

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Djambiar dkk (2013) membuat desain pemanas bagian uji HeaTING-02 yang merupakan komponen dari alat uji BETA yang berfungsi sebagai media pemanas pada eksperimen perpindahan panas aliran dua fasa dalam celah sempit. Dalam perancangannya panas *heater* disuplai oleh arus listrik AC dengan sumber tegangan 0 hingga 220 Volt dengan daya maksimal yang disuplai tidak lebih dari 25 kVA.

Hasil perancangan Djambiar dkk (2013), dari perhitungan diperoleh alat uji BETA HeaTING-02 menggunakan kawat super khantal (FeCuAl) yang digulung membentuk spiral dengan diameter lingkaran 20mm yang dapat bekerja hingga temperatur 1600 C dengan diameter 2mm dan panjang kawat 3770 mm. Voltage regulator digunakan sebagai media untuk menyuplay daya kawat pemanas, sedangkan dudukan *heater* digunakan batu tahan api berbentuk parit.

Kusuma (2013) melakukan penelitian mengenai analisa fluks kalor kritis pada perubahan suhu plat dan laju aliran air pendingin untuk kasus pemanasan ganda di celah sempit rektanguler dengan jarak antara plat utama dan plat penutup ditetapkan 1 mm . Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh hubungan fluks kalor kritis dan koefisien perpindahan kalor terhadap perubahan suhu pelat dan laju aliran air pendingin untuk kasus pemanasan-ganda di celah sempit rektanguler dimana dilakukan dengan metode eksperimental dimana alat uji yang digunakan HeaTING -02. Pemanasan dilakukan menggunakan *heater*, kemudian didinginkan dengan air pendingin. Pemanasan terjadi secara radiasi oleh keramik *heater* dengan daya maksimal adalah 10302 Watt pada tegangan 220 Volt yang diatur melalui *voltage regulator* dengan daya maksimal 2500 watt.

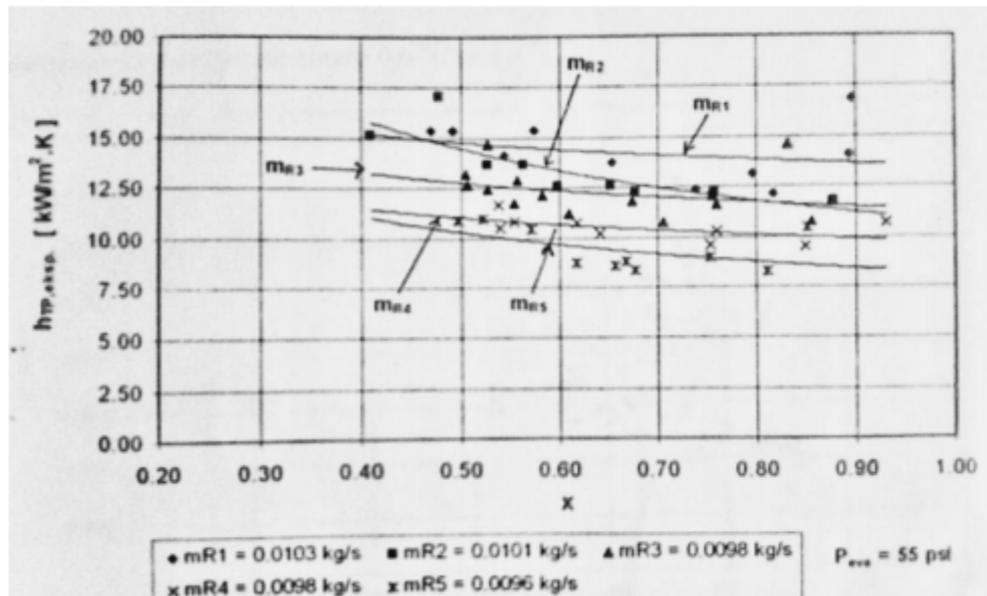
Tabel 2.1 Hasil pengolahan data analisa fluks kalor kritis terhadap berbagai variasi temperatur dan laju aliran air (Kusuma, 2013)

No	Suhu, T (°C)	Laju aliran air pendingin, Q (liter/detik)	Fluks kalor kritis (kW/m ²)	Koefisien perpindahan kalor, h (kW/(m ² .°C))
1.	200	0,1	300,82	2,72
2.		0,2	340,82	3,50
3.		0,3	446,24	4,24
4.	400	0,1	333,86	2,29
5.		0,2	503,64	3,59
6.		0,3	710,55	3,61
7.	600	0,1	705,04	2,25
8.		0,2	899,38	3,38
9.		0,3	914,72	3,86

Hasil penelitian menunjukkan pada nilai suhu pelat panas yang sama, semakin besar laju aliran air pendingin maka akan menghasilkan nilai koefisien perpindahan kalor yang semakin besar pula. Hal ini menunjukkan bahwa laju aliran air pendingin dan suhu pelat panas memiliki berpengaruh secara signifikan pada nilai fluks kalor kritis dan koefisien perpindahan kalor yang dihasilkan pada proses *quenching* celah sempit rektangular dengan kasus pemanasan ganda.

Santoso (2003) melakukan pengukuran Koefisien perpindahan kalor evaporasi Petrozon Rossy 12 di dalam saluran halus mendarat dengan variasi parameter seperti laju aliran massa refrigeran, tekanan evaporasi, dan kualitas uap. Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sistem kompresi uap yang dimodifikasi. Untuk memvariasi kualitas uap menggunakan *heater* dengan pipa tembaga dinding tebal $\frac{3}{4}$ Inch panjang 1,2 m. Elemen pemanas menggunakan kawat nikelin. Isolasi *heater* dengan gips, pita asbes, glasswool, dan aluminium foil.

