

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

I Made Arsana.(2017.a) melakukan penelitian mengenai alat penukar panas jenis pembuluh dan kawat terdiri atas pembuluh (*tube*) yang dibuat berlekuk-lekuk (*coil*), dengan kawat (*wire*) yang dipasang lekat pada kedua sisinya dalam arah normal pada pembuluh. Kemampuan penukar panas ini dalam membuang panas ditunjukkan oleh efi siensi permukaan menyeluruh (*overall surface effi ciency*) dari susunan sirip atau disebut sebagai efisiensi penukar panas. Kawat yang berfungsi sebagai sirip adalah perluasan dari permukaan luar pembuluh sehingga memperluas permukaan perpindahan panas konveksi bebas dari penukar panas ke lingkungan luar. Efi siensi sirip secara umum tergantung pada bahan sirip, geometri sirip dan lingkungan dimana sirip itu digunakan. Pada penelitian ini dikaji secara eksperimental pengaruh jarak antarkawat terhadap efi siensi penukar panas, tiga desain penukar panas dengan jarak antarkawat yang berbeda ($pw/Lw = 0,015$; $pw/Lw = 0,029$ dan $pw/Lw = 0,044$) diuji dalam lima level suhu fl uida masuk (40, 50, 60, 70, dan 80 0C). Diperoleh hasil, penukar panas dengan $pw/Lw = 0,029$ secara rata-rata menghasilkan efi siensi yang tertinggi.

I Made Arsana.(2017.b) dalam penelitiannya mengatakan bahwa penambahan kawat berfungsi untuk meningkatkan luas permukaan perpindahan panas dan selanjutnya akan memperbesar laju perpindahan panas dan memperkuat konfigurasi pembuluh. Kapasitas penukar panas akan dipengaruhi oleh temperatur fluida masuk yang akan melewati penukar panas tersebut dalam keadaan konveksi bebas. Untuk itu, tujuan penelitian ini adalah mengetahui bagaimana pengaruh temperatur fluida masuk terhadap kapasitas penukar panas jenis pembuluh dan kawat pada konveksi bebas. Penelitian ini menggunakan sebuah penukar panas jenis pembuluh dan kawat dengan panjang kawat 445 mm, pitch kawat 7 mm, diameter kawat 1,2 mm, panjang tube 6416 mm, pitch tube 40 mm, diameter tube 5 mm, lebar kawat 431mm, lebar tube 476 mm dan dibuat tiga variasi temperatur fluida masuk penukar panas yaitu 50°C, 60°C dan 70°C dengan temperatur ruangan di jaga konstan 30°C dan temperatur fluida 0,006 kg/s serta menggunakan oli termo 22,

data yang diperoleh dari penelitian dikaji secara eksperimental yang kemudian dianalisis secara deskriptif. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa temperatur fluida masuk berpengaruh terhadap kapasitas penukar panas, hal ini terbukti bahwa dengan temperatur fluida tinggi 70°C , akan menghasilkan kapasitas penukar panas yang paling baik yaitu 24 watt pada keadaan konveksi bebas.

I Made Arsana.(2017.c) dalam penelitiannya menjelaskan kapasitas penukar panas akan dipengaruhi oleh laju aliran fluida masuk yang akan melewati penukar panas tersebut dalam keadaan konveksi bebas. Maka dari itu, tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana pengaruh laju aliran fluida masuk terhadap kapasitas penukar panas jenis pembuluh dan kawat pada konveksi bebas. Penelitian experimental ini menggunakan sebuah penukar panas yang didesain dengan panjang kawat 445 mm, jarak antar kawat 7 mm, diameter kawat 1,2 mm, lebar kawat 431 mm, jarak antar tube 40 mm, diameter tube 5 mm, dan lebar tube 476 mm serta pembuluh dibuat dalam 12 belitan. Kemudian diuji pada alat eksperimen dengan menggunakan fluida kerja dalam pembuluh yaitu minyak (thermo 22) dan menempatkan thermocouple di sembilan titik lokasi pengukuran pada penukar panas. Untuk melihat pengaruh laju aliran fluida terhadap kapasitas penukar panas, dalam eksperimen dibuat tiga variasi laju aliran fluida masuk yaitu 0,006 kg/s, 0,005 kg/s dan 0,004 kg/s dengan suhu fluida masuk dijaga konstan yaitu pada suhu 70°C dan suhu ruangan 30°C , data yang diperoleh kemudian dianalisis secara deskriptif dengan pendekatan kualitatif. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium perpindahan panas Kampus ITS Surabaya. Sedangkan waktu yang dipergunakan dalam penelitian ini kurang lebih selama 8 bulan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa laju aliran fluida masuk berpengaruh terhadap kapasitas penukar panas, hal ini terbukti bahwa dengan laju aliran fluida yang tinggi yaitu 46 pph (0,006 kg/s) menghasilkan kapasitas penukar panas yang paling baik yaitu dengan nilai kapasitas penukar panas sebesar 41,2 watt pada keadaan konveksi bebas.

Ma'sum, Arsana, Malik, Priyono, Altway.(2012) melakukan penelitian dengan menganalisis pengaruh perubahan geometri terhadap efisiensi dan kapasitas penukar panas jenis pipa dan kawat. Penelitian dilakukan dengan simulasi dan di

validasi secara eksperimen. Simulasi menggunakan metode elemen terbatas dengan memperhitungkan konveksi bebas dan radiasi. Perubahan geometri dilakukan pada diameter dan jarak kawat. Metode perhitungan dalam penelitian ini dengan membagi penukar panas menjadi beberapa elemen. Laju alir panas elemen awal dihitung. Dari hasil perhitungan di dapatkan suhu keluar fluida. Suhu keluar fluida dari elemen awal dipergunakan untuk menghitung laju alir panas elemen selanjutnya hingga elemen terakhir. Validasi secara eksperimental dilakukan dengan mengukur suhu permukaan pipa pada elemen yang ditentukan. Hasil validasi menunjukkan kesalahan sebesar + 4%. Kapasitas panas persatuan berat tertinggi di dapat pada $d_w = 1 \text{ mm} / p_w = 21 \text{ mm}$, Q_{ele} tertinggi, dan T_{out} terendah di dapatkan pada $d_w 1,5 / p_w 14 \text{ mm}$. Dari penelitian ini dihasilkan perbandingan laju alir panas dengan $d_w 1,5 \text{ mm} / p_w 14 \text{ mm}$ meningkat $\square 4\%$ dan berat penukar panas menurun sebesar 19% dibandingkan geometri yang ada di pasaran.

Sobar Ihsan.(2017) mengatakan jenis penukar kalor sangatlah beragam dan masing masing dirancang untuk memenuhi kebutuhan yang spesifik. Namun demikian jenis shell & tube sejauh ini merupakan jenis yang paling banyak dipergunakan berkat konstruksinya relatif sederhana dan memiliki keandalan karena dapat dioperasikan dengan beberapa jenis fluida kerja. Efek pendinginan yang dihasilkan dalam sistem refrigerasi tergantung dari efektivitas kinerja kondensor. Sementara, kinerja kondensor semakin lama akan menurun seiring dengan terjadinya fouling factor. Efek pendinginan yang dihasilkan dalam sistem refrigerasi tergantung dari efektivitas kinerja kondensor. Sementara, kinerja kondensor semakin lama akan menurun seiring dengan terjadinya fouling factor. Pada penelitian ini dilakukan analisis perhitungan jumlah tube dan diameter shell pada kondensor sebagai Alat Penukar Kalor (APK). Dari hasil analisis perhitungan adalah diameter shell 720 mm, jumlah tube 192 buah, diameter tube 38.1 mm, panjang tube 3 m, beda temperatur rata-rata LMTD 8.86 K. Dalam penentuan parameter temperatur desain kondensor sistem cooling-tower, harus mempertimbangkan kinerja cooling-tower dan perubahan temperatur udara.

2.2 Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor dari suatu zat ke zat yang lain seringkali terjadi dalam kehidupan sehari-hari, baik penyerapan atau pelepasan kalor untuk mencapai dan mempertahankan keadaan yang dibutuhkan sewaktu proses berlangsung. Kalor sendiri adalah bentuk energi yang dapat berpindah atau mengalir dari benda yang memiliki kelebihan kalor menuju benda yang kekurangan kalor.

Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa energi tidak dapat musnah, contohnya hukum kekekalan massa dan momentum, ini artinya kalor tidak hilang. Energi hanya berubah bentuk dari bentuk yang pertama ke bentuk yang kedua. Kalor dapat berpindah dengan tiga macam, yaitu :

1. Hantaran, atau sering disebut konduksi.
2. Aliran atau sering disebut dengan konveksi.
3. Pancaran, atau sering disebut dengan radiasi.

2.2.1 Perpindahan Panas Konduksi (Hantaran)

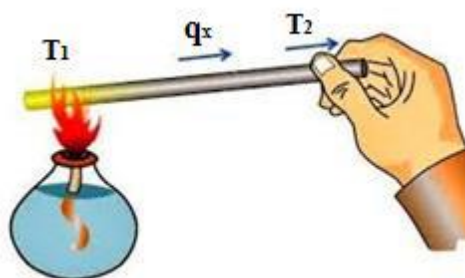
Yang dimaksud dengan konduksi (hantaran) adalah perpindahan kalor melalui satu jenis zat. Sehingga perpindahan kalor secara konduksi merupakan suatu proses dalam, karena proses perpindahan kalor ini hanya terjadi di dalam bahan. Arah aliran energi panas adalah titik bersuhu tinggi ke titik bersuhu rendah.

Bahan yang dapat menghantarkan kalor yang baik disebut konduktor, dan penghantar panas yang buruk disebut isolator. Sifat bahan yang digunakan untuk menyatakan bahwa bahan tersebut merupakan suatu isolator atau konduktor adalah koefisien konduksi termal (k). Apabila nilai koefisien tinggi, maka bahan mempunyai kemampuan mengalirkan kalor dengan cepat. Untuk bahan isolator, koefisien ini bernilai kecil. Pada umumnya, bahan yang dapat menghantar arus listrik dengan sempurna (logam) merupakan penghantar yang baik, juga untuk kalor dan sebaliknya. Pada tabel 2.1 dibawah ini dapat diketahui sifat-sifat suatu material.

Tabel 2.1 Nilai Konduktivitas Bahan (Holman, 1997)

Bahan	k (W/m.C)	Bahan	k (W/m.C)
Logam		Non Logam	
Perak	410	Kuarsa	41,6
Tembaga	385	Magnesit	4,15
Aluminium	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
		Polyethylene	0,33
		Polypropylene	0,16
		Polyvinyl Chlorida	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 lumas SAE 50	0,147	Uap air (jenuh)	0,0206
Freon 12	0,073	Karbondioksida	0,0146

Contohnya sebuah batang silinder dengan material tertentu dimana tidak ada isolasi pada sisi terluarnya dan salah satu ujungnya dipanaskan dengan api sehingga kedua ujung permukaannya memiliki suhu yang berbeda yakni $T_1 > T_2$ Seperti yang terlihat pada gambar 2.1 dibawah ini :



Gambar 2.1 Skematik perpindahan panas pada batang

Sumber : (Skripsi Rinkanto.M, 2018)

Kita dapat mengukur laju perpindahan panas q_x , dan kita dapat menentukan q_x bergantung pada variable-variabel berikut : ΔT , yakni perbedaan temperatur ; Δx , yakni panjang batang ; dan A , yakni luas penampang tegak lurus bidang. Jika ΔT dan Δx adalah konstan dan hanya memvariasikan A , maka kita dapat melihat bahwa q_x berbanding lurus dengan A . Dengan cara yang sama, jika ΔT dan A adalah konstan, kita dapat melihat bahwa q_x berbanding lurus dengan ΔT . Sehingga kita dapat menyimpulkan bahwa

$$q_x = A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana:

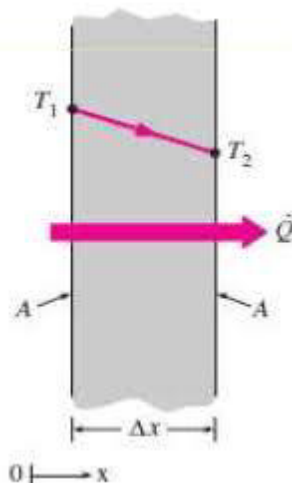
q_x = Laju Perpindahan Panas (W)

A = Luas Penampang Tegak Lurus Bidang (m^2)

ΔT = Perbedaan Temperatur ($^{\circ}C$)

Δx = Panjang Batang (m)

Gambar 2.2 berikut ini adalah perpindahan panas secara konduksi melalui dinding dengan ketebalan Δx .



Gambar 2.2 Perpindahan panas secara konduksi

Sumber : (Skripsi Rinkanto.M, 2018)

Dengan memperhatikan material batang, sebagai contoh plastik, kita akan menemukan bahwa kesebandingan diatas adalah valid. Namun, kita juga menemukan bahwa untuk nilai A , Δx , dan ΔT yang sama, akan menghasilkan nilai q_x yang lebih kecil untuk material plastik dibandingkan bermaterial logam.

