (m)

$\nu = \mu / \rho$: Viskositas kinematic (m²/s)

2.5.3. Bilangan Nusselt dan Bilangan Prandtl

Parameter yang menghubungkan ketebalan *relative* antara lapisan batas hidronamik dan lapisan batas termal adalah maksud dari bilangan Prandtl, bilangan ini dapat ditentukan dengan menggunakan tabel, maupun dengan menggunakan persamaan, seperti berikut ini

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{M_p}{K_p c_p} = \frac{C_p \dot{u}}{k} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana, C_p : Panas spesifik (Kj/kg.K)

ν : Viskositas fluida (kg/m.s)

k : Konduktivitas termal (W/m.K)

Viskositas kinematik fluida memberikan informasi tentang laju difusi momentum dalam fluida karena gerakan molekul. Difusivitas termal memberi petunjuk tentang hal yang serupa mengenai difusi panas dalam fluida. Jadi perbandingan antara kedua kuantitas tersebut menunjukkan besaran relatif antara difusi momentum dan difusi panas di dalam fluida. Kedua difusi inilah yang menentukan berapa tebal lapisan batas pada suatu medan aliran tertentu.

Difusivitas yang besar menunjukkan bahwa pengaruh viskos atau pengaruh suhu terasa pada jarak yang lebih jauh dalam medan aliran. Jadi, angka Prandtl merupakan penghubung antara medan kecepatan dan medan suhu. Bilangan Nusselt dirumuskan sebagai berikut :

$$N_{ux} = c Re^m Pr^{1/3} = \frac{hx}{k} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana: : Pr = Angka Prandtl

N_{ux} = Bilangan Nusselt

h = Koefisien Perpindahan Panas Konveksi (W/m²oC)

k = Konduktivitas Termal Fluida (W/m oC)

Dimana konstanta C dan m terdapat pada Tabel 2 dibawah ini:

Tabel 2.2 Konstanta persamaan (11) untuk pipa aliran menyilang

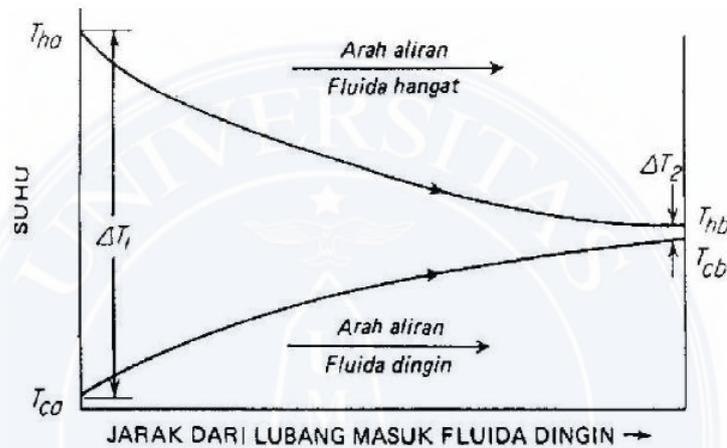
ReD	C	M
0,4-4	0,989	0,33
4-40	0,911	0,385
40-400	0,683	0,466
4000-40.000	0,193	0,168
40,000-400,000	0,027	0,805

2.5.4. Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh

Untuk koefisiensi perpindahan panas secara menyeluruh dapat dikaji dengan cara menentukan perpindahan kalor yang terjadi pada suatu dinding logam antara fluida panas pada satu sisi dan fluida dingin pada sisi lain dengan aliran konveksi

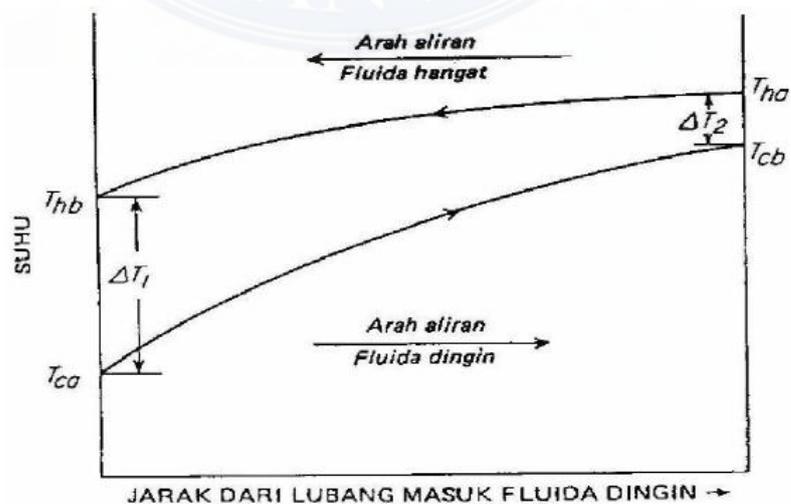
paksa. Pertukaran panas yang terjadi adalah pertukaran secara tidak langsung, ini berdasarkan alirannya dapat dibedakan menjadi: (Hartono, 2008)