Hasil penelitian Santoso (2003) didapat grafik dan persamaan korelasi. Hasil penelitian menunjukkan dengan naiknya kualitas, fluks kalor dan koefisien perpindahan kalor evaporasi cenderung turun untuk laju aliran massa refrigeran yang sama. Hubungan antara koefisien evaporasi dengan kualitas pada tekanan 55 psi dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Hubungan kualitas uap terhadap koefisien evaporasi pada tekanan evaporasi 55 psi (Santosa, 2003)

Cholil (2015) melakukan analisa perubahan fasa refrigeran R-134a dengan *heat fluks* konstan pada evaporator. Penelitian ini bertujuan untuk mengamati kecepatan perubahan fasa refrigeran pada evaporator ketika diberikan *heat fluks* serta pengaruhnya terhadap panjang pipa evaporator. *Heat fluks* diberikan dengan menggunakan coil pemanas yang diletakan dalam media air pendingin pada evaporator.

Penentuan panjang efisien pipa evaporator (L) dilakukan dengan cara eksperimental sedangkan temperatur maksimum permukaan pipa evaporator dilakukan dengan cara perhitungan dengan mengetahui diameter pipa evaporator adalah 0,005 m sedangkan temperatur rata-rata sisi masuk dan keluar evaporatore adalah 10 C pada *heat fluks* permukaan adalah 350 W/m^2 .

Penelitian Cholil (2015) menunjukkan semakin besar *heat fluks* yang diberikan, maka semakin awal pula perubahan fasa yang terjadi dan akan berakhir lebih cepat yang berimbas pada berkurangnya kebutuhan pangjang pipa evaporator. Temperatur maksimum permukaan yang terjadi adalah 104,02 C dan pada (L) 10,8 m.

2.2. Dasar Teori

2.2.1 Pemanas Listrik

Pemanas listrik adalah salah satu peralatan yang banyak digunakan di kehidupan sehari-hari, prinsip kerjanya adalah dengan menggunakan suatu elemen pemanas yang dialiri oleh arus listrik. Kemudian, energi listrik dirubah menjadi energi panas yang terjadi pada elemen pemanas. Panas yang timbul disebabkan karena material elemen pemanas terbuat dari logam yang memiliki resistansi yang tinggi.

Pemanas listrik ini banyak digunakan pada peralatan rumah tangga seperti setrika, kompor listrik, pemanas air dan lain-lain. Selain itu, pemanas listrik juga banyak digunakan pada kebutuhan industri, seperti pada industri plastik yang memanfaatkan *electric heater* sebagai elemen pemanas untuk memanaskan barrel sehingga terjadilah pencairan plastik didalamnya. Jenis pemanas listrik banyak digunakan karena pertimbangan pada instalasi yang lebih mudah serta lebih praktis namun memiliki kekurangan yaitu konsumsi daya listrik yang cukup besar sehingga biaya operasinya cukup tinggi seperti ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Berbagai jenis *heater* (Suryana, 2012)

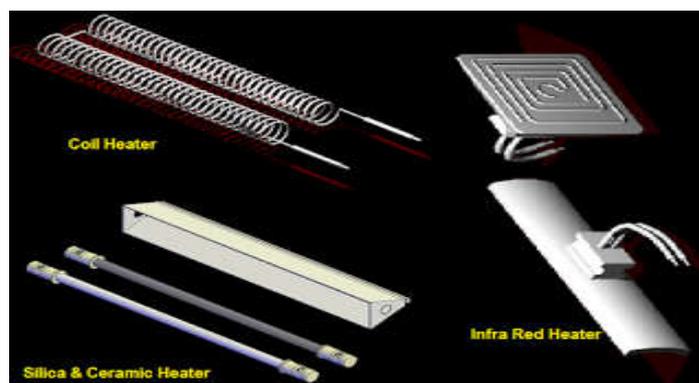
Dalam penggunaannya elemen pemanas harus dapat memenuhi persyaratan sebagai berikut:

- a. Harus tahan lama pada temperatur kerja yang dikehendaki.
- b. Kawat pemanas harus memiliki sifat mekanis yang baik ketika diberi beban mekanis pada saat bekerja pada temperatur yang dikehendaki
- c. Koefisien muai harus kecil untuk meminimalkan terjadinya perubahan bentuk pada elemen pemanas.
- d. Koefisien suhunya harus kecil sehingga sehingga arus kerjanya lebih konstan.
- e. Harus memiliki tahanan jenis yang tinggi.

Dilihat dari bentuknya pemanas listrik terdiri dari dua macam yaitu:

1. Elemen pemanas bentuk dasar

Elemen pemanas bentuk dasar pada umumnya, *Resistance wire* pada elemen pemanas ini hanya dilapisi oleh isolator listrik saja (Ariffudin, 2014). Jenis-jenis pemanas listrik dengan bentuk dasar adalah *silica* dan *quartz heater*, *ceramic heater*, *black body ceramic heater*, dan *bank channel heater* seperti ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Elemen pemanas bentuk dasar (Anonim 1, 2015)

a. Quartz Heater

Quartz Heater adalah elemen pemanas yang terbuat dari *Translucent Tube* atau pipa tembus cahaya seperti ditunjukkan pada gambar 2.4. *Ceramic tube* terpasang pada bagian dalam agar pemanas tahan terhadap temperatur tinggi

sebagai penyangga element *coil*. *Heater* jenis ini sangat efektif digunakan pada untuk memanaskan material dengan tingkat korosi tinggi. Elemen ini tidak dapat digunakan pada *hydrofluoric acid* atau *alkaline solutions* (Suryana, 2012).