Sehingga kesebandingan diatas dapat ditulis dalam bentuk persamaan dengan memasukkan koefisien yang dipengaruhi oleh material. Sehingga diperoleh,

$$q_x = kA \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \dots\dots\dots (2.2)$$

k , adalah konduktivitas thermal (W/m.K), yang merupakan sifat material yang penting. Dengan menggunakan limit $\Delta x \rightarrow 0$ kita mendapatkan persamaan laju perpindahan panas,

$$q_x = -kA \cdot \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana:

q_x = Laju Perpidahan Panas (W)

k = Konduktifitas Thermal (W/m.K)

A = Luas Penampang Tegak Lurus Bidang (m²)

dT/dx = Gradien Temperatur (K/m)

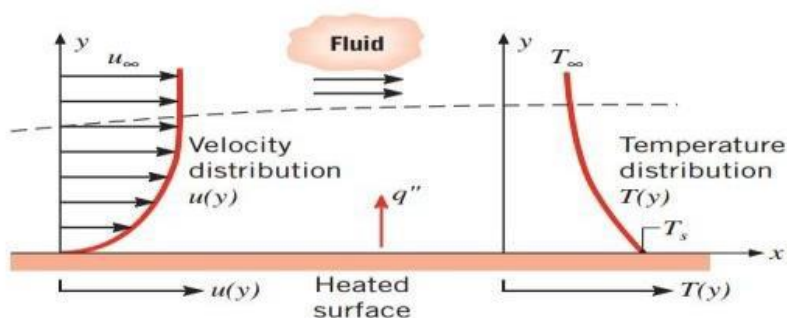
atau persamaan flux panas menjadi:

$$q''_x = \frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots (2.4)$$

2.2.2 Perpindahan Panas Konveksi (aliran)

Yang dimaksud dengan konveksi adalah perpindahan kalor oleh gerak dari zat yang dipanaskan. Konduksi dan konveksi membutuhkan media perantara dalam proses perpindahan panasnya. Berbeda dengan konduksi, konveksi membutuhkan gerakan fluida untuk dapat memindahkan panas. Penelitian menunjukkan bahwa perpindahan panas konveksi sangat bergantung pada sifatsifat fluida seperti viskositas dinamis, konduktivitas termal k , massa jenis, dan spesifik panas C_p dan dipengaruhi oleh kecepatan fluida V . Konveksi juga bergantung pada bentuk dan kekerasan permukaan, dan bahkan juga dipengaruhi oleh tipe aliran seperti laminar atau turbulen. Perpindahan panas secara konveksi dapat dikelompokkan menurut gerakan alirannya, yaitu konveksi bebas (free convection) dan konveksi paksa (forced convection). Apabila gerakan fluida tersebut terjadi sebagai akibat dari perbedaan densitas (kerapatan massa) yang disebabkan oleh gradien suhu maka disebut konveksi bebas atau konveksi alamiah (natural convection). Bila gerakan fluida tersebut disebabkan oleh penggunaan alat dari luar, seperti pompa atau kipas (fan) maka prosesnya disebut konveksi paksa. Sehingga kita dapat menyimpulkan

bahwa perpindahan panas secara konveksi adalah kompleks karena bergantung pada banyak variable. Oleh karena itu, konveksi adalah mekanisme perpindahan panas yang paling kompleks. Meskipun konveksi adalah kompleks, setelah diamati bahwa laju perpindahan panas secara konveksi berbanding lurus dengan perbedaan temperatur dan dapat ditulis dengan Hukum Newton tentang perbandingan. Berikut pada gambar 2.3 dapat kita lihat gambaran perpindahan panas secara konveksi.



Gambar 2.3 Perpindahan panas secara konveksi

Sumber : (Skripsi Rinkanto.M, 2018)

$$q_{\text{konveksi}} = h \cdot A_s (T_s - T_\infty) \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana:

h = Koefisien Perpindahan Panas Konveksi (W/m².K)

q = perpindahan panas secara konveksi (W)

A_s = Luas Permukaan Perpindahan Panas (m²)

T_s = Temperatur Permukaan Benda (°C)

T_∞ = Temperatur Lingkungan Sekitar Benda (°C)

2.2.3 Perpindahan Panas Pancaran (Radiasi)

Yang dimaksud dengan pancaran (radiasi) ialah perpindahan kalor melalui gelombang dari suatu zat ke zat yang lain. Semua benda memancarkan kalor, keadaan ini baru terbukti setelah suhu meningkat. Pada hakekatnya, proses perpindahan kalor radiasi terjadi dengan perantaraan foton dan juga gelombang electromagnet. Apabila sejumlah energi kalor menimpa suatu permukaan, sebagian akan dipantulkan, sebagian akan diserap kedalam bahan, dan sebagian akan

menembus bahan dan terus ke luar. Jadi dalam mempelajari perpindahan kalor secara radiasi, maka akan dilibatkan suatu fisik permukaan. Ciri-ciri radiasi yaitu :

1. Kalor radiasi merambat lurus
2. Untuk perambatan kalor tidak membutuhkan medium (misalnya zat cair atau gas).

Radiasi yang dipancarkan oleh permukaan berasal energy panas materi yang dibatasi oleh permukaan, dan tingkat dimana energi yang dilepaskan persatuan luas disebut *emissive power* (E). Rumus dari Stefan-Boltzmann law untuk menghitung *emissive power* adalah :

$$E = \sigma T_s^4 \dots\dots\dots (2.6)$$

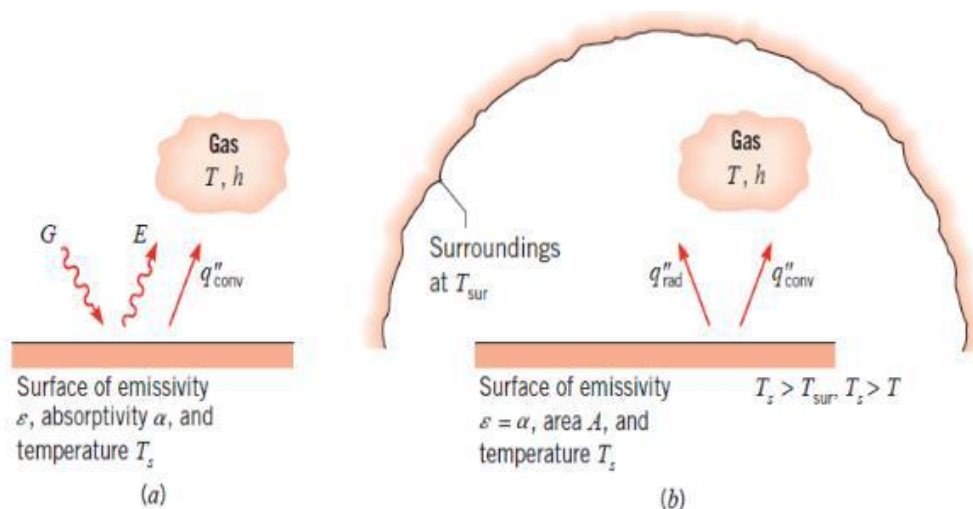
Rumus ini berlaku pada benda hitam atau radiasi ideal, dan :

$$E = \epsilon T_s^4 \dots\dots\dots (2.7)$$

Rumus ini berlaku pada benda real. Dimana :

- E = Daya radiasi
- ϵ = Emisivitas
- σ = Konstanta Stefan-Boltzman ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)
- T_s = Temperatur (K)

Rumus ini berlaku pada benda hitam atau radiasi ideal. Pada gambar 2.4 dibawah ini dapat dilihat perpindahan panas secara radiasi.



Gambar 2.4 Perpindahan panas secara radiasi (a) pada permukaan, (b) diantara sebuah permukaan dan lingkungan sekeliling

Sumber : (Skripsi Rinkanto.M, 2018)

Dengan menganggap permukaan benda yang kecil A_s , emisivitas ϵ , dan kemampuan untuk menyerap α pada temperatur T yang terdiri dari keisotermalan yang besar dalam bentuk yang tertutup pada benda *blackbody*.

Blackbody dapat didefinisikan sebagai pemancar dan penyerap yang sempurna. Pada temperature dan panjang gelombang yang tertentu, tidak ada permukaan yang dapat memancarkan energi yang lebih banyak dari pada *blackbody*. *Blackbody* menyerap semua radiasi tanpa memperhatikan panjang gelombang dan arahnya.

2.3 Kondisi Aliran

Daerah aliran didekat lokasi fluida memasuki pipa disebut sebagai daerah masuk (*entrance region*). Terdapat aliran laminar didalam sebuah pipa bulat dengan jari-jari r_0 , dimana fluida memasuki pipa dengan kecepatan yang seragam. Ketika fluida bergerak melewati pipa, efek viskos menyebabkannya tetap menempel pada dinding pipa dan lapisan batas (*boundary layer*) akan berkembang dengan meningkatnya x . Jadi, sebuah lapisan batas dimana efek viskos menjadi penting dan timbul disepanjang dinding pipa sehingga profil kecepatan berubah menurut jarak sepanjang pipa x , sampai fluida mencapai ujung akhir dari panjang daerah masuk, dimana setelah diluar itu profil kecepatan tidak berubah lagi menurut x . Aliran ini disebut dengan aliran kembang penuh (*Fully Developed flow*), dan jarak dari arah masukan hingga terjadinya kondisi ini disebut dengan “*Hydro Dynamic Entry Length*”, L_h . Profil kecepatan pada daerah aliran kembang penuh berbentuk parabola untuk aliran laminar, sedangkan untuk aliran turbulen berbentuk lebih datar karena aliran berputar pada arah pipa (Incropera, 2007).

Untuk aliran dalam pipa parameter yang tidak berdimensi yang paling penting adalah bilangan *Reynolds* (Re), yaitu menyatakan perbandingan antara efek inersia dan viskos dalam aliran.

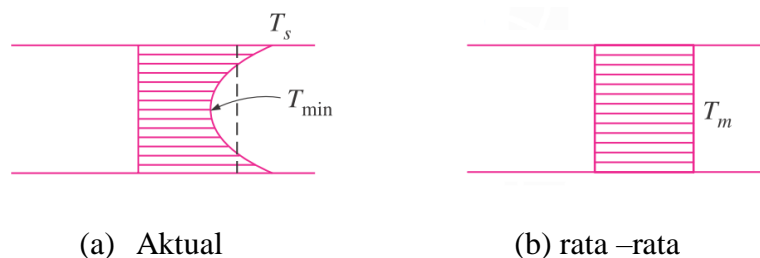
Aliran fluida didalam sebuah pipa terdapat dua kemungkinan aliran yang terjadi yaitu aliran laminar dan aliran turbulen. Kisaran bilangan Reynolds dimana akan diperoleh daerah aliran laminar, transisi atau turbulen tidak dapat ditentukan dengan tepat. Daerah aliran transisi dari aliran laminar ke turbulen mungkin berlangsung pada berbagai bilangan Reynolds, tergantung pada berapa besar aliran

terganggu oleh getaran pipa, kekasaran permukaan, dan hal-hal sejenis lainnya. Berdasarkan buku yang ditulis Cengel (2003) umumnya, nilai bilangan Reynolds untuk aliran laminar, transisi, dan turbulen adalah sebagai berikut :

$Re < 2.000$	merupakan aliran laminar
$2.000 \leq Re \leq 4.000$	merupakan aliran transisi
$Re > 4.000$	merupakan aliran turbulen

2.4 Temperatur rata-rata

Ketika fluida yang mengalir pada pipa dipanaskan atau didinginkan, temperatur fluida pada setiap penampang pipa berubah dari T_s pada permukaan dinding ke maksimum (atau minimum pada proses pemanasan) pada pusat pipa. Untuk menyelesaikan permasalahan aliran fluida dalam pipa, maka digunakan temperatur rata-rata (T_m) yang tetap seragam pada setiap penampang pipa. Tidak seperti kecepatan fluida, temperatur rata-rata (T_m) akan berubah sewaktu-waktu ketika fluida dipanaskan atau didinginkan.



Gambar 2.5 Profil temperatur aktual dan rata-rata pada aliran dalam pipa (Cengel, 2003).

Temperatur rata-rata (T_m) fluida berubah selama pemanasan atau pendinginan, sehingga sifat fluida pada aliran dalam pipa biasanya dihitung pada temperatur rata-rata *bulk* fluida (*bulk mean temperature*), yang merupakan rata-rata dari temperatur rata-rata sisi masuk (T_i) dan temperatur rata-rata sisi keluar ($T_{m,e}$), yaitu (cengel 2003) :

$$T_b = \frac{(T_i + T_{m,e})}{2} \dots\dots\dots (2.8)$$

2.5 Alat Penukar Kalor (Heat Exchanger)

Alat penukar panas atau heat exchanger (HE), adalah suatu alat yang digunakan sebagai media memindahkan panas dan bias berfungsi sebagai pemanas maupun sebagai pendingin. Biasanya, medium pemanas dipakai uap panas (super heated steam) dan air biasa sebagai air pendingin (cooling water). Penukar panas dirancang sebisa mungkin agar perpindahan panas antara fluida dapat berlangsung secara efisien. Pertukaran panas terjadi karena adanya kontak, baik antara fluida terdapat dinding yang memisahkannya maupun keduanya bercampur langsung begitu saja. Penukar panas sangat luas dipakai dalam industri seperti kilang minyak, pabrik kimia maupun petrokimia, industry gas alam, refrijerasi dan pembangkit listrik.

2.5.1 Perinsip Kerja Heat Exchanger

Prinsip kerja dari alat penukar kalor yaitu memindahkan panas dari dua fluida atau lebih pada temperatur berbeda dimana transfer panas dapat dilakukan secara langsung ataupun tidak langsung.

1. Secara Kontak Langsung

Panas yang dipindahkan antara fluida panas dan dingin melalui permukaan kontak langsung berarti tidak ada dinding antara kedua fluida. Transfer panas yang terjadi yaitu melalui interfase / penghubung antara kedua fluida. Biasanya pada kontak langsung terjadi juga perubahan fasa pada fluida tersebut. Contoh: aliran steam pada kontak langsung yaitu 2 zat cair yang immiscible (tidak bercampur), gas liquid, dan partikel padat-kombinasi fluida.