1. Pertukaran panas dengan aliran searah (*co-current/parallel flow*), pertukaran jenis ini, kedua fluida (panas dan dingin) masuk pada sisi yang sama, mengalir dengan arah yang sama dan keluar pada sisi yang sama pula Gambar 11. Aliran temperatur dengan aliran searah



Gambar 2.10. Aliran temperatur dengan aliran searah

2. Pertukaran panas dengan aliran berlawanan arah (*counter flow*) Pertukaran panas pada sistem ini yaitu kedua fluida (panas dan dingin) masuk penukar panas dengan arah berlawanan dan keluar pada sisi yang berlawanan (Hartono, 2008)



Gambar 2.11. Aliran temperatur pada aliran berlawanan arah

Dengan asumsi nilai kapasitas panas spesifik (C_p) fluida dingin dan panas konstan, tidak ada kehilangan panas pada lingkungan serta keadaan *steady state*, maka besarnya kalor yang dipindahkan

$$Q = U A T_{LMTD} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana:

U : Koefisien perpindahan panas keseluruhan ($W/m^2 K$)

A : Luas perpindahan panas (m^2)

T_{LMTD} : *Log mean temperature differential* (K)

Dan untuk Luas perpindahan panas tersebut dapat dicari sbb:

$$A = \frac{Q}{U \cdot F \cdot LMTD} \dots\dots\dots(2.10)$$

Koefisien perpindahan panas digunakan dalam perhitungan sbb :

perpindahan panas konveksi atau perubahan fase antara cair dan padat dengan menggunakan persamaan berikut.

$$h = \frac{q}{A \cdot \Delta T} \dots\dots\dots(2.11)$$

Dari persamaan di atas, koefisien perpindahan panas adalah koefisien proporsionalitas antara fluks panas, $Q/(A \cdot T)$, dan perbedaan temperatur yang menjadi penggerak utama perpindahan panas,

persamaan lain untuk menentukan koefisien perpindahan konveksi secara menyeluruh menggunakan persamaan berikut:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{in}} + \frac{1}{h_{out}}} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana:

U : Koefisien perpindahan panas konveksi menyeluruh ($W/m^2.K$)

h_{in} : Koefisien perpindahan panas konveksi bagian dalam($W/m^2.K$)

h_{out} :: Koefisien perpindahan panas konveksi bagian luar ($W/m^2.K$)

2.6. Efektivitas

Efektivitas penukar panas didefinisikan sebagai perbandingan antara laju perpindahan kalor yang sebenarnya dengan laju perpindahan kalor maksimum yang mungkin. Dimana persamaannya dapat ditunjukkan seperti berikut ini (Holman, 1997)

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana, Q = perpindahan panas nyata (W)

Q_{max} = perpindahan panas maksimum yang mungkin (W)

Untuk perpindahan panas yang sebenarnya (aktual) dapat dihitung dari energi yang dilepaskan oleh fluida panas atau energi yang diterima oleh fluida dingin untuk penukar panas aliran lawan arah

$$Q = C_h \cdot (T_{h,in} - T_{h,out}) = C_c (T_{c,out} - T_{c,in}) \dots\dots\dots (2.14)$$

m_h = laju aliran fluida panas (kg/m^3)

m_c = laju aliran fluida dingin (kg/m^3)

C_h = kapasitas panas fluida panas ($Kj/m^3 K$)

C_c = kapasitas panas fluida dingin ($Kj/m^3 K$)

$T_{h,in}$ = Temperatur masuk fluida panas (K)

$T_{h,out}$ = Temperatur keluar fluida panas (K)

$T_{c,in}$ = Temperatur masuk fluida dingin (K)

$T_{c,out}$ = Temperatur keluar fluida dingin (K)

Kapasitas panas setiap fluida dapat dicari melalui persamaan :

$$C = m \cdot C_p \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana : m = laju aliran fluida (kg/m^3)