Gambar 2.4 *Quartz heater* (Suryana, 2012)

b. *Ceramic Heater*

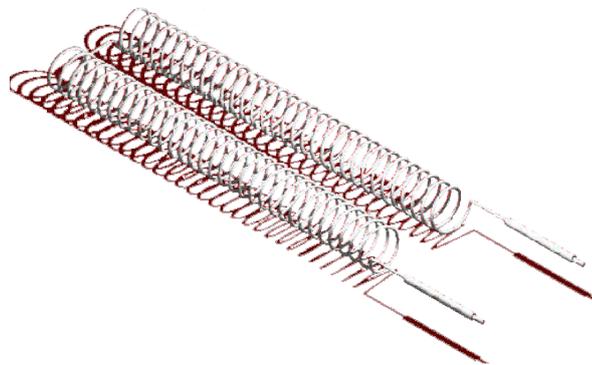
Ceramic heater adalah pemanas dengan suatu wadah pemanas dimana panas dihasilkan dengan melewati listrik melalui kawat pemanas yang terpasang didalam piringan keramik seperti ditunjukkan pada gambar 2.5. *Ceramic Heater* memiliki kelebihan yaitu bersifat *portable* dan sering digunakan untuk pemanasan ruangan kecil dan mirip dengan logam kumparan pemanas pada kipas.



Gambar 2.5 *Ceramic heater* (Suryana, 2012)

c. *Coil heater*

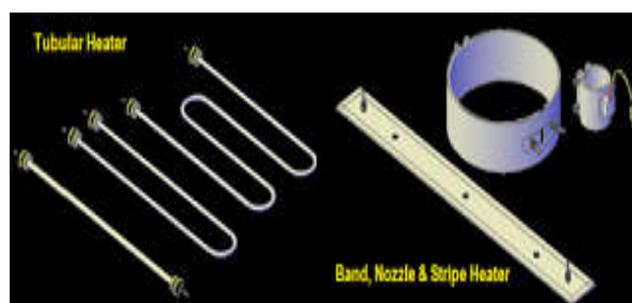
Coil heater adalah elemen pemanas yang berbentuk seperti pegas yang tidak diberi selongsong atau isolator yang biasanya digunakan untuk memanaskan udara lingkungan, pada pemasangannya *heater* ini menggunakan pegangan dengan bahan isolator listrik dan memiliki ketahanan panas yang tinggi seperti keramik seperti ditunjukkan pada gambar 2.6. *Coil heater* cocok untuk memanaskan medium yang tidak langsung mengenai elemen pemanas seperti oven dan kompor listrik (Ariffudin, 2014).



Gambar 2.6 *Coil heater* (Ariffudin,2014)

2. Elemen pemanas bentuk lanjut

Elemen pemanas bentuk lanjut seperti ditunjukkan pada gambar 2.7 merupakan modifikasi dari elemen pemanas bentuk dasar yang dilapisi oleh lembaran plat logam atau pipa sebagai penyesuaian terhadap penggunaan dari elemen pemanas tersebut (Ariffudin, 2014). Logam yang sering digunakan adalah: *mild stell*, *stainless stell*, kuningan dan tembaga. Yang termasuk kedalam jenis *heater* ini adalah *Tubuler heater*, *catridge heater band*, *nozzle heater* dan *stripe heater*.



Gambar 2.7 Elemen pemanas bentuk lanjut (Anonim 2, 2015)

a. *Tubular heater*

Tubular heater adalah elemen pemanas listrik yang terbuat dari pipa dan merupakan bentuk dasar dari elemen pemanas bentuk lain seperti ditunjukkan pada gambar 2.8. Jenis-jenis bahan pipa atau *tube* biasanya disesuaikan oleh penggunaan *heater* (Suryana, 2012).



Gambar 2.8 *Tubular heater spiral* (Anonim 3, tanpa tahun)

Pada umumnya bahan pipa atau *tube* yang digunakan adalah :

1. Stainless stell 304
2. Stainless stell 316
3. Incoloy
4. Titanium
5. Tembaga

Suhu kerja maksimal dari heater ini ± 1300 C dengan isolator tahan panas yang digunakan adalah bubuk Mgo yang memiliki titik cair 290 C (Suryana, 2012).

b. *Strip heater*

Strip heater adalah penghantar sumber panas yang memiliki kelebihan serbaguna karena pada pemakaiannya secara ideal dapat disesuaikan untuk

kontak langsung pada objek yang dipanaskan atau untuk menyebarkan panas ke daerah yang diinginkan secara merata seperti ditunjukkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 *Mica Strip Heaters* dengan *Wire Connection* (Anonim 4, tanpa tahun)

c. *Cartridge Heater*

Cartridge heater Adalah *heater* yang secara umum digunakan untuk memanaskan *block of metal* seperti pada *dies injection moulding* yang terpasang pada bagian *drilled holes* seperti ditunjukkan pada gambar 2.10. Pada instalasinya dibuat lurus dan memiliki diameter yang lebih kecil dari diameter *drilled holes* dengan toleransi $\pm 0,02\text{mm}$. Hal ini adalah salah satu faktor utama yang mempengaruhi *lifetime heater*, selain faktor *watt density* dan faktor operating temperaturnya. Maksimum temperatur pengoperasiannya 250 C.



Gambar 2.10 *Cartridge heater* (Suryana, 2012)

d. *Band dan nozzle heater*

Band dan nozzle heater pada umumnya memiliki diameter standar minimal 55mm hingga ukuran tak terhingga dengan konstruksi yang bisa dibuat menjadi 1 atau 2 bagian. *Band heater* dengan konstruksi 2 bagian, disarankan agar dibuat dengan diameter $\geq 100\text{mm}$ karena untuk mendapatkan pemanasan yang merata seperti ditunjukkan pada gambar 2.11. Material yang digunakan adalah *Stainless steel* dan kuningan *Galvanis*. Temperatur kerjanya $\pm 250\text{ C}$. Banyak digunakan pada dunia industri seperti pada: *Plastik Injections, Extrusion Barrels dan Nozzle Blow Moulders, Pipe, Holding Tanks, Drums*, dan bermacam-macam permukaan silinder yang ingin dipanaskan.