2. Secara kontak tidak langsung

Perpindahan panas terjadi antara fluida panas dan dingin melalui dinding pemisah. Dalam sistem ini, kedua fluida akan mengalir dan fluida panas tidak berhubungan langsung (indirect contact) dengan fluida dingin. Jadi proses perpindahan panasnya itu mempunyai media perantara, seperti pipa, plat, atau peralatan jenis lainnya. Untuk meningkatkan efektivitas pertukaran energi, biasanya bahan permukaan pemisah dipilih dari bahan-bahan yang memiliki konduktifitas termal yang tinggi seperti tembaga dan aluminium. Dengan bahan pemisah yang memiliki konduktifitas termal yang tinggi diharapkan tahanan termal bahan tersebut akan

rendah sehingga seolah-olah antara kedua zat saling dipertukarkan energinya seperti kontak langsung.

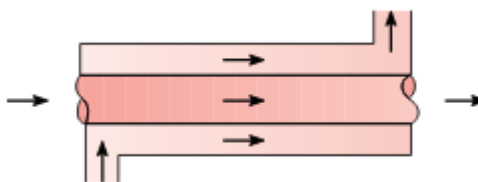
2.5.2 Aliran Fluida Heat Exchanger

Alat penukar kalor (*heat exchanger*) secara tipikal diklasifikasikan berdasarkan susunan aliran (*flow arrangement*) dan tipe konstruksi.

Berdasarkan arah aliran fluida, *heat exchanger* dapat dibedakan menjadi:

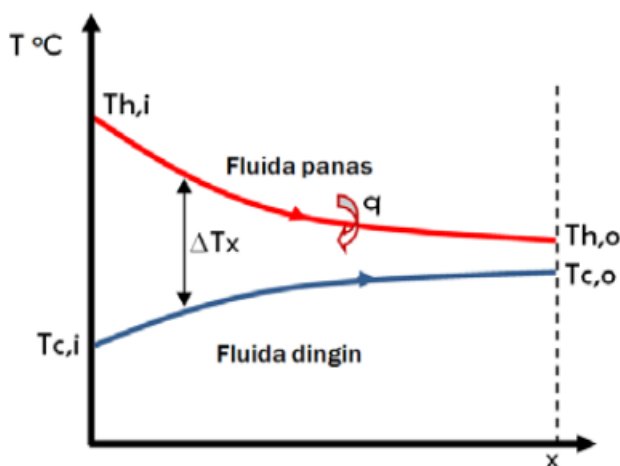
1. *Heat exchanger* dengan aliran searah (*co-current/parallel flow*)

Pertukaran panas jenis ini, kedua fluida (dingin dan panas) masuk pada sisi *heat exchanger* yang sama, mengalir dengan arah yang sama, dan keluar pada sisi yang sama. Karakter *heat exchanger* jenis ini, temperatur fluida dingin yang keluar dari *heat exchanger* (T_{co}) tidak dapat melebihi temperature fluida panas yang keluar (T_{ho}), sehingga diperlukan media pendingin atau media pemanas yang banyak. Berikut merupakan gambar aliran searah :



Gambar 2.6 *Parallel flow*

Sumber : (Skripsi Rinkanto.M, 2018)

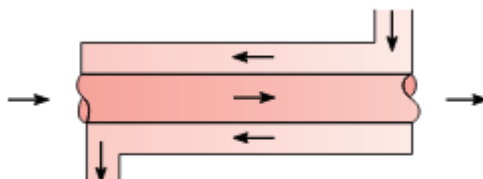


Gambar 2.7 Aliran temperatur dengan aliran searah

Sumber : (Skripsi Rinkanto.M, 2018)

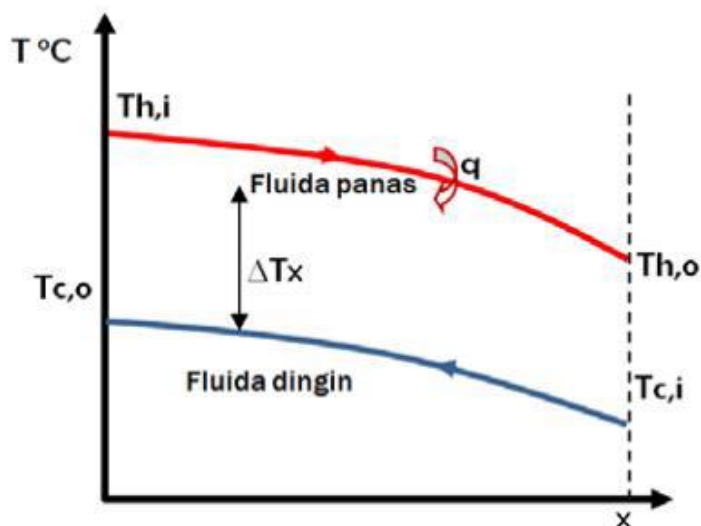
2. *Heat exchanger* dengan aliran berlawanan arah (*counter-current flow*)

Heat exchanger jenis ini memiliki karakteristik; kedua fluida (panas dan dingin) masuk ke *heat exchanger* dengan arah berlawanan, mengalir dengan arah berlawanan dan keluar *heat exchanger* pada sisi yang berlawanan. Berikut merupakan gambaran aliran berlawanan arah.



Gambar 2.8 *Counter flow*

Sumber : (*Skripsi Rinkanto.M, 2018*)



Gambar 2.9 Aliran temperatur pada aliran berlawanan arah

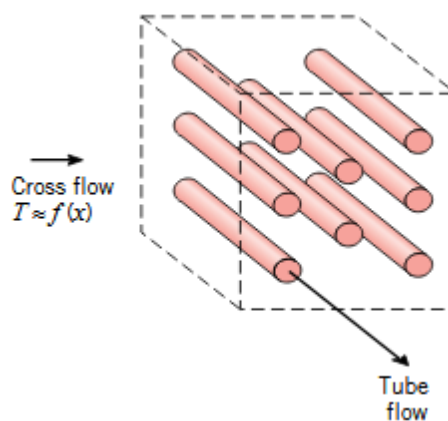
Sumber : (*Skripsi Rinkanto.M, 2018*)

3. *Heat Exchanger* dengan aliran silang (*cross flow*)

Heat exchanger jenis ini, kedua fluida (panas dan dingin) masuk kedalam *heat exchanger* dengan arah bersilangan. Aliran *cross flow* ini terbagi menjadi 2 (dua) yaitu:

- a. Aliran menyilang satu fluida bercampur (mixed) dan satu fluida tidak bercampur (unmixed)

Fluida yang mengalir didalam tabung digunakan untuk memanaskan, sedangkan fluida yang dipanaskan dialirkan menyilang berkas tabung. Aliran yang menyilang berkas tabung disebut arus campuran karena dapat bergerak dengan bebas selama proses perpindahan panas.



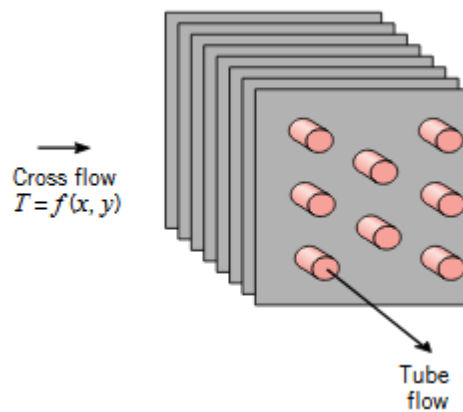
Gambar 2.10 Tidak bersirip dengan satu fluida bercampur

Sumber : (Skripsi Rinkanto.M, 2018)

Dalam aliran campuran terdapat beberapa tipe yaitu : *Immiscible fluids*, *Gas liquid*, *Liquid vapor*.

- b. Aliran menyilang kedua fluida tidak bercampur (*unmixed*)

Untuk penukaran kalor ini, fluida pemanas dan fluida yang akan dipanaskan terkurung didalam saluran-saluran sehingga fluida tidak dapat bergerak bebas selama proses perpindahan kalor. Fluida disebut fluida tak campur karena sirip-sirip menghalangi gerakan fluida dalam satu arah y gerak tersebut melintang kearah aliran utama x.

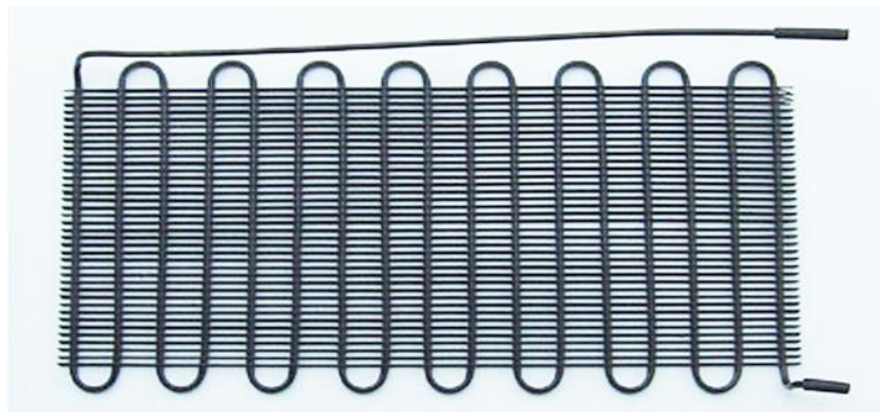


Gambar 2.11 Bersirip dengan kedua fluidanya tidak campur

Sumber : (Skripsi Rinkanto.M, 2018)

2.6 Penukar Panas Tube Dan Kawat

Penukar panas jenis tube dan kawat (*wire and tube heat exchanger*) terdiri dari pipa horizontal (sebagai tempat mengalirnya fluida panas) yang dibuat berlekuk-lekuk dalam susunan vertikal, dengan kawat yang dilekatkan pada kedua sisinya dalam arah normal pada pipa. Dalam aplikasinya posisi pemasangan dari alat penukar panas ini adalah horizontal. seperti terlihat pada Gambar 2.12



Gambar 2.12 Penukar Kalor Pipa Dan Kawat (*Kondensor*)

sumber : (www.google.co.id)

Untuk menentukan kapasitas penukar panas (Q) didapatlah persamaan berikut :

$$Q = h.A. (T_s - T_\infty) \dots\dots\dots (2.9)$$

(J.P. Holman, 1994 hal: 11)

Dimana ;

Q = Kapasitas Penukar Panas (Watt)

h = Koefisien Perpindahan Panas (W/m^2K)

A = Luas Permukaan Perpindahan Panas (m^2)

T_s = Temperatur Permukaan Pipa (K)

T_∞ = Temperatur Udara Luar (K)

2.7 Parameter Tanpa Dimensi

Pada penukar kalor metode perpindahan panas yang terjadi utamanya adalah konveksi dan konduksi. Persamaan perpindahan panas konveksi berkaitan dengan variabel penting yang dinamakan parameter tanpa dimensi (*dimensionless*). Parameter tanpa dimensi dalam kaitannya dengan perpindahan panas konveksi adalah :

2.7.1 Bilangan Rayleigh (*Rayleigh Number*)

Bilangan *Rayleigh* (RaL) adalah bilangan yang didapat pada konveksi bebas. Aliran laminar mempunyai bilangan Rayleigh dibawah 10^9 dan aliran turbulen mempunyai bilangan Rayleigh diatas 10^9 . Bilangan Rayleigh dapat dicari dengan persamaan: (cengel, 2003)

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana :

Ra = Bilangan *Rayleigh*

g = Gravitasi Bumi = ($9,8 \text{ m/s}^2$)

T_s = Suhu Permukaan (K)

T_∞ = Suhu Fluida (K)

$$L = \frac{\text{Luas Penampang}}{\text{Keliling}} = \frac{As}{P} \text{ (m)}$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{2}{T_s + T_\infty} \text{ (K}^{-1}\text{)}$$

α = Difusivitas Panas (m²/s)

ν = Viskositas (m²/s)

2.7.2 Bilangan Nusselt (*Nusselt Number*)

Perpindahan kalor yang terjadi pada suatu lapisan fluida terjadi melalui proses konduksi dan konveksi. Bilangan Nusselt menyatakan perbandingan antara perpindahan kalor konveksi pada suatu lapisan fluida dibandingkan dengan perpindahan kalor konduksi pada lapisan fluida tersebut. Dapat di tulis dengan persamaan :

$$Nu_D = \frac{h.L}{k} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$Nu_D = 0,023 Re_d^{0,8} Pr^n \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana :

h = Koefisien Perpindahan Panas Konveksi (W/m² k)

L = Panjang Karakteristik (m)

k = Konduktivitas Bahan (W/m K)

n = 0,5 for heating ($T_s > T_m$), 0,3 for cooling ($T_s < T_m$)

Incropera, F. P. and D. P. Dewitt, op. cit , hal 496

2.7.3 Bilangan Grashof

Bilangan *Grashof* (Gr) menunjukkan gaya angkat (*buoyant*) yang terjadi pada zat cair, gaya angkat yang terjadi ini disebabkan oleh perbedaan berat jenis sehingga terjadi konveksi secara alam (*free convection*), dalam bentuk persamaan ditulis : (cengel, 2003)

$$G = [(\beta \cdot g \cdot d^3) / \nu^2] \cdot \Delta t \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana :

Gr = Bilangan *Grashof* (tanpa dimensi)

β = Koefisien Pemuaian Zat Cair (1/°C)

g = Percepatan Gravitasi (m/jam²)

d = Diameter Pipa (m)

Δt = Perbedaan Temperatur (°C)

ν = Viskositas Kinematis (m²/jam)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan di Laboratorium Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Pontianak. Penelitian ini dilakukan mulai dari persiapan hingga merancang alat sekitar 5 bulan.