C_p = panas spesifik fluida ($\text{Kj}/\text{m}^3 \text{ K}$)

Untuk menentukan perpindahan panas maksimum bagi penukar panas itu harus dipahami bahwa nilai maksimum akan didapat bila salah satu fluida mengalami perubahan temperatur sebesar beda temperatur maksimum yang terdapat dalam penukar panas itu, yaitu selisih temperatur masuk fluida panas dan fluida dingin. Fluida yang mungkin mengalami beda temperatur maksimum ini ialah yang laju aliran fluida dinginnya minimum, syarat keseimbangan energi bahwa energi yang diterima oleh fluida yang satu harus sama dengan energi yang dilepas oleh fluida yang lain. Jika fluida yang mengalami nilai laju aliran fluida dinginnya lebih besar yang dibuat, maka mengalami beda temperatur yang lebih besar dari maksimum, dan ini tidak dimungkinkan. Jadi perpindahan panas maksimum yang mungkin dinyatakan sebagai :

$$Q_{max} = C_{min} (T_{h,in} - T_{c,in}) \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana, C_{min} merupakan kapasitas panas yang terkecil antara fluida dingin dan fluida panas. Jika $C_h = C_{min}$ maka nilai efektivitas dapat dicari dengan persamaan berikut :

$$\varepsilon = \frac{C_h (T_{h,in} - T_{h,out})}{C_{min} (T_{h,in} - T_{c,in})} = \frac{(T_{h,in} - T_{h,out})}{(T_{h,in} - T_{c,out})} \dots\dots\dots(2.17)$$

Sedangkan untuk , $c_c = C_{min}$ nilai efektivitas dapat dicari dengan persamaan berikut (Blevins, 1984):

$$\varepsilon = \frac{C_c (T_{c,out} - T_{c,in})}{C_{min} (T_{h,in} - T_{c,in})} = \frac{(T_{c,out} - T_{c,in})}{(T_{h,in} - T_{c,in})} \dots\dots\dots(2.18)$$

BAB III

METODELOGI PENELITIAN

3.1. Tempat dan Waktu

3.1.1. Tempat

Pengujian Alat penukar kalor (Heat exchanger) Shell and tube ini dilakukan di Laboratorium Fakultas Teknik jurusan Teknik Mesin jalan Kolam No. 1 / jalan Gedung PBSI Telp. 061 – 7366878, **UNIVERSITAS MEDAN AREA**.

3.1.2. Waktu

Waktu penelitian dilakukan setelah di desetujui sejak tanggal pengesahan judul usulan tugas akhir dan berkas seminar proposal oleh pihak jurusan Fakultas teknik Mesin **UNIVERSITAS MEDAN AREA** Sampai dinyatakan selesai.

3.2 Studi literatur

Studi literatur bertujuan untuk memperoleh teori dan rumus – rumus dari beberapa buku referensi yang di perlukan dalam perhitungan Analisis alat penukar kalor shell and tube dan juga sebagai acuan dari analisa suatu heat exchanger shell and tube yang sesuai kebutuhan

3.3. Bahan dan Alat

3.3.1. Bahan

Bahan yang digunakan dalam pengujian analisis ini adalah

1. Silinder atau tabung shell Steanlessteal

Steanlessteal atau baja tahan karat adalah Material yang digunakan Untuk Shell silinder penukar kalor . material ini bersifat Isolator yang mampu menahan temperatur panas yang dihasilkan dari perpindahan panas yang

terjadi di tube pipa tembaga. Material ini mengandung Unsur Chromium lebih dari 10,5 %

Klasifikasi Steanlessteal dapat di bedakan menjadi Kelompok stainless stell martensitic

yang terbagi menjadi : type 410 , 416 , 431 , kelompok steanless stell Feritic dengan Type 430, dan kelompok Steanless stell Austenit, dengan Type : 304, 321, 347, 316 dan 317

Dari kesekian jenis dan type diatas yang membedakan nya yaitu kandungan Unsur Chromiumnya.

2. Pipa Tembaga.

Pipa tembaga yang digunakan adalah dengan bahan ASTM B88 sebagai pipa penghantar untuk proses perpindahan panasnya di tube.