Gambar 2.11 *Band heater dan nozzle heater* (Suryana, 2012)

e. *Finned heater*

Finned heater adalah pengembangan dari elemen pemanas yang dasar perancangannya dari *tubular heater* seperti ditunjukkan pada gambar 2.12. *Heater* ini dibuat dengan memberikan sirip yang terbuat dari *stainless steel*, ukuran lebar sirip sebesar 10 mm, sehingga diameter *heater* menjadi 31,75 mm (Dengan diameter Pipa Standar USM 11,2 mm). *Finned heater* memiliki berbagai bentuk berdasarkan kebutuhan dan penggunaannya.



Gambar 2.12 *Finned heater* (Suryana, 2012)

f. *Cast in heater*

Cast in heater adalah elemen pemanas dari tubular *heater* yang dikembangkan menjadi bentuk elemen *band* atau *strip* melalui proses penuangan logam (besi, kuningan, atau alumunium) seperti ditunjukkan pada gambar 2.13. *Heater* ini adalah salah satu bentuk pengembangan elemen pemanas, yang penggunaan dan proses instalasinya sama dengan pada *Band* dan *Strip heater*. Namun *heater* ini memiliki beberapa keunggulan yang tidak dimiliki oleh *Band* dan *Strip heater* salah satunya adalah memiliki konstruksinya yang lebih kokoh.



Gambar 2.13 *Cast in Brass* dan *Cast in Alumunium Heater*
(Anonim 5, tanpa tahun)

2.2.2 Kawat Pemanas

Kawat pemanas adalah komponen yang sangat penting dalam sebuah *heater*. Kawat pemanas biasanya terbuat dari material logam yang memiliki resistansi tinggi. Standarisasi atau ukuran kawat pemanas biasanya dinyatakan dengan nilai gauge atau AWG (*American Wire Gauge*). Semakin kecil nilai gauganya maka semakin besar diameter kawatnya dan semakin kecil nilai resistansinya seperti ditunjukkan pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Hubungan nilai AWG, diameter kawat pemanas (Royen, 2014)

NO	AWG	Diameter	Diameter
		(inch)	(mm)
1	1	0,2893	7,3481
2	2	0,2576	6,5437
3	3	0,2294	5,8273
4	4	0,2043	5,1894
5	5	0,1819	4,6213
6	6	0,1620	4,1154
7	7	0,1443	3,6649
8	8	0,1285	3,2636
9	9	0,1144	2,9064
10	10	0,1019	2,5882
11	11	0,0907	2,3048
12	12	0,0808	2,0525
13	13	0,0720	1,8278
14	14	0,0641	1,6277
15	15	0,0571	1,4495
16	16	0,0508	1,2908
17	17	0,0453	1,1495

Tabel 2.2 Hubungan nilai AWG, diameter kawat pemanas (lanjutan)

NO	AWG	Diameter	Diameter
		(inch)	(mm)
18	18	0,0403	1,0237
19	19	0,0359	0,9116
20	20	0,0320	0,8118
21	21	0,0285	0,7229
22	22	0,0253	0,6438
23	23	0,0226	0,5733
24	24	0,0201	0,5106
25	25	0,0179	0,4547
26	26	0,0159	0,4049
27	27	0,0142	0,3606
28	28	0,0126	0,3211
29	29	0,0113	0,2859
30	30	0,0100	0,2546
31	31	0,0089	0,2268
32	32	0,0080	0,2019
33	33	0,0071	0,1798
34	34	0,0063	0,1601
35	35	0,0056	0,1426
36	36	0,0050	0,1270
37	37	0,0045	0,1131
38	38	0,0040	0,1007
39	39	0,0035	0,0897
40	40	0,0031	0,0799

Berikut adalah jenis material yang biasanya digunakan untuk kawat pemanas.

1. Khantal (FeCrAl)

Khantal adalah jenis kawat pemanas yang cukup banyak digunakan sebagai elemen pemanas. Kawat khantal memiliki resistansi yang sangat tinggi yang merupakan paduan dari besi, kromium dan alumunium (FeCrAl) dapat beroperasi pada temperatur 1400 C (2550 F) seperti ditunjukkan pada gambar 2.14. Kawat khantal biasanya digunakan untuk skala industri karena dapat bekerja pada temperatur dan tingkat ketahanan oksidasi yang tinggi. Namun, memerlukan waktu yang lebih lama untuk mencapai temperatur yang diinginkan (Setiyono, 2016).



Gambar 2.14 Kawat Khantal Grade A1 AWG 24 (Setiyono, 2016)

2. Nicrome

Kawat pemanas dengan material Nicrome merupakan paduan dari Nickel dan Cromium. Kawat ini memiliki resistansi yang hampir sama dengan kawat khantal pada ukuran gauge yang sama (Setiyono, 2016). Kawat Nicrome dapat bekerja pada temperatur 1250 C dan melting poin pada temperatur \pm 1350 C seperti ditunjukkan pada gambar 2.15. Karena memiliki ketahanan yang sedikit lebih rendah dari pada kawat khantal, kawat Nicrome banyak digunakan untuk elemen pemanas pada alat pemanggang dan setrika. Kelebihan nichrome

dibandingkan kanthal adalah panas yang dihasilkan lebih konstan, tidak mengandung besi sehingga tidak melekat dengan medan magnet sehingga kemungkinan dry hit atau hangus rendah. Beberapa produk kawat Nicrome adalah Ni80 (Nickel 80% dan Cromium 20%) dan Ni60 (Nickel 60% dan Cromium 40%).



Gambar 2.15 Kawat Nicrome Ni80 AWG 24

3. Nickel

Kawat nickel lebih dikenal dengannama kawat Nikelin. Diketahui tidak stabil dan ketika dipanaskan pada temperatur lebih dari 400 C. Salah satu produk kawat nikelin adalah Ni200 (100% Nickel) seperti ditunjukkan pada gambar 2.16. Kelebihan kawat nickel adalah waktu untuk dipanaskan dan kembali dingin lebih cepat dibanding kawat kantal (Setiyono, 2016) serta harganya relatif murah. Biasanya digunakan untuk material pemotong sterfoem, plastik, dan pemotong karet



Gambar 2.16 Kawat Nikelin (Setiyono, 2016)

4. Titanium

Kawat pemanas dengan material titanium atau Ti sebenarnya memiliki sifat yang hampir sama dengan nikelin karena bila dipanaskan pada temperatur lebih dari 600 C atau 1112 F akan mengeluarkan zat titanium dioxide yang bersifat karsinogenik atau titania (TiO_2) yang dapat menimbulkan kanker yang membahayakan kesehatan (Setiyono, 2016) seperti ditunjukkan pada gambar 2.17.