3.2 Jenis penelitian

Penelitian yang kami lakukan adalah dengan menggunakan penelitian eksperimen, penelitian eksperimen yaitu dimana penelitian dilakukan secara sengaja oleh peneliti dengan cara memberikan treatment (perlakuan tertentu) terhadap subjek penelitian guna mendapatkan suatu kejadian atau keadaan yang akan diteliti, dan mencatat sekaligus menganalisa bagaimana pengaruhnya. Dalam hal ini, yaitu untuk mengetahui pengaruh jumlah lekukan *tube* dan jumlah susunan kawat secara horizontal pada kondensor terhadap alat penukar panas skala laboratorium yang bertujuan untuk memperbesar laju perpindahan panas dan mendapatkan kapasitas yang baik

3.3 Peralatan Dan Bahan

1. Las listrik

Las listrik merupakan alat yang digunakan untuk proses penyambungan logam dengan memanfaatkan tenaga listrik sebagai sumber panasnya. Las listrik disini digunakan untuk menyambung dan menyatukan kedudukan untuk menyambung dan pemasangan pompa karna penelitian ini melakukan penambahan pompa sentripugal pada turbin pelton.



Gambar 3.1 las listrik

sumber : (www.google.co.id)

2. Meteran

Meteran juga dikenal sebagai pita ukur atau tape atau bisa di sebut juga sebagai Roll meter ialah alat ukur panjang yang bisa digulung, dengan panjang 25-50 meter. Alat ini berfungsi untuk mengukur bagian bagian yang perlu di lakukan perubahan.



Gambar 3.2 Meteran

sumber : (www.google.co.id)

3. Bor listrik

Mesin bor adalah suatu jenis mesin gerakanya memutarakan alat pemotong yang arah pemakanan mata bor hanya pada sumbu mesintersebut (pengerjaan pelubangan). Bor listrik disini berfungsi untuk melubangi kedudukan untuk pompa



Gambar 3.3 Bor listrik

sumber : (www.google.co.id)

4. Kunci Ring/Pas

Kunci Ring/Pas berfungsi untuk memasang baut pada dudukan poros.



Gambar 3.4 Kunci ring pas

sumber : (www.google.co.id)

5. Gerinda

Mesin gerinda merupakan salah satu jenis mesin dengan mata potong jamak, dimana mata potong berjumlah sangat banyak yang mana digunakan untuk kemampuan dalam penggunaanya untuk mengasah maupun sebagai alat potong benda kerja.



Gambar 3.5 Gerinda

Sumber : (www.gogle.com)

6. Tangki air

Tangki air merupakan penampungan yang digunakan untuk menampung air panas dan air dingin sementara sebelum masuk ke penukar kalor.



Gambar 3.6 Tangki air

Sumber : (www.gogle.com)

7. Stop kran

Stop kran ini terbuat dari bahan tembaga yang digunakan untuk mengatur debit aliran air. Cara penggunaannya dengan memutar stop kran untuk mengatur debit yang diinginkan.



Gambar 3.7 Stop kran

Sumber : (www.gogle.com)

8. Pressure Gauge

Pressure Gauge berfungsi untuk mengukur perbedaan tekanan aliran air pada sisi pipa dalam inlet dan pada sisi pipa dalam outlet. Fluida manometer yang digunakan adalah air.



Gambar 3.8 Pressure Gauge

Sumber : (www.gogle.com)

9. Pompa

Pompa digunakan untuk memompa air dari tangki air masuk ke dalam alat penukar panas melalui pipa-pipa. Pompa yang digunakan hanya 1 buah yaitu untuk memompa air panas.



Gambar 3.9 Pompa

Sumber : (www.gogle.com)

10. Flowmeter

Flowmeter digunakan untuk mengukur debit aliran air panas sebelum masuk ke pipa dalam dari penukar kalor. *Flowmeter* diletakkan diantara saluran *bypass* dengan pipa sebelum masuk pipa dalam dari penukar panas.

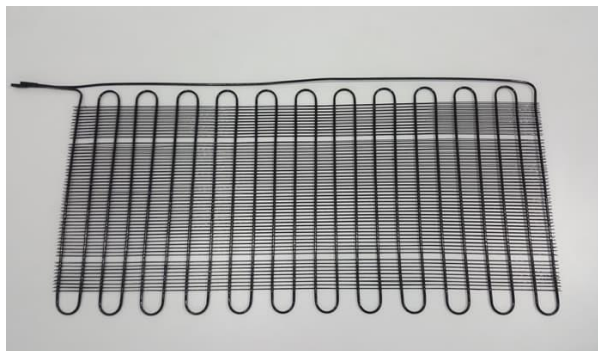


Gambar 3.10 Flowmeter

Sumber : (www.gogle.com)

11. Penukar Panas Pipa dan Kawat / Kondensor

Berfungsi sebagai alat penukar panas jenis pipa dan kawat (*Heat Exchanger*)



Gambar 3.11 Kondensor

Sumber : (www.gogle.com)

12. Thermocouple

Thermocouple adalah jenis sensor suhu yang digunakan untuk mendeteksi atau mengukur suhu melalui dua jenis logam konduktor berbeda yang digabung pada ujungnya sehingga menimbulkan efek “*Thermo-electric*”. Efek *Thermo-electric* pada Termokopel ini ditemukan oleh seorang fisikawan Estonia

bernama *Thomas Johann Seebeck* pada Tahun 1821, dimana sebuah logam konduktor yang diberi perbedaan panas secara gradient akan menghasilkan tegangan listrik.



Gambar 3.12 Thermocouple

Sumber : (www.gogle.com)

13. Termometer Digital

Termometer digital merupakan sebuah alat ukur suhu yang dirancang khusus dalam bentuk digital yang berfungsi memberikan informasi mengenai temperatur yang terdapat pada suatu ruangan, benda, maupun zat. Pada umumnya, termometer digital tersebut dilengkapi termokopel yang berfungsi sebagai sensor. Sensor tersebut berguna untuk membaca perubahan nilai tahanan pada suatu ruangan, benda dan zat.



Gambar 3.13 Termometer digital

Sumber : (www.gogle.com)

14. Pemanas air elektrik (*electric water heater*)

Pemanas ini berfungsi untuk memanaskan air dalam tangki air panas.



Gambar 3.14 Pemanas air elektrik

sumber : (www.google.co.id)

15. Temperature controller atau thermostat

Temperature controller digunakan untuk menjaga temperatur air panas yang akan masuk ke pipa dalam agar konstan.



Gambar 3.15 *Temperature controller* atau thermostat

sumber : (www.google.co.id)

16. Thermohygrometer

Thermohygrometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan. Thermohygrometer dapat menampilkan suhu dan kelembapan secara realtime.

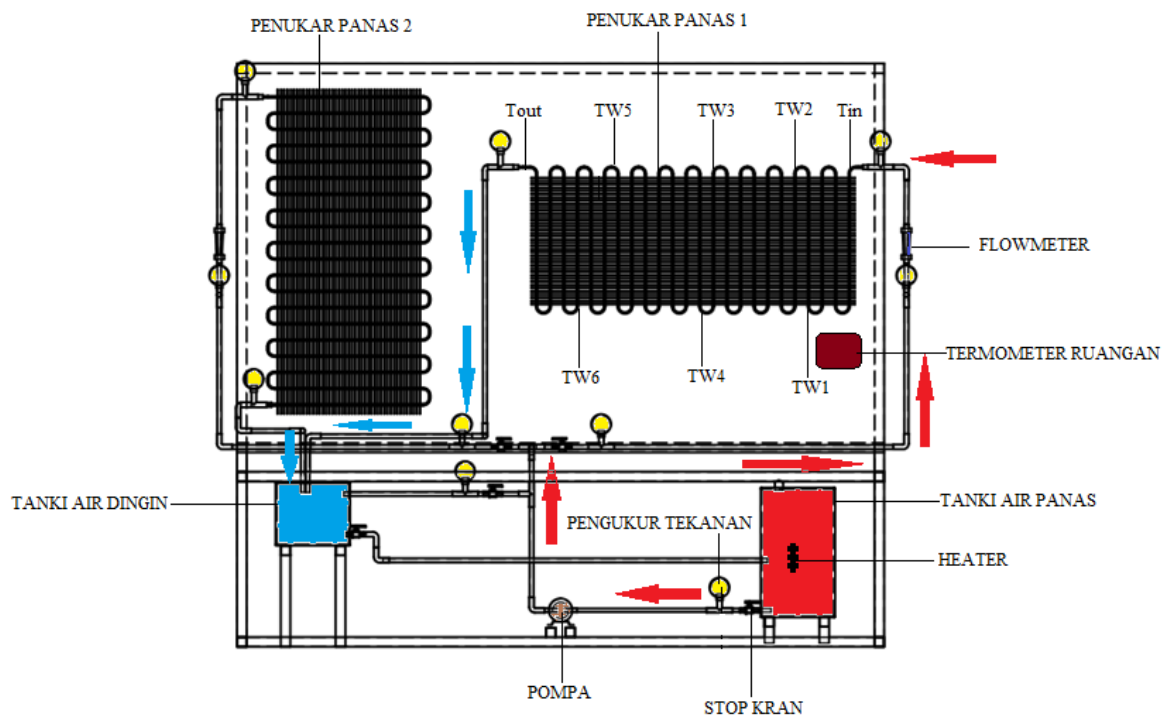


Gambar 3.16 Thermohygrometer

sumber : (www.google.co.id)

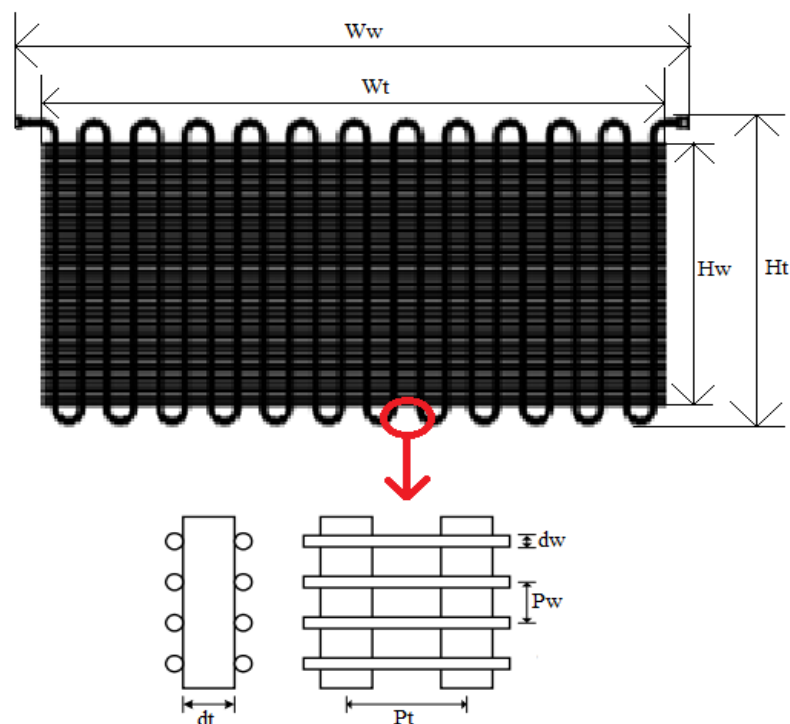
3.4 Peralatan Eksperimen

Untuk mengetahui pengaruh jumlah lekukan *tube* dan jumlah susunan kawat secara horizontal pada kondensor terhadap alat penukar panas skala laboratorium, maka penelitian ini dapat direncanakan sedemikian rupa sehingga dapat digunakan untuk pengambilan data yang diperlukan. Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah berupa alat penukar panas jenis tube dan kawat (kondensor) dan dilengkapi dengan peralatan yang secara skematis atau instrumen-instrumen penunjang lainnya, yang disajikan dalam gambar di bawah ini:



Gambar 3.17 Skema instalasi pengujian

3.5 Rancangan Penukar Panas



Gambar 3.18 Rancangan Penukar Panas Tube Dan Kawat

Berikut adalah tabel rancangan ukuran penukar panas tube dan kawat

Penukar Panas 1		
H_t	Tinggi Tube	450 mm
H_w	Tinggi Kawat	365 mm
d_w	Diameter Kawat	1,3 mm
d_t	Diameter Tube	5 mm
W_t	Lebar Kawat	930 mm
W_w	Lebar Tube	923 mm
P_w	Jarak Antar Kawat	5 mm
P_t	Jarak Antar Tube	42 mm

Tabel 3.1 Ukuran Penukar Panas Tube Dan Kawat

3.6 Spesifikasi Pompa

Pompa Air (Wasser PB – 60 EA)

Type	: Pompa Booster
Tegangan	: 220 V / 50 Hz
Arus Masukan	: 0,5 A
Daya Keluaran	: 60 W
Daya Dorong	: 9 Meter
Kapasitas	: 30 L / min

3.7 Teknik Pengumpulan Data

Untuk melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh jumlah lekukan *tube* dan jumlah susunan kawat secara horizontal pada kondensor terhadap alat penukar panas skala laboratorium, yang diharapkan dapat mendapatkan kapasitas yang baik, dilakukan langkah-langkah percobaan sebagai berikut :