3. Pipa Besi

Pipa mempunyai banyak ukuran, mulai dari yang terkecil dengan ukuran diameter 1/2 inch sampai ukuran yang sangat besar dengan diameter 72 inch atau kira2 1.8 meter.secara umum material yang banyak digunakan untuk pipa dan komponennya terbagi atas dua katagori utama yaitu :

- Metallic (Logam)
- Non metallic (Non logam)

khusus untuk jenis Metallic dibagi dalam dua kelompok yaitu ; ferrous dan Non ferrous. ada 2 (dua) jenis metode yang digunakan untuk menamai ukuran pipa :

- NPS (Nominal Pipe Size) adalah ukuran standard Amerika Utara, dengan ukurannya berdasarkan “inch”.
- DN (Diameter Nominal) adalah penunjukkan ukuran eropa dengan ukurannya berdasarkan “milimeter”.

selain penamaannya dengan NPS atau DN, maka ada pasangan yg selalu tidak ketinggalan ketika disebutkan ukuran pipa yaitu schedule (sch). Schedule adalah suatu penunjukkan ukuran ketebalan dinding pipa atau dengan kata lain Thickness. Didalam penelitian ini pipa besi digunakan untuk fluida air panas karena dapat menahan temperatur panas

4. Elbow

Elbow adalah jenis fitting yang pertama, elbow merupakan komponen pemipaan yang berfungsi untuk membelokan arah aliran. Layaknya tikungan kalau kita sedang berada di jalan, tikungan tersebut mau tidak mau membuat kita berbelok arah ketika melaluinya, begitu pula elbow yang bertugas untuk membelokan aliran fluida. Elbow terdiri dari dua jenis yang paling umum yaitu 45 dan 90 derajat. Untuk memperoleh sudut di selain sudut diatas, terkadang elbow tersebut di potong. Atau bisa juga dengan menggunakan dua elbow yang disatukan untuk memperoleh sudut tertentu. Dipasaran, elbow dibagi menjadi dua tipe, tipe sort radius dan long radius. Namum umumnya digunakan long radius, yang

memiliki diameter belokan 1.5 kali NPS (nominal Pipe size)nya. Ada pula yang sampai dengan 3D atau bahkan 6D, yang biasa digunakan untuk flare

Contoh : Menghitung radius elbow , kita menghitung pipa yang dengan diameter 2". Maka radiusnya adalah, $1.5 \times 2" = 3"$ (76.2 mm),

yang dikalikan adalah nominal diameter dari pipa nya, NPSnya, bukan actual diameter dari pipanya seperti yang pernah saya singgung di sejarah dan teori dasar piping. Elbow pada umumnya memiliki diameter yang sama antara masukan dan keluaran, walaupun ada juga yang memiliki ukuran berbeda, yang kita sebut dengan reducing elbow. Selain itu, ada satu komponen fitting yang mirip elbow, sama sama berfungsi untuk membelokan aliran, namun di buat dari potongan pipa, kita menyebutnya dengan miter.

5. Tangki AIR

Tangki yang digunakan dalam penelitian ini terbuat dari material Stainless Steel Yaitu berjumlah dua buah : dengan tangki fluida dingin untuk menampung fluida dari perpindahan panasnya dan tangki untuk fluida panas untuk menaikkan temperatur air panas dengan menggunakan water heater.

3.3.2 . Alat penelitian

AlatAlat yang digunakan Dalam pengujian analisa ini dibutuhkan 1 set lengkap alat uji Heat Exchanger seperti gambar di samping 3.1 ini:

Pada Alat Ini sudah terpasang lengkap komponen – komponen bagian mesin , bahan dan alat – alat yang digunakan untuk di uji .

alat Ini dibuat dalam bentuk skala laboratorium yaitu skala kecil dimana , mahasiswa dapat mengaplikasikanya di industri kelapa sawit , power plant, pengolahan minyak mentah Cpo, serta industri lainya yang memakai sistem penukar kalor jenis shell and tube



Dan alat – alat ukur nya sebagai berikut :

1). Termokopel / LCD

Adalah sebuah alat yang digunakan sebagai penentu temperatur fluida panas .
Alat ini bekerja dengan sensor kabel dan infra merah yang sangat sensitif.



Gambar 3.2 : Termokopel

2). Water flow meter.