Gambar 2.17 Kawat pemanas titanium (Setiyono, 2016)

5. Stainless Steel

Pada umumnya kawat pemanas SS (Stainless Steel) yang beredar dipasaran merupakan logam paduan yang mengandung 8%-10%. Misalnya SS304 yang mengandung 8% dan cromium 18% seperti ditunjukkan pada gambar 2.18. Kawat

SS memiliki ketahanan panas hingga 898 C yang cukup baik serta tidak mudah putus dibanding kawat khantal. Kekurangannya dari kawat SS ialah untuk tipe SS 316L/317L mengandung manganese yang bersifat racun pada tubuh.



Gambar 2.18 Kawat pemanas Stainless Steel (Setiyono, 2016)

2.2.3 Rangkaian Listrik

Rangkaian listrik adalah interkoneksi dari kumpulan beberapa komponen atau elemen listrik yang dihubungkan dengan cara tertentu yang paling sedikit memiliki satu rangkaian tertutup. Elemen atau komponen listrik dapat digolongkan menjadi 2 yaitu elemen aktif dan elemen pasif. Elemen aktif adalah suatu elemen yang menghasilkan energi atau sumber energi listrik sedangkan elemen pasif adalah elemen yang tidak bisa menghasilkan energi atau disebut beban listrik yang terdapat pada komponen resistor, induktor, dan kapasitor (Ramdhani, 2005). Setidaknya terdapat 4 hal mendasar yang terkait dengan perhitungan suatu rangkaian listrik yaitu : Daya, Arus, Tegangan, dan tahanan.

1. Daya listrik

Daya listrik didefinisikan sebagai laju hantaran energi listrik pada suatu rangkaian listrik atau besarnya energi yang mampu dialirkan persatuan waktu. Daya listrik dapat dirumuskan dengan hukum Joule seperti persamaan 2.1 sebagai berikut.

$$P = V \times I \dots \dots \dots (2.1)$$

Keterangan:

P= Daya listrik	(Watt)
V= Tegangan listrik	(Volt)
I= Arus listrik	(Ampere)

Daya listrik juga dapat dihitung dengan gabungan antara hukum Joule dengan hukum Ohm yang dirumuskan dalam persamaan 2.2 sebagai berikut.

$$P = I^2 \times R \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan:

P= Daya listrik	(Watt)
I= Arus listrik	(Ampere)
R= Tahanan listrik	(Ohm)

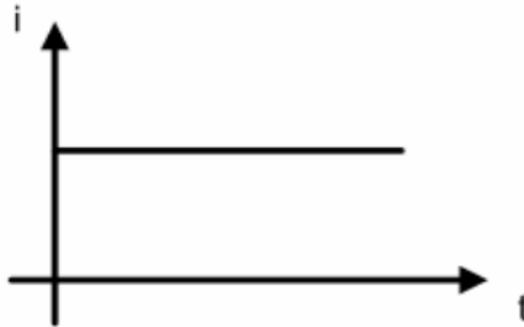
2. Arus Listrik

Arus adalah perubahan suatu muatan terhadap waktu atau besarnya muatan yang mengalir dalam suatu rangkaian listrik persatuan waktu. Sehingga arus listrik merupakan muatan yang bergerak mempunyai simbol (I) dengan satuan Ampere. Muatan akan bergerak jika ada energi luar yang mempengaruhinya. Muatan adalah suatu satuan terkecil dari atom atau sub atom dimana atom terdiri dari partikel inti yang terdiri dari proton yang mempunyai muatan positif, neutron yang bermuatan netral dan dikelilingi elektron yang bermuatan negatif.

Dalam suatu rangkaian listrik arus merupakan pergerakan dari suatu muatan positif. Beda potensial terjadi pada suatu elemen atau komponen sehingga timbullah arus listrik pada rangkaian tersebut. Arus listrik terdiri dari dua macam yaitu arus searah (DC) dan arus bolak balik (AC).

a. Arus Searah (Direct Current / DC)

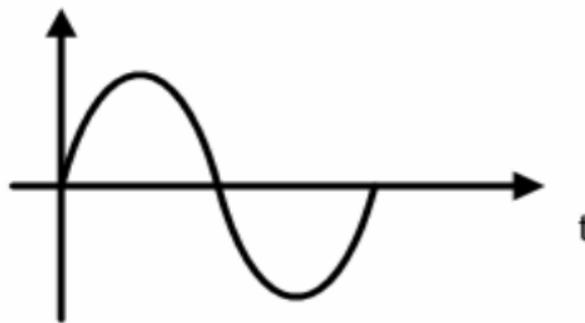
Arus DC adalah arus yang bernilai tetap atau konstan terhadap satuan waktu. Sehingga kapanpun dilakukan pengukuran terhadap arus tersebut akan tetap menunjukkan nilai yang sama. Gambar arus DC ditunjukkan pada gambar 2.19.



Gambar 2.19 Arus DC

b. Arus bolak balik (Alternative Current / AC)

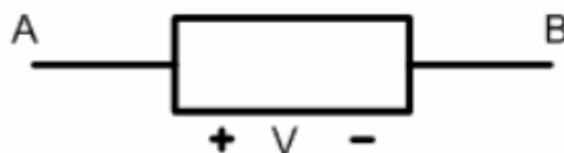
Arus AC adalah suatu arus yang nilainya berubah terhadap satuan waktu. Karakteristik arus AC adalah akan selalu berulang pada periode waktu tertentu. Gambar arus AC ditunjukkan pada gambar 2.20.