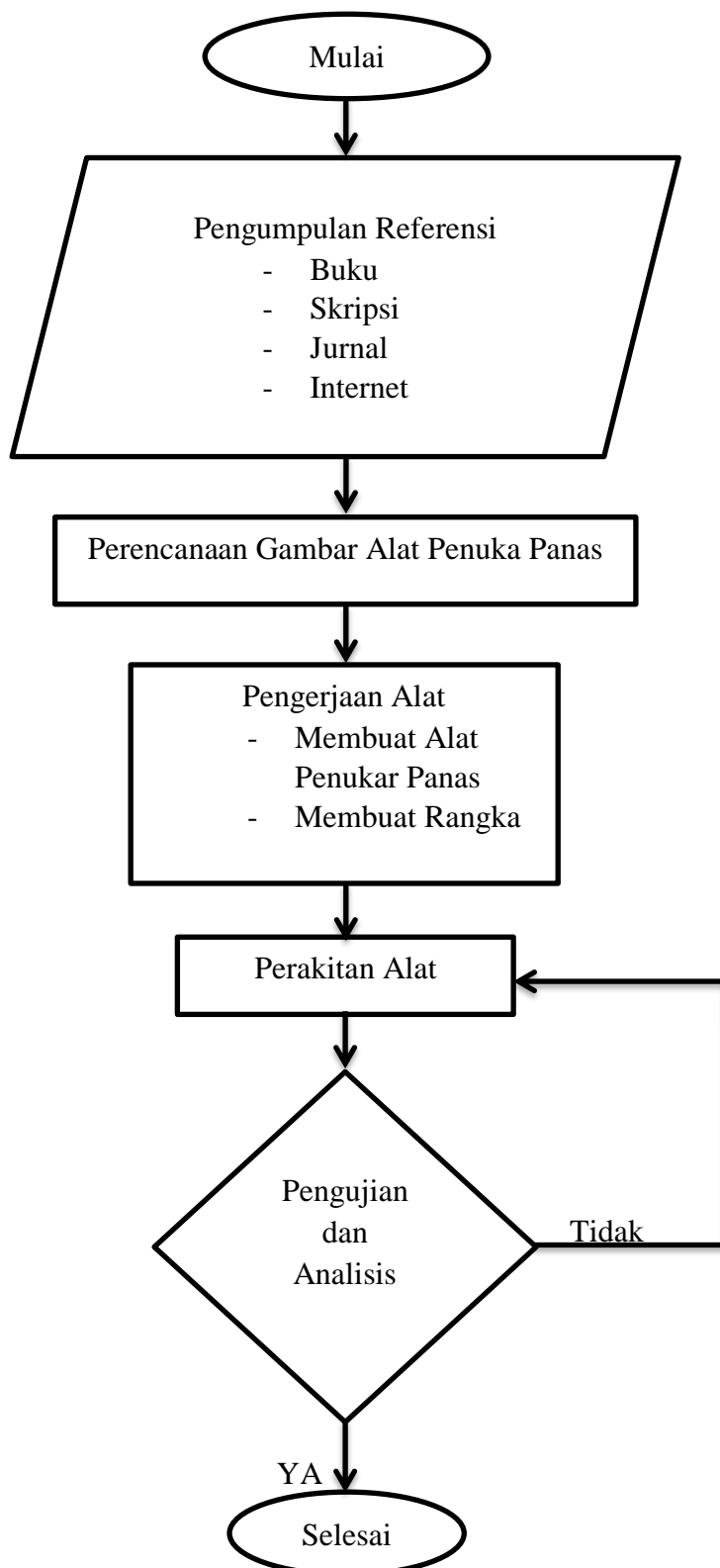
1. Mempersiapkan semua peralatan yang diperlukan termasuk rancangan penukar panas jenis tube dan kawat (kondensor).
2. Memasang peralatan dengan menggunakan penukar panas jenis tube dan kawat (kondensor).
3. Fluida dimasukkan ke dalam tangki thermostatic.
4. Menghidupkan pompa untuk mengalirkan fluida dalam keadaan dingin dengan temperatur tertentu untuk mengecek kebocoran, selanjutnya pompa dimatikan.
5. Memanaskan Fluida dengan menghidupkan pemanas pada tangki thermostatic.
6. Pompa dihidupkan untuk mengalirkan fluida dalam keadaan panas.
7. Mengatur temperatur fluida sebesar 45 °C pada tangki thermostatic untuk memperoleh temperatur fluida masuk penukar panas (T_{in}) tertentu dan menunggu sampai keadaan steady, selanjutnya dilakukan pengambilan data :
Temperatur fluida masuk (T_{in}), temperatur fluida keluar (T_{out}), temperatur kawat rata-rata (T_w), temperatur udara luar (T_{∞}).
8. Melakukan langkah 7 dengan menaikkan temperatur fluida per 5 °C dalam tangki thermostatik untuk memperoleh titik kondisi operasi.

Pengujian dilakukan dengan memvariasikan temperatur fluida masuk dalam rancangan penukar panas. yaitu pada temperatur fluida masuk 40 °C, 45 °C dan 50 °C dan temperatur udara kamar T_{∞} = akan disesuaikan, dengan tekanan 1 atm, pengambilan data dilakukan 5 kali dengan selang waktu 5 menit setiap pengambilan data, hasil rata-rata dari pengambilan data akan disajikan dalam bentuk tabel.

T_{in}	Temperatur 40 °C	Temperatur 45 °C	Temperatur 50 °C
T_{w1}			
T_{w2}			
T_{w3}			
T_{w4}			
T_{w5}			
T_{w6}			
T_{out}			

Tabel 3.2 Hasil Pengambilan Data

3.8 Diagram Alir Penelitian



BAB IV
DATA DAN ANALISIS

4.1 Data Hasil Pengujian

Hasil analisis perpindahan panas pada alat penukar panas jenis kondesor dengan 10 lekukan *tube* dan 65 susunan kawat secara horizontal skala laboratorium yang telah dirancang bangun di Laboratorium Teknik Universitas Muhammadiyah Pontianak, diperoleh beberapa data-data yang didapat. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan temperatur fluida masuk dalam rancangan penukar panas. yaitu pada temperatur fluida masuk 40 °C, 45 °C dan 50 °C dan temperatur udara kamar $T_{\infty} = 31,4$ °C , dengan tekanan 1 atm. pengambilan data dilakukan 5 kali dengan selang waktu 5 menit setiap pengambilan data, berikut adalah hasil dari pengambilan data yang disajikan dalam bentuk tabel.

Tabel 4.1 Pengambilan Data Alat Penukar Panas

T_{in}	Temperatur 40 °C	Temperatur 45 °C	Temperatur 50 °C
T_{w1}	39,6	44,9	48,3
T_{w2}	39,2	42,6	45,3
T_{w3}	38,2	42,4	44,8
T_{w4}	36,1	40,0	41,8
T_{w5}	35,8	39,4	41,3
T_{w6}	35,1	38,3	40,1
T_{out}	33,2	34,9	35

4.2 Perhitungan Data

Data seksi uji penukar panas jenis kondensor dengan 10 lekukan *tube* dan 65 susunan kawat secara horizontal skala laboratorium.

1. Diameter luar tube (dt_0) : 5 mm = 0,005 m
2. Diameter dalam tube (dt_1) : 3 mm = 0,003 m
3. Diameter Kawat (dw) : 1,3 mm = 0,0013 m
4. Jarak antar tube (Pt) : 42 mm = 0,042 m
5. Jarak antar kawat (Pw) : 5 mm = 0,005 m
6. Tinggi/panjang penukar panas (H) : 923 mm = 0,923 m
7. Lebar/panjang tube dari H_E (W) : 450 mm = 0,45 m
8. Jumlah lekukan tube (n_{tube}) : 10 lekukan
9. Jumlah kawat : 65 susunan

4.3 Kondisi Operasi di Temperatur Fluida masuk 40 °C

- \dot{m} = Laju aliran fluida = 0,0526 kg/s
- T_{air} = Temperatur fluida masuk = 40 °C = 313,15 K
- T_{∞} = Temperatur lingkungan = 31,4 °C = 304,55 K
- T_{out} = Temperatur fluida keluar = 33,2 °C = 306,35 K
- T_{t0} = Temperatur tube bagian luar = 0,5 °C (dibawah suhu air)

$$\rho_{air(313,15\text{ K})} = 1.0388$$

4.3.1 Menghitung debit fluida masuk kedalam tube

$$Q = A \cdot v$$

Dimana :

- a. Menghitung debit air (Q_h)

$$Q_h = \frac{v_h}{t}$$

Dimana :

$$\begin{aligned} v_h &= \pi \cdot r_i^2 \cdot l \\ &= \pi \cdot \left(\frac{d_i}{2}\right)^2 \cdot l \\ &= 3,14 \cdot \left(\frac{0,003}{2}\right)^2 \cdot 0,45 \\ &= 0,00000317925 \text{ m}^3 \\ &= 0,00317925 \text{ liter} \end{aligned}$$

Sehingga :

$$Q_h = \frac{0,00317925 \text{ liter}}{60 \text{ detik}}$$

$$= 0,0000529875 \text{ liter/detik}$$

b. Menghitung kecepatan air mengalir

$$v = \frac{Q}{\frac{1}{4} \pi \cdot D^2}$$

$$= \frac{0,0000529875}{\frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 0,003^2}$$

$$= \frac{0,0000529875}{0,000007065}$$

$$= 7,5 \text{ m/s}$$

Sehingga :

$$Q = A \cdot v$$

$$= 0,082 \text{ m}^2 \cdot 7,5 \text{ m/s}$$

$$= 0,615 \text{ m}^2/\text{s}$$

4.3.2 Menghitung laju aliran massa yang masuk ke dalam tube

$$\dot{m} = Q \cdot \rho_{air}$$

Dimana :

$$\dot{m} = A \cdot v \cdot \rho_{air}$$

$$= 0,082 \text{ m}^2 \cdot 7,5 \text{ m/s} \cdot 1,0388 \text{ kg/m}^3$$

$$= 0,638 \text{ kg/s}$$

Sehingga :

$$\dot{m} = Q \cdot \rho_{air}$$

$$= 0,615 \cdot 1,0388$$

$$= 0,638 \text{ kg/s}$$

4.3.3 Mencari nilai properties udara pada suhu $T_{\infty} = 31,4 \text{ }^{\circ}\text{C} = 304,55 \text{ K}$ dan $T_{\text{out}} = 33,2 \text{ }^{\circ}\text{C} = 306,35 \text{ K}$

Dimana :

Density (ρ)

Viskositas Kinematis (ν)

Nilai Bilangan Prandtl (Pr)

Konduktifitas Panas (k)

Difusitas Panas (α)

Panas Spesifik (C_p)

Dynamic Viskosity (μ)

a. Tabel 4.2 interpolasi properties udara pada suhu $T_{\infty} = 304,55 \text{ K}$

T (K)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg.K)	$\mu \cdot 10^7$ (N.s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m.K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /S)	Pr
300	1,1614	1,007	184,6	15,89	26,3	22,5	0,707
304,55	1,0101	1,008	206,0	20,46	29,6	29,2	0,700
350	0,9950	1,009	208,2	20,92	30,0	29,9	0,700

b. Tabel 4.3 interpolasi properties udara pada suhu $T_{\text{out}} = 306,35 \text{ K}$

T (K)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg.K)	$\mu \cdot 10^7$ (N.s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m.K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /S)	Pr
300	1,1614	1,007	184,6	15,89	26,3	22,5	0,707
306,35	1,0736	1,008	205,2	20,28	29,5	28,9	0,700
350	0,9950	1,009	208,2	20,92	30,0	29,9	0,700

4.3.4 Menghitung Bilangan Grisoft (Gr)

$$\begin{aligned}
 Gr &= \frac{g \beta (T_s - T_\infty) H^3}{v^2} \\
 T_s &= \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \\
 &= \frac{40 + 33,2}{2} \\
 &= 36,6 \\
 \beta &= \frac{1}{T_{filan}} \\
 \Rightarrow T_{filan} &= \frac{T_{t,0} + T_\infty}{2} \\
 &= \frac{0,5 + 31,4}{2} = 15,95
 \end{aligned}$$

sehingga :

$$\begin{aligned}
 Gr &= \frac{g \beta (T_s - T_\infty) H^3}{v^2} \\
 &= \frac{9,8 \cdot 15,95 (36,6 - 31,4) 0,923^3}{20,46^2} \\
 &= \frac{156,31 \cdot 5,2 \cdot 0,786}{20,46^2} \\
 &= \frac{638,870}{418,611} \\
 &= 1,526
 \end{aligned}$$

4.3.5 Menghitung Bilangan Rayleigh (R_a)

$$\begin{aligned}
 R_a &= \left(\frac{\beta \rho^2 C_p}{\mu k} \right)_{udara} \\
 R_a &= (T_{t,0} - T_\infty) g H^3 \\
 &= (0,5 - 31,4) \cdot 9,8 \cdot 0,923^3 \\
 &= -30,9 \cdot 9,8 \cdot 0,786 \\
 &= -238,016
 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned}
 R_a &= \left(\frac{\beta \rho^2 C_p}{\mu k} \right)_{udara} \\
 &= \frac{15,95 \cdot 1,0101^2 \cdot 1,008}{206,0 \cdot 29,6} \\
 &= \frac{16,404}{6097,6} \\
 &= 0,002
 \end{aligned}$$

4.3.6 Menghitung nilai bilangan nusselt (Nu)

$$Nu = 0,66 \left(\frac{Ra \times H}{dt,0} \right)^{0,25} x \{ 1 - [1 - 0,45 \left(\frac{dt,0}{H} \right)^{0,25}] x \exp \left(\frac{Sw}{\mu} \right) \}$$