Alat ini berfungsi sebagai pengukur debit air. Dan pada alat penukar kalor yang digunakan ini dibutuhkan 2 flow meter yaitu :

2.1. Untuk mengukur debit flow fluida panas , dan

2.2. Untuk mengukur debit flow fluida dingin



Gambar 3.3 : Water flow meter

3). Water Heater

Alat Pemanas air atau water heater adalah termodinamika proses yang menggunakan sumber energi untuk memanaskan air di atas suhu awal. Pemakaian rumah tangga khas air panas termasuk memasak, membersihkan, mandi, dan pemanas ruangan. Dalam industri, air panas dan air dipanaskan sampai uap memiliki banyak kegunaan. Di dalam negeri, air dipanaskan dalam kapal tradisional yang dikenal sebagai *pemanas air*, *ceret*, *kuali*, *panci*, atau *tembaga*. Kapal-kapal logam yang panas batch air tidak menghasilkan pasokan terus-menerus air dipanaskan pada suhu preset. Jarang, air panas terjadi secara alami, biasanya dari sumber air panas alam. Suhu bervariasi berdasarkan tingkat konsumsi, menjadi dingin seperti meningkatkan aliran.



Gambar 3.4 : Water Heater

4). Pompa air

Pompa Air merupakan pesawat angkut yang bertujuan untuk memindahkan zat cair melalui saluran tertutup . Pompa menghasilkan suatu tekanan yang sifatnya hanya mengalir dari suatu tempat tinggi ke tempat yang bertekanan lebih rendah .

Atas dasar kenyataan tersebut maka pompa harus mampu membangkitkan tekanan fluida sehingga dapat mengalir atau berpindah .Fluida yang dipindahkan adalah fluida incrompresibel atau fluida yang tidak dapat dimampatkan .Dalam kondisi tertentu pompa dapat digunakan untuk memindahkan Zat padat yang berbentuk bubukhan atau tepung .Prinsip kerja pompa adalah menghisap dan melakukan penekanan terhadap fluida .Dan pada alat ini pompa berfungsi sebagai motor untuk menyalurkan fluida panas dan fluida dingin ketiap masing – masing shell dan di pipa penghantar Tube



Gambar 3.5 : POMPA AIR

5). Stop kran

Stop kran Merupakan Alat yang , berfungsi untuk menghentikan arus masuk pasokan air saat tingkat air tertentu sesuai yang diinginkan. desain revolusioner pintar ini menghilangkan sebagai pengganti pelampung konvensional, sehingga kompak dan ringan, yang akan menghemat biaya dalam penyimpanan air. Aplikasi ini memiliki multifungsi, ideal untuk digunakan di toilet duduk, di tangki air, dalam ember semua ukuran, di bak air, di akuarium, di kolam renang, di sistem irigasi dan dan banyak lagi kegunaannya.

Pada alat ini stop kran berfungsi untuk mengatur laju aliran fluida dingin berdasarkan tingkat kecepatannya yaitu dengan mengaturnya sesuai kapasitas pada alat ukur water flow meter.



Gambar 3.6 : Stop Kran

3.4. Penentuan Awal Data Analisa

Dalam analisis ini diperoleh data awal yang sudah direncanakan sebagai data hipotesa atau data sementara yaitu sbb:

- 1). Kapasitas pompa air masuk = Direncanakan $0,005 \text{ m}^3/\text{menit}$
- 2). Temperatur Fluida dingin Masuk = $31 - 35^{\circ}\text{C}$ (Derajat celcius)
- 3). Temperatur Fluida panas Masuk = $60^{\circ} - 100^{\circ}\text{C}$ (Derajat celcius)
- 4). Diameter Shell = 4 inchi
- 5). Diameter tube (pipa tembaga) = $\frac{1}{2}$ inchi
- 6). Susunan pipa tembaga = Segaris/bujursanngkar