Gambar 2.20 Arus AC

3. Tegangan Listrik

Tegangan atau beda potensial adalah kerja atau usaha yang dibutuhkan untuk menggerakkan suatu muatan sebesar satu coulomb. Usaha yang dilakukan sebenarnya adalah energi yang diperlukan sehingga dapat dikatakan bahwa tegangan adalah energi persatuan muatan. Tegangan listrik dilambangkan dengan symbol (V) dengan satuan *Volt*.



Gambar 2.21 Tegangan Listrik

Gambar 2.21 diatas menunjukkan bahwa terminal atau kutub A mempunyai potensial lebih tinggi dari pada potensial di kutub B. Sehingga istilah untuk nilai tegangan yang sering dipakai pada suatu rangkaian listrik adalah tegangan turun (*voltage drop*) jika dilihat dari potensial lebih tinggi ke potensial yang lebih rendah dan tegangan naik (*voltage rise*) jika dipandang potensial yang lebih rendah ke potensial yang lebih tinggi.

4. Tahanan Listrik

Tahanan listrik adalah perbandingan nilai tegangan listrik pada suatu komponen elektronika terhadap arus listrik yang melewatinya. Arus listrik akan mengalir melewati material yang bersifat konduktor, sedangkan tahanan listrik adalah kondisi perlawanan untuk menghambat arus yang mengalir. Elektron bebas yang mengalir mendapat tahanan dan mengalami gesekan ketika melewati atom disebelahnya, sehingga akan menyebabkan material penghantar menjadi panas. Nilai tahanan suatu rangkaian listrik dirumuskan dengan persamaan 2.3.

$$R = \frac{V}{I} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dengan:

- R= Tahanan listrik (Ohm)
- V= Tegangan listrik (Volt)
- I= Arus Listrik (Ampere)

Nilai tahanan dapat didefinisikan dengan satuan Ohm. Nilai tahanan suatu material penghantar listrik berbanding terbalik terhadap arus penampangnya. Berdasarkan hukum Ohm bahwa suatu penghantar yang memiliki panjang (L) dengan luas penampang (A) dan tahanan jenis (ρ), maka nilai tahanan listrik dapat dinyatakan dengan persamaan 2.4.

$$R = \rho \times \frac{L}{A} \dots \dots \dots (2.4)$$

Keterangan:

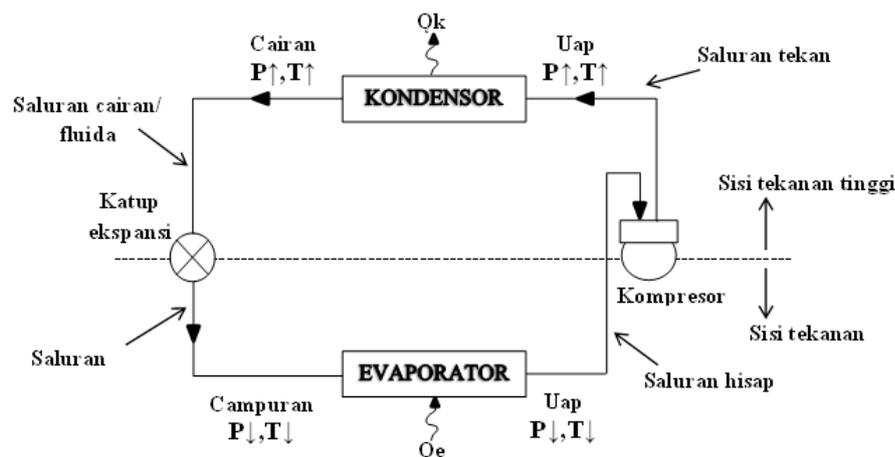
- R= Tahanan listrik (Ohm)
- ρ = Tahanan jenis ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)
- L= Panjang penghantar (m)
- A= Luas penampang penghantar (mm^2)

Sehingga faktor-faktor yang mempengaruhi nilai tahanan listrik adalah panjang penghantar, luas penampang penghantar, jenis material, dan temperatur material. Tahanan penghantar mempengaruhi temperatur karena meningkatnya temperatur akan menyebabkan ikatan atom makin meningkat sehingga aliran elektron akan semakin terhambat. Dengan demikian kenaikan temperatur akan menyebabkan kenaikan nilai tahanan listrik.

2.2.4 Siklus Refrigerasi

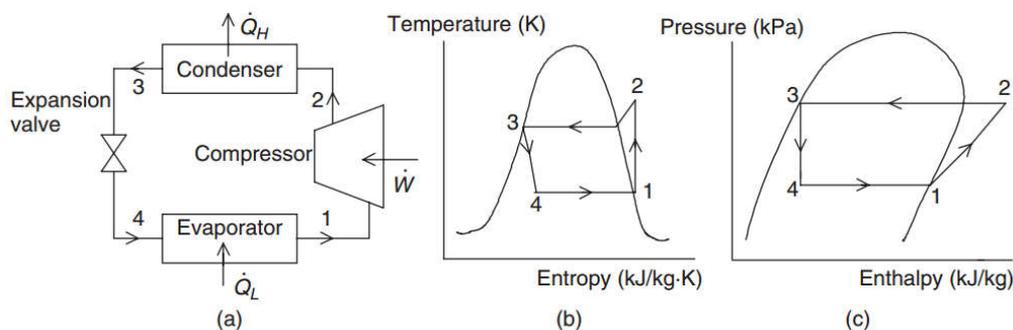
Sistem refrigerasi atau proses pengkondisian udara adalah suatu siklus yang merupakan aplikasi dari perpindahan kalor termodinamika. Siklus ini menggunakan refrigeran sebagai fluida kerja yang memiliki temperatur lebih dingin dari pada temperatur ruangan yang didinginkan sehingga energi sebagai panas dapat dipindahkan dari ruang dingin ke fluida yang lebih dingin tersebut. Agar fluida tidak terbang, fluida harus disirkulasikan melalui suatu sistem sedemikian rupa sehingga energi yang diambil dari ruang dingin dapat dibuang keluar lingkungan.