Dimana :

$$\Psi = \left(\frac{28,2}{H} \right)^{0,4} \cdot S_w^{0,9} \cdot S_t^{-1} + \left(\frac{28,2}{H} \right)^{0,8} \left[\frac{264}{Tt,0 - T\infty} \right]^{0,5} S_w^{-1,5} \cdot S_t^{-0,5}$$

$$\begin{aligned} S_t &= \frac{(Pt-dt,0)}{dt,0} \\ &= \frac{(0,042 - 0,005)}{0,005} \\ &= 7,4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_w &= \frac{(Pw-dw)}{dw} \\ &= \frac{(0,005 - 0,0013)}{0,0013} \\ &= 2,85 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} \Psi &= \left(\frac{28,2}{H} \right)^{0,4} \cdot S_w^{0,9} \cdot S_t^{-1} + \left(\frac{28,2}{H} \right)^{0,8} \left[\frac{264}{Tt,0 - T\infty} \right]^{0,5} S_w^{-1,5} \cdot S_t^{-0,5} \\ &= \left(\frac{28,2}{0,923} \right)^{0,4} \cdot 2,85^{0,9} \cdot 7,4^{-1} + \left(\frac{28,2}{0,923} \right)^{0,8} \left[\frac{264}{0,5 - 31,4} \right]^{0,5} 2,85^{-1,5} \cdot 7,4^{-0,5} \\ &= 1,37 + 15,42 \cdot 22,29 \cdot 0,077 \\ &= 27,84 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} Nu &= 0,66 \left(\frac{Ra \times H}{dt,0} \right)^{0,25} x \{ 1 - [1 - 0,45 \left(\frac{dt,0}{H} \right)^{0,25}] x \exp \left(\frac{Sw}{\mu} \right) \} \\ &= 0,66 \left(\frac{0,002 \times 0,923}{0,005} \right)^{0,25} x \{ 1 - [1 - 0,45 \left(\frac{0,005}{0,923} \right)^{0,25}] x 27,84 \left(\frac{2,85}{206,0} \right) \} \\ &= 0,66 \cdot 0,779 x 1 - 0,878 x 0,385 \\ &= 0,514 x 0,661 \\ &= 0,339 \end{aligned}$$

4.3.7 Menghitung Nilai Koefisien Perpindahan Panas (h)

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \\ &= \frac{40 + 33,2}{2} \\ &= 36,6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta T &= (T_s - T_\infty) \\ &= 36,6 - 31,4 \\ &= 5,2 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} h_{konveksi} &= 0,27 \left(\frac{\Delta T}{dt,0} \right)^{0,25} \\ &= 0,27 \cdot \left(\frac{5,2}{0,005} \right)^{0,25} \\ &= 0,27 \cdot 5,678 \\ &= 1,533 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{radiasi} &= \epsilon \sigma \frac{(T_{ex}^4 - T_\infty^4)}{T_{ex} - T_\infty} \\ &= 0,95 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \frac{(0,401^4 - 31,4^4)}{0,401 - 31,4} \\ &= 0,95 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \cdot 31,36 \\ &= 0,00000169 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \end{aligned}$$

ϵ = Emisivitas permukaan rata-rata nilainya (0,95)

σ = Konstanta ($5,67 \times 10^{-8} \text{ w}/\text{m}^2/\text{k}^4$)

$$\begin{aligned} h_o &= h_{konveksi} + h_{radiasi} \\ &= 1,533 + 0,00000169 \\ &= 1,533 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \end{aligned}$$

4.3.8 Menghitung T_{ex} (temperatur permukaan rata-rata dari HE)

Dapat dinyatakan sebagai fungsi dari temperatur permukaan dari tube yaitu $T_{t,0}$ dan temperatur permukaan dari kawat T_w sebagai berikut :

$$T_{ex} = \frac{(A_t T_{t0} + A_w T_w)}{A_0}$$

Dimana :

T_{t0} = temperatur tube bagian luar diasumsi temperaturnya $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ dibawah suhu air

Temperatur kawat

$$\begin{aligned} T_w &= \eta_w (T_{t0} - T_\infty) + T_\infty \\ &= 0,9 (0,5 \cdot 31,4) + 31,4 \\ &= 45,53 \end{aligned}$$

Efisiensi kawat

$$\begin{aligned} \eta_w &= \left(\frac{T_w - T_\infty}{T_{t0} - T_\infty} \right) \\ &= \left(\frac{45,53 - 31,4}{0,5 - 31,4} \right) \\ &= \frac{14,13}{-30,9} = -0,46 \end{aligned}$$

dimana :

$$A_0 = \text{luas area elemen}$$

$$A_0 = A_t + A_w$$

$$\begin{aligned} A_0 &= \pi d_{t0} P_w + 2 \pi d_w P_t \\ &= 3,14 \cdot 0,005 \cdot 0,005 + 2 \cdot 3,14 \cdot 0,0013 \cdot 0,042 \\ &= 0,0000785 + 0,000343 \\ &= 0,0004215 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$T_{ex} = \frac{(T_{t0} + G_p \cdot \eta_w (T_{t0} - T_\infty) + G_p \cdot T_\infty)}{1 + G_p}$$

Dimana :

$$\begin{aligned} G_p &= 2 \left(\frac{P_t}{d_{t0}} \right) \cdot \left(\frac{d_w}{P_w} \right) \\ &= 2 \left(\frac{0,042}{0,005} \right) \cdot \left(\frac{0,0013}{0,005} \right) \\ &= 2 \cdot 8,4 \cdot 0,26 \\ &= 4,368 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} T_{ex} &= \frac{(0,5 + 4,368 \cdot 0,9 (0,5 - 31,4) + 4,38 \cdot 31,4)}{1 + 4,368} \\ &= \frac{(4,868 \cdot 0,9 (-30,9) + 137,532)}{1 + 4,368} \\ &= \frac{2,153}{1 + 4,368} \\ &= 0,401 \end{aligned}$$

4.3.9 Mencari Luasan Penukar Kalor (A)

- a. Menghitung luasan permukaan tube

$$\begin{aligned} A_t &= \pi \cdot d (H_{tube} - \Sigma_{singgungan}) \\ &= 3,14 \cdot 0,005 (0,923 - 0,798) \\ &= 0,0157 \cdot 0,125 \\ &= 0,00196 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

- b. Menghitung luasan permukaan kawat

$$\begin{aligned} A_w &= \pi \cdot d (H_{kawat} - \Sigma_{singgungan}) \times \Sigma_{kawat} \\ &= 3,14 \cdot 0,0013 (0,923 - 0,115) \times 24 \\ &= 0,00408 \cdot 0,808 \cdot 24 \\ &= 0,08 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Total luas penampang

$$\begin{aligned} A &= A_t + A_w \\ &= 0,00196 + 0,08 \\ &= 0,082 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

4.3.10 Menghitung Kapasitas Penukar Panas (Q)

$$\begin{aligned} Q &= h \cdot A \cdot (\Delta T) \\ &= h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \end{aligned}$$

Dimana :

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \\ &= \frac{40 + 33,2}{2} \\ &= 36,6 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} Q &= h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \\ &= 1,533 \cdot 0,082 (36,6 - 31,4) \\ &= 0,125 \cdot 5,2 \\ &= 0,653 \text{ Watt} \end{aligned}$$

4.3.11 Menghitung laju panas berdasar pada T_{out} dari H_E

$$q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Dimana :

$$\begin{aligned} \Delta T &= (T_s - T_\infty) \\ &= 36,6 - 31,4 \\ &= 5,2 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} q &= \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \\ &= 0,638 \cdot 1,008 \cdot 5,2 \\ &= 3,344 \text{ W} \end{aligned}$$

4.3.12 Menghitung panas yang dipindahkan tiap elemen (Q_{elemen})

$$Q_{elemen} = UA_{elemen} (T_{air} - T_\infty)$$

Dimana :

UA_{elemen} ialah $\frac{1}{jumlah}$ resistance yang ada pada elemen ,

$$\frac{1}{UA_{elemen}} = R_i + R_t + R_o$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} R_w + t &= \left(\frac{1}{hiAi} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi \cdot k \cdot pw} \right) + \frac{1}{A0 (hkonveksi+hradiasi)} \\ &= \left(\frac{1}{100 \cdot 0,082} + \frac{\ln(0,0025/0,0015)}{2 \cdot 3,14 \cdot 29,5 \cdot 0,005} \right) + \frac{1}{0,0004215 (1,647+0,00000169)} \\ &= (0,122 + 0,552) + 3907,5 \\ &= 3908,8 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} Q_{elemen} &= UA_{elemen} (T_{air} - T_\infty) \\ &= 3908,8 \cdot (40 - 31,4) \\ &= 33615,68 \end{aligned}$$

4.4 Kondisi Operasi di Temperatur Fluida Masuk 45 °C

\dot{m}	= Laju aliran fluida	= 0,0526 kg/s
T_{air}	= Temperatur fluida masuk	= 45 °C = 318,15 K
T_{∞}	= Temperatur lingkungan	= 31,4 °C = 304,55 K
T_{out}	= Temperatur fluida keluar	= 34,9 °C = 308,04 K
T_{t0}	= Temperatur tube bagian luar	= 0,5 °C (dibawah suhu air)

$$\rho_{\text{air}(318,15\text{ K})} = 1,0554$$

4.4.1 Menghitung debit fluida masuk kedalam tube

$$Q = A \cdot v$$

Dimana :

c. Menghitung debit air (Q_h)

$$Q_h = \frac{v_h}{t}$$

Dimana :

$$\begin{aligned} v_h &= \pi \cdot r_i^2 \cdot l \\ &= \pi \cdot \left(\frac{d_i}{2}\right)^2 \cdot l \\ &= 3,14 \cdot \left(\frac{0,003}{2}\right)^2 \cdot 0,45 \\ &= 0,00000317925 \text{ m}^3 = 0,00317925 \text{ liter} \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} Q_h &= \frac{0,00317925 \text{ liter}}{60 \text{ detik}} \\ &= 0,0000529875 \text{ liter/detik} \end{aligned}$$

d. Menghitung kecepatan air mengalir

$$\begin{aligned} v &= \frac{Q}{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2} \\ &= \frac{0,0000529875}{\frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 0,003^2} \\ &= \frac{0,0000529875}{0,000007065} \\ &= 7,5 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} Q &= A \cdot v \\ &= 0,082 \text{ m}^2 \cdot 7,5 \text{ m/s} \\ &= 0,615 \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

4.4.2 Menghitung laju aliran massa yang masuk ke dalam tube

$$\dot{m} = Q \cdot \rho_{air}$$

Dimana :

$$\begin{aligned}\dot{m} &= A \cdot v \cdot \rho_{air} \\ &= 0,082 \text{ m}^2 \cdot 7,5 \text{ m/s} \cdot 1,0554 \text{ kg/m}^3 \\ &= 0,649 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned}\dot{m} &= Q \cdot \rho_{air} \\ &= 0,615 \cdot 1,0554 \\ &= 0,649 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

4.4.3 Mencari nilai properties udara pada suhu $T_{\infty} = 31,4 \text{ }^{\circ}\text{C} = 304,55 \text{ K}$ dan $T_{out} = 34,9 \text{ }^{\circ}\text{C} = 308,04 \text{ K}$

Dimana :

Density (ρ)

Viskositas Kinematis (ν)

Nilai Bilangan Prandtl (Pr)

Konduktifitas Panas (k)

Difusitas Panas (α)

Panas Spesifik (C_p)

Dynamic Viskosity (μ)

c. Tabel 4.4 interpolasi properties udara pada suhu $T_{\infty} = 304,55 \text{ K}$

T (K)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg.K)	$\mu \cdot 10^7$ (N.s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m.K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /S)	Pr
300	1,1614	1,007	184,6	15,89	26,3	22,5	0,707
304,55	1,0101	1,008	206,0	20,46	29,6	29,2	0,700
350	0,9950	1,009	208,2	20,92	30,0	29,9	0,700

d. Tabel 4.5 interpolasi properties udara pada suhu $T_{out} = 308,04$ K

T (K)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg.K)	$\mu \cdot 10^7$ (N.s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m.K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /S)	Pr
300	1,1614	1,007	184,6	15,89	26,3	22,5	0,707
308,04	1,0945	1,008	204,4	20,11	29,4	28,7	0,701
350	0,9950	1,009	208,2	20,92	30,0	29,9	0,700

4.4.4 Menghitung Bilangan Grisoft (Gr)

$$Gr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) H^3}{\nu^2}$$

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \\ &= \frac{45 + 34,9}{2} \\ &= 39,95 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{1}{T_{filan}} \\ \Rightarrow T_{filan} &= \frac{T_{t,0} + T_\infty}{2} \\ &= \frac{0,5 + 31,4}{2} = 15,95 \end{aligned}$$

sehingga :

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g \beta (T_s - T_\infty) H^3}{\nu^2} \\ &= \frac{9,8 \cdot 15,95 (39,95 - 31,4) 0,923^3}{20,46^2} \\ &= \frac{156,31 \cdot 8,55 \cdot 0,786}{20,46^2} \\ &= \frac{1050,450}{418,611} \\ &= 2,509 \end{aligned}$$

4.4.5 Menghitung Bilangan Rayleigh (R_a)

$$\begin{aligned} R_a &= \left(\frac{\beta \rho^2 C_p}{\mu k} \right)_{udara} \\ R_a &= (T_{t,0} - T_\infty) g H^3 \\ &= (0,5 - 31,4) \cdot 9,8 \cdot 0,923^3 \\ &= -30,9 \cdot 9,8 \cdot 0,786 \\ &= -238,016 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned}
 Ra &= \left(\frac{\beta \rho^2 Cp}{\mu k} \right)_{\text{udara}} \\
 &= \frac{15,95 \cdot 1,0101^2 \cdot 1,008}{206,0 \cdot 29,6} \\
 &= \frac{16,404}{6097,6} \\
 &= 0,002
 \end{aligned}$$

4.4.6 Menghitung nilai bilangan nusselt (Nu)

$$Nu = 0,66 \left(\frac{Ra \times H}{dt,0} \right)^{0,25} \times \{ 1 - [1 - 0,45 \left(\frac{dt,0}{H} \right)^{0,25}] \times \exp \left(\frac{Sw}{\mu} \right) \}$$