3.5. Prosedur penelitian

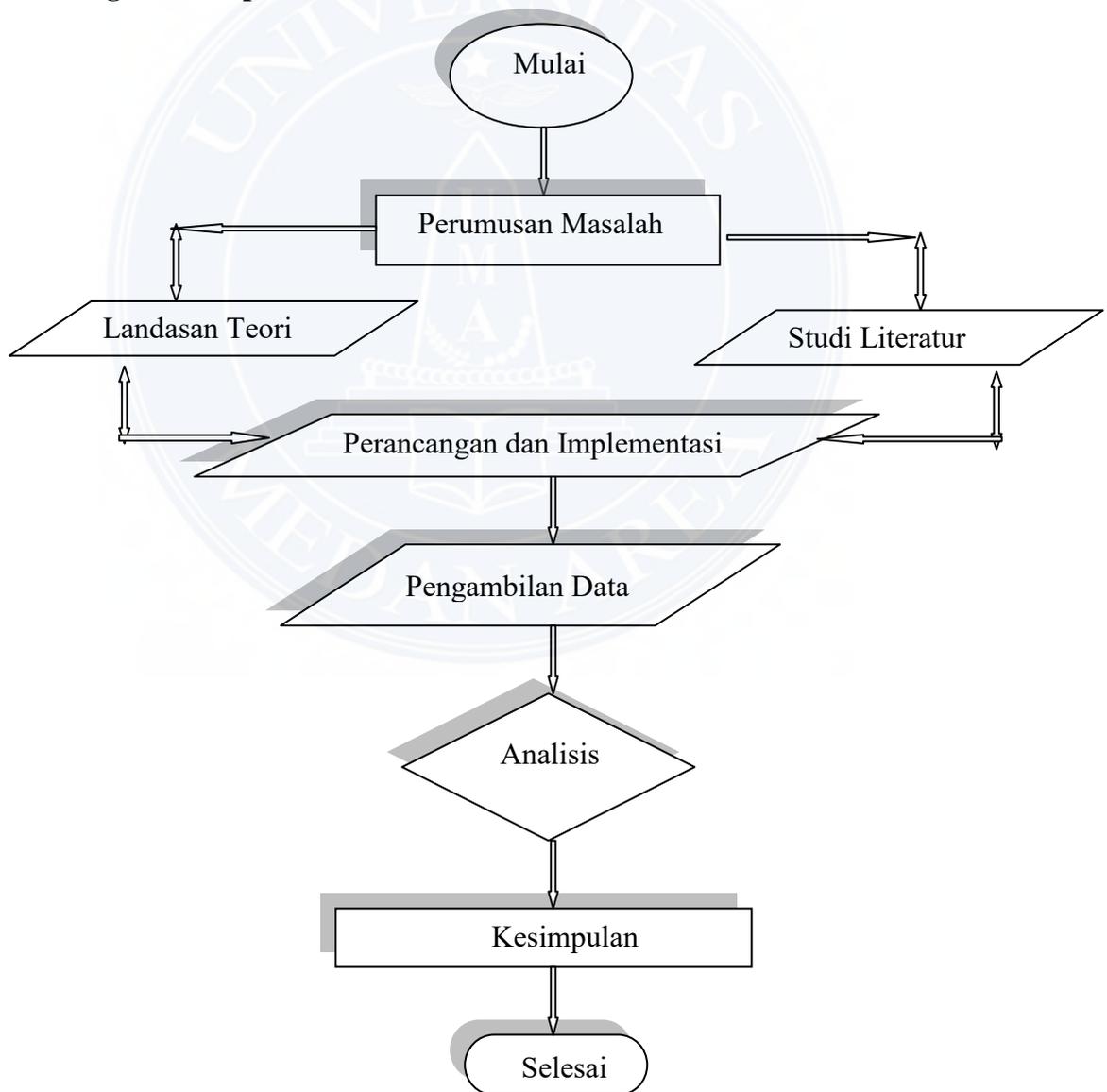
1. Masukkan Air kedalam masing – masing Tangki (dingin dan panas) sesuai dengan kapasitas Volume dari alat ukur Flow meter tersebut

2. Sambungkan steker ke listrik dan naikan saklar MCB Serta hidupkan saklar untuk pemanas air (water heater) didalam tangki untuk fluida panas dan tunggu beberapa menit agar air berubah menjadi temperatur min. 60°
3. Untuk Percobaan pertama Apabila air didalam tangki fluida telah mencapai temperatur pertama yaitu min 60° . Hidupkan Pompa fluida panas untuk menyalurkan Fluida panas tersebut kedalam tube yang berada didalam shell dengan Tube berjumlah 12 batang (pipa tembaga)
4. Setelah itu apabila fluida panas telah mengalir dan bersirkulasi .Hidupkan Pompa untuk fluida dingin dengan menyetel stopkran yang berada di instalasi pipa penyalur
5. Aturilah kecepatan fluida dingin dengan kecepatan rendah dan waktu yang ditentukan agar aliran fluida dingin dapat menyerap panas yang dihasilkan Oleh fluida panas dari tube (pipa tembaga yang berada didalam shell.
6. Lihat Temperatur yang terjadi di Pengukur suhu Termokopel
 1. $T_{h1} = 60^{\circ}$ C (Temperatur Fluida panas)
 2. $T^1 = 31 - 35^{\circ}$ C (Temperatur fluida Normal /fluida dingin)
7. Setelah itu Atur Waktu dengan Stopwatch min 5 menit Untuk melihat hasil perpindahan yang terjadi antara kedua fluida yang berbeda temperatur tersebut .
8. Dari hasil Percobaan tersebut kita dapat menentukan hasil perpindahan melalui