Berikut sistem refrigerasi kompresi uap standar ditunjukkan pada gambar 2.22.



Gambar 2.22 Sistem refrigerasi siklus kompresi uap standar (Stoecker, 1996)

Pada siklus refrigerasi uap terdapat serangkaian komponen dan peralatan yang terhubung secara berurutan untuk menghasilkan efek refrigerasi seperti ditunjukkan pada gambar 2.22. Refrigeran yang mengalir pada siklus memanfaatkan perubahan fasa dalam proses penyerapan kalor atau evaporasi dari bentuk cair menjadi bentuk uap. Sebaliknya jika terjadi pelepasan kalor atau kondensasi refrigeran berubah fasa dari fasa gas menjadi cair. Di dalam suatu proses refrigerasi terdapat beberapa komponen utama selain refrigeran sebagai fluida kerja diantaranya: kompresor, kondensor, katup ekspansi, dan evaporator. Sistem refrigerasi kompresi uap terdiri dari empat proses termal yaitu: evaporasi, kompresi, kondensasi, dan ekspansi. Gambar diagram skematik dari sistem refrigerasi kompresi uap dapat dilihat pada gambar 2.23a siklus refrigerasi juga digambarkan dalam bentuk diagram T-s (gambar 2.23b), dan dalam bentuk diagram P-h (gambar 2.23c).



Gambar 2.23 Sistem Refrigerasi Kompresi Uap, (a) Diagram Skematik, (b) Diagram T-s, (c) Diagram P-h (Dinçer & Kanoglu, 2010)

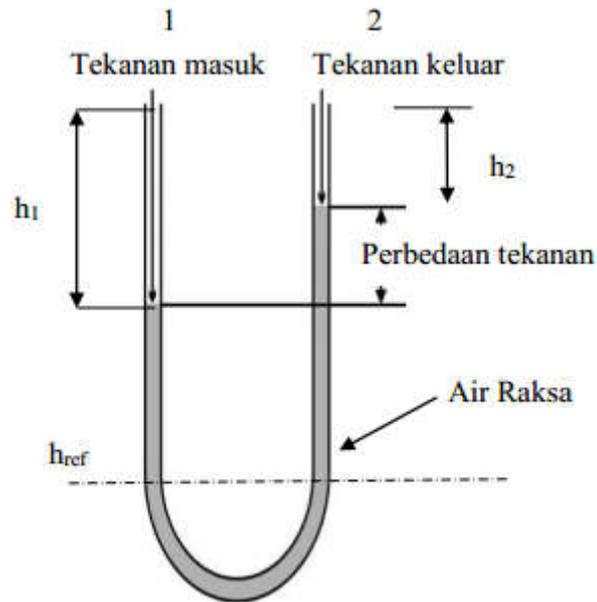
Berikut adalah penjelasan proses termal yang terjadi di dalam siklus refrigerasi berdasarkan gambar 2.23 diantaranya:

- 1 – 2 : Kompresi adiabatik *reversible*. Ketika keluar dari evaporator refrigeran berfasa gas dengan tekanan uap yang rendah, akibat adanya kerja kompresor tekanan uap dan temperatur refrigeran menjadi lebih tinggi dan bergerak menuju kondensor.

- 2 – 3 : Pelepasan kalor pada tekanan konstan. Pada bagian kondensor, refrigeran memiliki tekanan uap dan temperatur yang tinggi sehingga dapat melepaskan kalor keluar. Akibat pelepasan kalor tersebut refrigeran terkondensasi.
- 3 – 4 : Ekspansi *irreversible* pada entalpi konstan (isentalpik). Refrigeran yang berfasa cair setelah keluar dari kondensor memasuki bagian katup ekspansi sehingga temperatur dan tekanannya tereduksi dari tekanan kondensasi (titik 3) menjadi tekanan evaporasi (titik 4).
- 4 – 1 : penerimaan panas *reversible* pada tekanan konstan. Setelah melewati katup ekspansi, refrigeran yang berfasa cair melewati bagian evaporator. Pada bagian evaporator terjadi proses penerimaan kalor oleh refrigeran sehingga menghasilkan efek pendinginan yang menyebabkan lingkungan sekitar menjadi lebih dingin serta mengubah fasa menjadi gas sebelum memasuki kompresor lagi.

2.2.5 Orifice

Orifice berfungsi sebagai alat ukur laju aliran massa suatu fluida yang mengalir secara tidak langsung melalui pengukuran laju aliran volume menggunakan fluida air dengan *orifice* dan manometer U (Santoso, 2003). Air raksa dengan *densitas* 13.600 kg/m^3 digunakan sebagai fluida manometer. Skema manometer ditunjukkan pada gambar 2.24 Persamaan kontinuitas dan persamaan Bernoulli digunakan untuk menentukan laju aliran massa refrigeran (Santoso, 2003). Persamaan kontinuitas untuk penampang pipa tembaga pada persamaan 2.5 dan skema *orifice* dalam gambar 2.25.