Dimana :

$$\Psi = \left(\frac{28,2}{H} \right)^{0,4} \cdot S_w^{0,9} \cdot S_i^{-1} + \left(\frac{28,2}{H} \right)^{0,8} \left[\frac{264}{Tt,0 - T\infty} \right]^{0,5} S_w^{-1,5} \cdot S_i^{-0,5}$$

$$\begin{aligned}
 S_i &= \frac{(Pt - dt,0)}{dt,0} \\
 &= \frac{(0,042 - 0,005)}{0,005} \\
 &= 7,4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_w &= \frac{(Pw - dw)}{dw} \\
 &= \frac{(0,005 - 0,0013)}{0,0013} \\
 &= 2,85
 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned}
 \Psi &= \left(\frac{28,2}{H} \right)^{0,4} \cdot S_w^{0,9} \cdot S_i^{-1} + \left(\frac{28,2}{H} \right)^{0,8} \left[\frac{264}{Tt,0 - T\infty} \right]^{0,5} S_w^{-1,5} \cdot S_i^{-0,5} \\
 &= \left(\frac{28,2}{0,923} \right)^{0,4} \cdot 2,85^{0,9} \cdot 7,4^{-1} + \left(\frac{28,2}{0,923} \right)^{0,8} \left[\frac{264}{0,5 - 31,4} \right]^{0,5} 2,85^{-1,5} \cdot 7,4^{-0,5} \\
 &= 1,37 + 15,42 \cdot 22,29 \cdot 0,077 \\
 &= 27,84
 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned}
 Nu &= 0,66 \left(\frac{Ra \times H}{dt,0} \right)^{0,25} \times \{ 1 - [1 - 0,45 \left(\frac{dt,0}{H} \right)^{0,25}] \times \exp \left(\frac{Sw}{\mu} \right) \} \\
 &= 0,66 \left(\frac{0,002 \times 0,923}{0,005} \right)^{0,25} \times \{ 1 - [1 - 0,45 \left(\frac{0,005}{0,923} \right)^{0,25}] \times 27,84 \left(\frac{2,85}{206,0} \right) \} \\
 &= 0,66 \cdot 0,779 \times 1 - 0,878 \times 0,385 \\
 &= 0,514 \times 0,661 \\
 &= 0,339
 \end{aligned}$$

4.4.7 Menghitung Nilai Koefisien Perpindahan Panas (h)

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \\ &= \frac{45 + 34,9}{2} \\ &= 39,95 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta T &= (T_s - T_\infty) \\ &= 39,95 - 31,4 \\ &= 8,55 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} h_{konveksi} &= 0,27 \left(\frac{\Delta T}{dt,0} \right)^{0,25} \\ &= 0,27 \cdot \left(\frac{8,55}{0,005} \right)^{0,25} \\ &= 0,27 \cdot 6,430 \\ &= 1,736 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{radiasi} &= \epsilon \sigma \frac{(T_{ex}^4 - T_\infty^4)}{T_{ex} - T_\infty} \\ &= 0,95 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \frac{(0,401^4 - 31,4^4)}{0,401 - 31,4} \\ &= 0,95 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \cdot 31,36 \\ &= 0,00000169 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \end{aligned}$$

ϵ = Emisivitas permukaan rata-rata nilainya (0,95)

σ = Konstanta ($5,67 \times 10^{-8} \text{ w}/\text{m}^2/\text{k}^4$)

$$\begin{aligned} h_o &= h_{konveksi} + h_{radiasi} \\ &= 1,736 + 0,00000169 \\ &= 1,736 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \end{aligned}$$

4.4.8 Menghitung T_{ex} (temperatur permukaan rata-rata dari H_E)

Dapat dinyatakan sebagai fungsi dari temperatur permukaan dari tube yaitu $T_{t,0}$ dan temperatur permukaan dari kawat T_w sebagai berikut :

$$T_{ex} = \frac{(A_t T_{t0} + A_w T_w)}{A_0}$$

Dimana :

T_{t0} = temperatur tube bagian luar diasumsi temperaturnya $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ dibawah suhu air

Temperatur kawat

$$\begin{aligned} T_w &= \eta_w (T_{t0} - T_\infty) + T_\infty \\ &= 0,9 (0,5 \cdot 31,4) + 31,4 \\ &= 45,53 \end{aligned}$$

Efisiensi kawat

$$\begin{aligned} \eta_w &= \left(\frac{T_w - T_\infty}{T_{t0} - T_\infty} \right) \\ &= \left(\frac{45,53 - 31,4}{0,5 - 31,4} \right) \\ &= \frac{14,13}{-30,9} = -0,46 \end{aligned}$$

dimana :

$$A_0 = \text{luas area elemen}$$

$$A_0 = A_t + A_w$$

$$\begin{aligned} A_0 &= \pi d_{t0} P_w + 2 \pi d_w P_t \\ &= 3,14 \cdot 0,005 \cdot 0,005 + 2 \cdot 3,14 \cdot 0,0013 \cdot 0,042 \\ &= 0,0000785 + 0,000343 \\ &= 0,0004215 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$T_{ex} = \frac{(T_{t0} + G_p \cdot \eta_w (T_{t0} - T_\infty) + G_p \cdot T_\infty)}{1 + G_p}$$

Dimana :

$$\begin{aligned} G_p &= 2 \left(\frac{P_t}{d_{t0}} \right) \cdot \left(\frac{d_w}{P_w} \right) \\ &= 2 \left(\frac{0,042}{0,005} \right) \cdot \left(\frac{0,0013}{0,005} \right) \\ &= 2 \cdot 8,4 \cdot 0,26 \\ &= 4,368 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} T_{ex} &= \frac{(0,5 + 4,368 \cdot 0,9 (0,5 - 31,4) + 4,38 \cdot 31,4)}{1 + 4,368} \\ &= \frac{(4,868 \cdot 0,9 (-30,9) + 137,532)}{1 + 4,368} \\ &= \frac{2,153}{1 + 4,368} \\ &= 0,401 \end{aligned}$$

4.4.9 Mencari Luasan Penukar Kalor (A)

c. Menghitung luasan permukaan tube

$$\begin{aligned} A_t &= \pi \cdot d (H_{tube} - \Sigma_{singgungan}) \\ &= 3,14 \cdot 0,005 (0,923 - 0,798) \\ &= 0,0157 \cdot 0,125 \\ &= 0,00196 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

d. Menghitung luasan permukaan kawat

$$\begin{aligned} A_w &= \pi \cdot d (H_{kawat} - \Sigma_{singgungan}) \times \Sigma_{kawat} \\ &= 3,14 \cdot 0,0013 (0,923 - 0,115) \times 24 \\ &= 0,00408 \cdot 0,808 \cdot 24 \\ &= 0,08 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Total luas penampang

$$\begin{aligned} A &= A_t + A_w \\ &= 0,00196 + 0,08 \\ &= 0,082 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

4.4.10 Menghitung Kapasitas Penukar Panas (Q)

$$\begin{aligned} Q &= h \cdot A \cdot (\Delta T) \\ &= h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \end{aligned}$$

Dimana :

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \\ &= \frac{45 + 34,9}{2} \\ &= 39,95 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} Q &= h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \\ &= 1,736 \cdot 0,082 (39,95 - 31,4) \\ &= 0,142 \cdot 8,55 \\ &= 1,214 \text{ Watt} \end{aligned}$$

4.4.11 Menghitung laju panas berdasar pada T_{out} dari H_E

$$q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Dimana :

$$\begin{aligned} \Delta T &= (T_s - T_\infty) \\ &= 39,95 - 31,4 \\ &= 8,55 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} q &= \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \\ &= 0,649 \cdot 1,008 \cdot 8,55 \\ &= 5,593 \text{ W} \end{aligned}$$

4.4.12 Menghitung panas yang dipindahkan tiap elemen (Q_{elemen})

$$Q_{elemen} = UA_{elemen} (T_{air} - T_\infty)$$

Dimana :

UA_{elemen} ialah $\frac{1}{jumlah}$ resistance yang ada pada elemen ,

$$\frac{1}{UA_{elemen}} = R_i + R_t + R_o$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} R_w + t &= \left(\frac{1}{hiAi} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi \cdot k \cdot pw} \right) + \frac{1}{A0 (hkonveksi+hradiasi)} \\ &= \left(\frac{1}{100 \cdot 0,082} + \frac{\ln(0,0025/0,0015)}{2 \cdot 3,14 \cdot 29,5 \cdot 0,005} \right) + \frac{1}{0,0004215 (1,647+0,00000169)} \\ &= (0,122 + 0,552) + 3907,5 \\ &= 3908,8 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} Q_{elemen} &= UA_{elemen} (T_{air} - T_\infty) \\ &= 3908,8 \cdot (45 - 31,4) \\ &= 53159,68 \end{aligned}$$

4.5 Kondisi Operasi di Temperatur Fluida Masuk 50 °C

\dot{m}	= Laju aliran fluida	= 0,0526 kg/s
T_{air}	= Temperatur fluida masuk	= 50 °C = 323,15 K
T_{∞}	= Temperatur lingkungan	= 31,4 °C = 304,55 K
T_{out}	= Temperatur fluida keluar	= 35 °C = 308,15 K
T_{t0}	= Temperatur tube bagian luar	= 0,5 °C (dibawah suhu air)

$$\rho_{\text{air}(323,15 \text{ K})} = 1.0720$$

4.5.1 Menghitung debit fluida masuk kedalam tube

$$Q = A \cdot v$$

Dimana :

e. Menghitung debit air (Q_h)

$$Q_h = \frac{vh}{t}$$

Dimana :

$$\begin{aligned} v_h &= \pi \cdot r_i^2 \cdot l \\ &= \pi \cdot \left(\frac{d_i}{2}\right)^2 \cdot l \\ &= 3,14 \cdot \left(\frac{0,003}{2}\right)^2 \cdot 0,45 \\ &= 0,00000317925 \text{ m}^3 \\ &= 0,00317925 \text{ liter} \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} Q_h &= \frac{0,00317925 \text{ liter}}{60 \text{ detik}} \\ &= 0,0000529875 \text{ liter/detik} \end{aligned}$$

f. Menghitung kecepatan air mengalir

$$\begin{aligned} v &= \frac{Q}{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2} \\ &= \frac{0,0000529875}{\frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 0,003^2} \\ &= \frac{0,0000529875}{0,000007065} \\ &= 7,5 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} Q &= A \cdot v \\ &= 0,082 \text{ m}^2 \cdot 7,5 \text{ m/s} \\ &= 0,615 \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

4.5.2 Menghitung laju aliran massa yang masuk ke dalam tube

$$\dot{m} = Q \cdot \rho_{air}$$

Dimana :

$$\begin{aligned} \dot{m} &= A \cdot v \cdot \rho_{air} \\ &= 0,082 \text{ m}^2 \cdot 7,5 \text{ m/s} \cdot 1,0720 \text{ kg/m}^3 \\ &= 0,659 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} \dot{m} &= Q \cdot \rho_{air} \\ &= 0,615 \cdot 1,0720 \\ &= 0,659 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

4.5.3 Mencari nilai properties udara pada suhu $T_{\infty} = 31,4 \text{ }^{\circ}\text{C} = 304,55 \text{ K}$ dan $T_{out} = 35 \text{ }^{\circ}\text{C} = 308,15 \text{ K}$

Dimana :

Density (ρ)

Viskositas Kinematis (ν)

Nilai Bilangan Prandtl (Pr)

Konduktifitas Panas (k)

Difusitas Panas (α)

Panas Spesifik (C_p)

Dynamic Viskosity (μ)

e. Tabel 4.6 interpolasi properties udara pada suhu $T_{\infty} = 304,55 \text{ K}$

T (K)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg.K)	$\mu \cdot 10^7$ (N.s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m.K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /S)	Pr
300	1,1614	1,007	184,6	15,89	26,3	22,5	0,707
304,55	1,0101	1,008	206,0	20,46	29,6	29,2	0,700
350	0,9950	1,009	208,2	20,92	30,0	29,9	0,700

f. Tabel 4.7 interpolasi properties udara pada suhu $T_{out} = 308,15$ K

T (K)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg.K)	$\mu \cdot 10^7$ (N.s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m.K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /S)	Pr
300	1,1614	1,007	184,6	15,89	26,3	22,5	0,707
308,15	1,0221	1,008	204,4	20,10	29,4	28,7	0,701
350	0,9950	1,009	208,2	20,92	30,0	29,9	0,700

4.5.4 Menghitung Bilangan Grisoft (Gr)

$$Gr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) H^3}{\nu^2}$$

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \\ &= \frac{50 + 35}{2} \\ &= 42,5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{1}{T_{filan}} \\ \Rightarrow T_{filan} &= \frac{T_{t,0} + T_\infty}{2} \\ &= \frac{0,5 + 31,4}{2} = 15,95 \end{aligned}$$

sehingga :

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g \beta (T_s - T_\infty) H^3}{\nu^2} \\ &= \frac{9,8 \cdot 15,95 (42,5 - 31,4) 0,923^3}{20,46^2} \\ &= \frac{156,31 \cdot 11,1 \cdot 0,786}{20,46^2} \\ &= \frac{1363,742}{418,611} \\ &= 3,257 \end{aligned}$$

4.5.5 Menghitung Bilangan Rayleigh (R_a)

$$\begin{aligned} R_a &= \left(\frac{\beta \rho^2 C_p}{\mu k} \right)_{udara} \\ R_a &= (T_{t,0} - T_\infty) g H^3 \\ &= (0,5 - 31,4) \cdot 9,8 \cdot 0,923^3 \\ &= -30,9 \cdot 9,8 \cdot 0,786 \\ &= -238,016 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned}
 Ra &= \left(\frac{\beta \rho^2 Cp}{\mu k} \right)_{\text{udara}} \\
 &= \frac{15,95 \cdot 1,0101^2 \cdot 1,008}{206,0 \cdot 29,6} \\
 &= \frac{16,404}{6097,6} \\
 &= 0,002
 \end{aligned}$$