T^2 (Hasil Temperatur fluida dingin) dan Tg^2 (Hasil Temperatur fluida panas)

9. Setelah itu atur kembali kecepatan fluida dingin dengan kecepatan sedang pada stopkran dan Atur juga waktu yang ingin di tentukan selanjutnya 5 Menit
10. Dan juga Naikan Suhu pada pemanas Air menjadi 70^0 C, Begitu dengan percobaan selanjutnya kedua , ketiga Dst

3.4. Diagram Alir penelitian



3.7. TEMPAT PENELITIAN

Tempat Alat penukar kalor dilakukan di laboratorium kampus I fakultas teknik Jurusan teknik mesin Jalan kolam No.1/jalan gedung PBSI Telp.061-73668787 , MEDAN

JADWAL PENELITIAN TUGAS AKHIR

No.	Rencana Kegiatan	Bulan I				Bulan II				Bulan III			
		Minggu ke-				Minggu ke-				Minggu ke-			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1.	Pengambilan judul	■											
2.	Seminar proposal		■										
3.	Persiapan Alat			■									
4.	Pengambilan Data				■	■	■						
5.	Analisa Data						■	■	■				
6.	Seminar Hasil									■	■		
7.	Sidang Sarjana											■	■

DAFTAR PUSTAKA

1. Holman J.P., dan Jasjfi, E. (penerjemah), “ *Perpindahan Kalor* “ , Edisi Keenam, Erlangga : Jakarta , 1994
2. Sitompul, Tunggul M., Ir., SE., M.Sc.” *Alat penukar kalor* “ , PT. Raja Grafindo Persada : Jakarta , 1993
3. Kern , D., “ *Process Heat Transfer* “ , International Student Edition , Mc. Graw- Hill : Japan, 1993
4. Saunders, E.A.D., “ *Heat Exchanger Selection , Design and Construction*” John Willey & Sons : London , 1998.
5. Incropera, F.P. dan DeWitt, D.P., 1990, *Fundamentals of Heat Transfer*, Ed. 3, New York : John Willey & Sons.
6. Koestoer, Raldi Artono, 2002, *Perpindahan Kalor Untuk Mahasiswa Teknik*, Ed. Jakarta : Salemba Teknik.
7. Kreith, Frank, 1997, *Prinsip-prinsip Perpindahan Panas*, Ed. 3, Jakarta: PT. Gelora Aksara Pratama.

LAMPIRAN

Lampiran 1

FAKTOR KONVERSI (PERPINDAHAN)

1. Panjang Konduktivitas thermal

$$12 \text{ in} = 1 \text{ ft} \quad 1 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft} \cdot \text{oF} = 1.7307 \text{ W/m} \cdot \text{°C}$$

$$1 \text{ in} = 2.54 \text{ cm}$$

$$1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m} = 10^{-4} \text{ cm} \quad \text{Koefisien perpindahan kalor}$$

$$1 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{oF} = 5.6782 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

2. Massa

$$1 \text{ kg} = 2.205 \text{ lbm} \quad \text{Volume}$$

$$1 \text{ slug} = 32.16 \text{ lbm} \quad 1 \text{ in}^3 = 1.63871 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$454 \text{ g} = 1 \text{ lbfm} \quad 1 \text{ ft}^3 = 0.0283168 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ lbm} = 0.45359237 \text{ kg} \quad 1 \text{ gal} = 231 \text{ in}^3 = 0.0038 \text{ m}^3$$