4.5.6 Menghitung nilai bilangan nusselt (Nu)

$$Nu = 0,66 \left(\frac{Ra \times H}{dt,0} \right)^{0,25} \times \{ 1 - [1 - 0,45 \left(\frac{dt,0}{H} \right)^{0,25}] \times \exp \left(\frac{Sw}{\mu} \right) \}$$

Dimana :

$$\Psi = \left(\frac{28,2}{H} \right)^{0,4} \cdot S_w^{0,9} \cdot S_i^{-1} + \left(\frac{28,2}{H} \right)^{0,8} \left[\frac{264}{Tt,0 - T\infty} \right]^{0,5} S_w^{-1,5} \cdot S_i^{-0,5}$$

$$\begin{aligned}
 S_i &= \frac{(Pt - dt,0)}{dt,0} \\
 &= \frac{(0,042 - 0,005)}{0,005} \\
 &= 7,4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_w &= \frac{(Pw - dw)}{dw} \\
 &= \frac{(0,005 - 0,0013)}{0,0013} \\
 &= 2,85
 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned}
 \Psi &= \left(\frac{28,2}{H} \right)^{0,4} \cdot S_w^{0,9} \cdot S_i^{-1} + \left(\frac{28,2}{H} \right)^{0,8} \left[\frac{264}{Tt,0 - T\infty} \right]^{0,5} S_w^{-1,5} \cdot S_i^{-0,5} \\
 &= \left(\frac{28,2}{0,923} \right)^{0,4} \cdot 2,85^{0,9} \cdot 7,4^{-1} + \left(\frac{28,2}{0,923} \right)^{0,8} \left[\frac{264}{0,5 - 31,4} \right]^{0,5} 2,85^{-1,5} \cdot 7,4^{-0,5} \\
 &= 1,37 + 15,42 \cdot 22,29 \cdot 0,077 \\
 &= 27,84
 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned}
 Nu &= 0,66 \left(\frac{Ra \times H}{dt,0} \right)^{0,25} \times \{ 1 - [1 - 0,45 \left(\frac{dt,0}{H} \right)^{0,25}] \times \exp \left(\frac{Sw}{\mu} \right) \} \\
 &= 0,66 \left(\frac{0,002 \times 0,923}{0,005} \right)^{0,25} \times \{ 1 - [1 - 0,45 \left(\frac{0,005}{0,923} \right)^{0,25}] \times 27,84 \left(\frac{2,85}{206,0} \right) \} \\
 &= 0,66 \cdot 0,779 \times 1 - 0,878 \times 0,385 \\
 &= 0,514 \times 0,661 \\
 &= 0,339
 \end{aligned}$$

4.5.7 Menghitung Nilai Koefisien Perpindahan Panas (h)

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \\ &= \frac{50 + 35}{2} \\ &= 42,5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta T &= (T_s - T_\infty) \\ &= 42,5 - 31,4 \\ &= 11,1 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} h_{konveksi} &= 0,27 \left(\frac{\Delta T}{dt,0} \right)^{0,25} \\ &= 0,27 \cdot \left(\frac{11,1}{0,005} \right)^{0,25} \\ &= 0,27 \cdot 6,864 \\ &= 1,853 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{radiasi} &= \epsilon \sigma \frac{(T_{ex}^4 - T_\infty^4)}{T_{ex} - T_\infty} \\ &= 0,95 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \frac{(0,401^4 - 31,4^4)}{0,401 - 31,4} \\ &= 0,95 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \cdot 31,36 \\ &= 0,00000169 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \end{aligned}$$

ϵ = Emisivitas permukaan rata-rata nilainya (0,95)

σ = Konstanta ($5,67 \times 10^{-8} \text{ w}/\text{m}^2/\text{k}^4$)

$$\begin{aligned} h_o &= h_{konveksi} + h_{radiasi} \\ &= 1,853 + 0,00000169 \\ &= 1,853 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \end{aligned}$$

4.5.8 Menghitung T_{ex} (temperatur permukaan rata-rata dari H_E)

Dapat dinyatakan sebagai fungsi dari temperatur permukaan dari tube yaitu $T_{t,0}$ dan temperatur permukaan dari kawat T_w sebagai berikut :

$$T_{ex} = \frac{(A_t T_{t0} + A_w T_w)}{A_0}$$

Dimana :

T_{t0} = temperatur tube bagian luar diasumsi temperaturnya $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ dibawah suhu air

Temperatur kawat

$$\begin{aligned} T_w &= \eta_w (T_{t0} - T_\infty) + T_\infty \\ &= 0,9 (0,5 \cdot 31,4) + 31,4 \\ &= 45,53 \end{aligned}$$

Efisiensi kawat

$$\begin{aligned} \eta_w &= \left(\frac{T_w - T_\infty}{T_{t0} - T_\infty} \right) \\ &= \left(\frac{45,53 - 31,4}{0,5 - 31,4} \right) \\ &= \frac{14,13}{-30,9} = -0,46 \end{aligned}$$

dimana :

A_0 = luas area elemen

A_0 = $A_t + A_w$

$$\begin{aligned} A_0 &= \pi d_{t0} P_w + 2 \pi d_w P_t \\ &= 3,14 \cdot 0,005 \cdot 0,005 + 2 \cdot 3,14 \cdot 0,0013 \cdot 0,042 \\ &= 0,0000785 + 0,000343 \\ &= 0,0004215 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$T_{ex} = \frac{(T_{t0} + G_p \cdot \eta_w (T_{t0} - T_\infty) + G_p \cdot T_\infty)}{1 + G_p}$$

Dimana :

$$\begin{aligned} G_p &= 2 \left(\frac{P_t}{d_{t0}} \right) \cdot \left(\frac{d_w}{P_w} \right) \\ &= 2 \left(\frac{0,042}{0,005} \right) \cdot \left(\frac{0,0013}{0,005} \right) \\ &= 2 \cdot 8,4 \cdot 0,26 \\ &= 4,368 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} T_{ex} &= \frac{(0,5 + 4,368 \cdot 0,9 (0,5 - 31,4) + 4,38 \cdot 31,4)}{1 + 4,368} \\ &= \frac{(4,868 \cdot 0,9 (-30,9) + 137,532)}{1 + 4,368} \\ &= \frac{2,153}{1 + 4,368} \\ &= 0,401 \end{aligned}$$

4.5.9 Mencari Luasan Penukar Kalor (A)

e. Menghitung luasan permukaan tube

$$\begin{aligned} A_t &= \pi \cdot d (H_{tube} - \Sigma_{singgungan}) \\ &= 3,14 \cdot 0,005 (0,923 - 0,798) \\ &= 0,0157 \cdot 0,125 \\ &= 0,00196 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

f. Menghitung luasan permukaan kawat

$$\begin{aligned} A_w &= \pi \cdot d (H_{kawat} - \Sigma_{singgungan}) \times \Sigma_{kawat} \\ &= 3,14 \cdot 0,0013 (0,923 - 0,115) \times 24 \\ &= 0,00408 \cdot 0,808 \cdot 24 \\ &= 0,08 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Total luas penampang

$$\begin{aligned} A &= A_t + A_w \\ &= 0,00196 + 0,08 \\ &= 0,082 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

4.5.10 Menghitung Kapasitas Penukar Panas (Q)

$$\begin{aligned} Q &= h \cdot A \cdot (\Delta T) \\ &= h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \end{aligned}$$

Dimana :

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \\ &= \frac{50 + 35}{2} \\ &= 42,5 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} Q &= h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \\ &= 1,853 \cdot 0,082 (42,5 - 31,4) \\ &= 0,151 \cdot 11,1 \\ &= 1,686 \text{ Watt} \end{aligned}$$

4.5.11 Menghitung laju panas berdasar pada T_{out} dari H_E

$$q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Dimana :

$$\begin{aligned} \Delta T &= (T_s - T_\infty) \\ &= 42,5 - 31,4 \\ &= 11,1 \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} q &= \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \\ &= 0,659 \cdot 1,008 \cdot 11,1 \\ &= 7,373 \text{ W} \end{aligned}$$

4.5.12 Menghitung panas yang dipindahkan tiap elemen (Q_{elemen})

$$Q_{elemen} = UA_{elemen} (T_{air} - T_\infty)$$

Dimana :

UA_{elemen} ialah $\frac{1}{jumlah}$ resistance yang ada pada elemen ,

$$\frac{1}{UA_{elemen}} = R_i + R_t + R_o$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} R_w + t &= \left(\frac{1}{hiAi} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi \cdot k \cdot pw} \right) + \frac{1}{A0 (hkonveksi+hradiasi)} \\ &= \left(\frac{1}{100 \cdot 0,082} + \frac{\ln(0,0025/0,0015)}{2 \cdot 3,14 \cdot 29,5 \cdot 0,005} \right) + \frac{1}{0,0004215 (1,647+0,00000169)} \\ &= (0,122 + 0,552) + 3907,5 \\ &= 3908,8 \end{aligned}$$

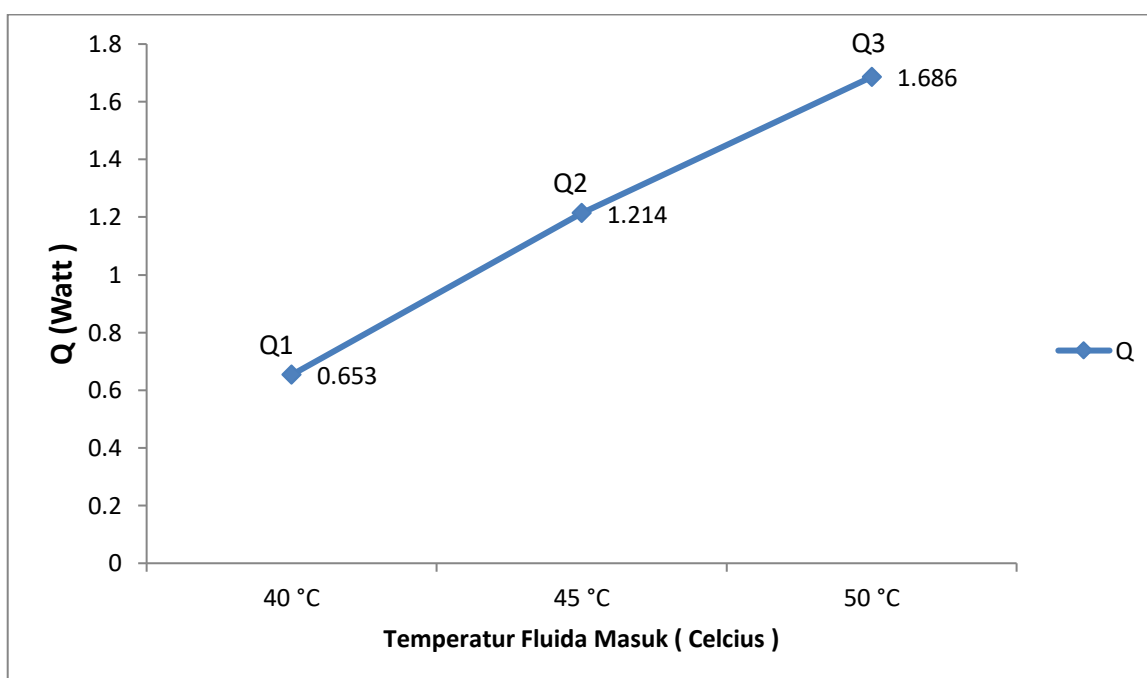
Sehingga :

$$\begin{aligned} Q_{elemen} &= UA_{elemen} (T_{air} - T_\infty) \\ &= 3908,8 \cdot (50 - 31,4) \\ &= 72703,68 \end{aligned}$$

4.6 Menghitung Q Total

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{total}} &= \sum Q_{\text{elemen}} \\
 &= 33615,68 + 53159,68 + 72703,68 \\
 &= 159479,04 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

4.7 Pembahasan



Gambar 4.1 Grafik Hubungan Jumlah Kawat Dan Jumlah Tube Terhadap Q_{total} dengan 65 Susunan Kawat Dan 10 Lekukan Tube Terhadap Q_{Total}

Berdasarkan grafik diatas, terlihat jika semakin tinggi temperatur fluida masuk, maka nilai Q semakin besar. Pada awalnya temperatur fluida masuk ditentukan sebesar 40 °C, ternyata menghasilkan nilai Q_1 sebesar 0,653 watt, kemudian temperatur fluida masuk dinaikkan 5 °C menjadi 45 °C menghasilkan nilai Q_2 sebesar 1,214 watt. Terakhir temperatur fluida masuk dinaikkan lagi sebesar 5 °C menjadi 50 °C ternyata menghasilkan nilai Q_3 yang paling tinggi yaitu sebesar 1,686 watt.

Hal ini terjadi karena pada temperatur fluida masuk yang bersuhu tinggi yaitu 50 °C terjadi proses pertukaran panas dengan temperatur udara luar dengan perbedaan suhu yang cukup besar, sehingga terjadinya proses pertukaran panas

antara temperatur fluida masuk dengan temperatur udara luar akan lebih baik. Sedangkan pada temperatur 40 °C, proses pertukaran panas antara temperatur fluida masuk dengan temperatur udara luar terjadi kurang maksimal, disebabkan karena selisih perbedaan temperatur fluida masuk 40°C dengan temperatur udara luar lebih kecil. Hal ini sesuai dengan aplikasi rumus $Q = h.A.(\Delta T)$ dimana dengan meningkatnya temperatur fluida masuk maka perbedaan temperatur (ΔT) akan semakin besar sehingga kapasitas penukar panas akan semakin tinggi.