3. Gaya Energi

$$1 \text{ dyn} = 2.248 \times 10^{-6} \text{ lbf} \quad 1 \text{ Btu} = 1055.04 \text{ J}$$

$$1 \text{ lbf} = 4.448 \text{ N} \quad 1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$$

$$105 = 1 \text{ N} \quad 1 \text{ cal (15°C)} = 4.1855 \text{ J}$$

$$1 \text{ dyn} = 10^{-5} \text{ N} \quad 1 \text{ ft} \cdot \text{lbf} = 1.35582 \text{ J}$$

$$1 \text{ hp} \cdot \text{h} = 2545 \text{ Btu}$$

4. Tekanan

$$1 \text{ Btu} = 778 \text{ ft} \cdot \text{lbf}$$

$$1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa} \quad 1 \text{ Btu} = 252 \text{ cal}$$

$$1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa} \quad 1 \text{ kWh} = 3413 \text{ Btu}$$

$$1 \text{ lbf/in}^2 = 6894.76 \text{ Pa}$$

1 in Hg = 70.73 lbf/ft² Densitas

5. Daya

1 lbm/in³ = 2.76799 x 10⁴ kg/m³

1 hp = 745.7 W

1 Btu/h = 0.293 W Laju aliran panas

1 Btu/h = 0.293 W

6. Suhu

1 cal/s cm² = 13.272 Btu/h.ft²

1 °R = (5/9) °K 1 watt/cm² = 3171 Btu/h.ft²

t (°F) = (K-273) 9/5 + 32 1 cal/h cm² = 3.687 Btu/ h.ft²

1 °K = 1.8 °F

1 °C = 1.8 °F Kapasitas panas spesifik

1 Rankine = 1 F 1 Btu/lb F = 4.184 J kg⁻¹ K⁻¹

7. Viskositas Laju aliran massa

1 lbm/h ft = 4.13 x 10⁻⁴ Ns/m² 1 lb/h = 0.000126 kg/s

1 lbm/s ft = 1.488 Ns/m²

1 ft²/s = 0.0929 m²/s

1 lbf s/ft² = 32.174 lbm/ s ft

Lampiran 2

Tabel A-9 Sifat – sifat Air (Zat Cair Jenuh)

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

°F	°C	c_p Kj/kg. °C	ρ Kg/m ³	μ Kg/m . s	k , W/m . °C	Pr	$\left(\frac{\delta\beta\rho^2c_p}{\mu k} \right) x^3 \Delta T$ 1 / m ³ . °C
32	0	4.225	999.8	1.79 x 10 ⁻³	0.566	13.25	1.91 x 10 ⁹
40	4.44	4.208	999.8	1.55	0.575	11.35	6.34 x 10 ⁹
50	10	4.195	999.2	1.31	0.585	9.40	1.08 x 10 ¹⁰
60	15.56	4.186	998.6	1.12	0.595	7.88	1.46 x 10 ¹⁰
70	21.11	4.179	997.4	9.8 x 10 ⁻⁴	0.604	6.78	1.91 x 10 ¹⁰
80	26.67	4.179	995.8	8.6	0.614	5.85	2.48 x 10 ¹⁰
90	32.22	4.174	993.0	7.65	0.623	5.12	3.3 x 10 ¹⁰
100	37.78	4.174	990.6	6.82	0.630	4.53	4.19x 10 ¹⁰
110	43.33	4.174	999.6	6.16	0.637	4.04	4.89 x 10 ¹⁰
120	48.89	4.174	988.8	5.62	0.644	3.64	5.66 x 10 ¹⁰
130	54.44	4.179	985.7	5.13	0.649	3.30	6.48 x 10 ¹⁰
140	60	4.179	983.3	5.71	0.654	3.01	7.62 x 10 ¹⁰
150	65.55	4.183	980.3	4.3	0.659	2.73	8.84 x 10 ¹⁰
160	71.11	4.186	977.3	4.01	0.665	2.53	9.85 x 10 ¹⁰
170	76.67	4.191	973.7	3.72	0.665	2.33	1.09 x 10 ¹¹
180	82.22	4.195	970.2	3.47	0.673	2.16	
190	87.78	4.199	966.7	3.27	0.675	2.03	
200	93.33	4.204	963.2	2.06	0.678	1.90	
220	104.4	4.216	955.1	2.67	0.684	1.66	
240	115.6	4.229	946.7	2.44	0.685	1.51	
260	126.7	4.250	937.2	1.19	0.685	1.36	
280	137.8	4.271	928.1	1.98	0.685	1.24	
300	148.9	4.296	918.0	1.86	0.684	1.17	
350	176.7	4.371	890.4	1.57	0.677	1.02	
400	204.4	4.467	859.4	1.36	0.665	1.00	
450	232.3	4.585	825.7	1.20	0.646	0.85	
500	260	4.731	785.2	1.07	0.616	0.83	
550	287.7	5.024	735.5	9.51 x 10 ⁻⁵			
600	315.6	5.703	678.7	8.68			

Daftar ini menggunakan satuan SI (JP . Holman)