Gambar 2.24 Skema manometer U

$$\dot{m}_{wtr} = \rho_{wtr.1} \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_{wtr.2} \cdot A_2 \cdot v_2 \dots\dots\dots(2.5)$$

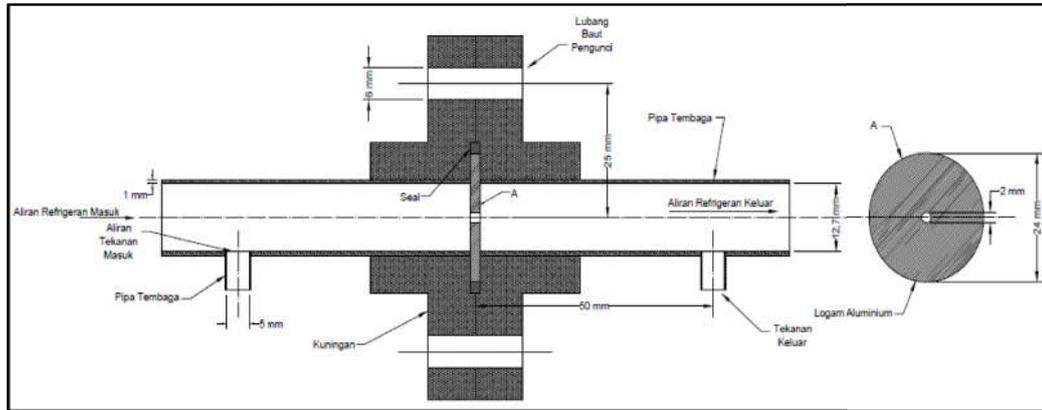
Dimana:

- \dot{m}_{wtr} = Laju aliran massa air (kg/s)
- $\rho_{wtr.1}$ = Massa jenis air pada aliran pipa tembaga (kg/m³)
- $\rho_{wtr.2}$ = Massa jenis air pada aliran *orifice* (kg/m³)
- A_2 = Luas penampang *orifice* (m²)
- A_1 = Luas penampang pipa tembaga (m²)
- v_1 = Kecepatan aliran fluida pada pipa tembaga (m/s)
- v_2 = Kecepatan aliran fluida pada *orifice* (m/s)

Air yang masuk *orifice* adalah fluida tak mampat sehingga:

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho_{wtr} \dots\dots\dots(2.6)$$

$$v_1 = \frac{A_2}{A_1} \cdot v_2 \dots\dots\dots(2.7)$$



Gambar 2.25 Skema *Orifice*

Asumsi yang digunakan adalah aliran mengalami proses adiabatik, tanpa gesekan, aliran tunak, fluida tak mampat, dan beda potensial diabaikan, maka digunakan persamaan Bernoulli 2.8 dan 2.9:

$$\frac{P_1}{\rho_{wtr}} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho_{wtr}} + \frac{v_2^2}{2} \dots\dots\dots(2.8)$$

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho_{wtr}}{2} \cdot (v_2^2 - v_1^2) \dots\dots\dots(2.9)$$

Dengan:

$P_1 - P_2$ = Beda tekanan pada sisi masuk dan keluar *orifice* (Pa)
 ρ_{wtr} = Massa jenis air (kg/m³)

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.7 ke persamaan 2.9 maka persamaan menjadi:

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho_{wtr} \cdot v_2^2}{2} \cdot \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(2.10)$$

$$v_2 = \frac{\sqrt{\frac{2}{\rho_{wtr}} \cdot \sqrt{P_1 - P_2}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}} \dots\dots\dots(2.11)$$

Persamaan laju aliran volume ideal adalah:

$$Q_{ideal} = A_2 \cdot v_2 \dots\dots\dots(2.12)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.11 ke persamaan 2.12 laju aliran volume ideal menjadi:

$$v_{ideal} = A_2 \cdot \frac{\sqrt{\frac{2}{\rho_{wtr}} \cdot \sqrt{P_1 - P_2}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \dots\dots\dots(2.13)$$

Hubungan antara laju aliran volume air ideal dan aktual dapat ditulis:

$$v_{aktual} = C \cdot v_{ideal} \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana:

C = Koefisien curah (*discharge coefficient*)

v_{aktual} = Ditentukan pada saat pembacaan rotameter air

Hubungan antara laju aliran volume air aktual dengan beda tekanan sisi masuk dan keluar *orifice* dilakukan dengan mensubstitusikan persamaan 2.13 ke persamaan 2.14 sehingga didapat persamaan 2.15.

$$v_{aktual} = C \cdot A_2 \cdot \frac{\sqrt{\frac{2}{\rho_{wtr}} \cdot \sqrt{P_1 - P_2}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \dots\dots\dots(2.15)$$

Bilangan Reynolds (Re) aliran dapat ditulis persamaan sebagai berikut:

$$Re = \frac{4 \cdot \rho_{wtr} \cdot v_{aktual}}{\pi \cdot D_1 \cdot \mu_{wtr}} \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana D_1 adalah diameter pipa tembaga (m).

Untuk menentukan laju aliran volume fluida harus ditentukan koefisien curah (C).

Persamaan 2.16 dapat ditulis sebagai:

$$v_{aktual} = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot \mu_{wtr}}{4 \cdot \rho_{wtr}} \cdot Re \dots\dots\dots(2.17)$$

Persamaan 2.17 disubstitusikan ke persamaan 2.15 menjadi:

$$\frac{\pi \cdot D_1 \cdot \mu_{wtr}}{4 \cdot \rho_{wtr}} \cdot Re = C \cdot A_2 \cdot \frac{\sqrt{\frac{2}{\rho_{wtr}} \cdot \sqrt{P_1 - P_2}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \dots\dots\dots(2.18)$$

Sehingga dalam mencari koefisien curah (C) diperoleh persamaan:

$$C = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot \mu_{wtr}}{4 \cdot \rho_{wtr}} \cdot \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}{A_2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_{wtr}}}} \cdot \frac{Re}{\sqrt{P_1 - P_2}} \dots\dots\dots(2.19)$$

Tekanan pada titik A dan B adalah sama, sehingga beda tekanan *orifice* antara sisi 1 (tekanan masuk) dan sisi 2 (tekanan keluar) manometer dapat dihitung sebagai berikut:

$$P_1 - P_2 = \rho_{Hg} \cdot g \cdot (h_1 - h_2) \dots\dots\dots(2.20)$$

Dengan:

- $P_1 - P_2$ = Beda tekanan sisi masuk dan keluar *orifice* (Pa)
- ρ_{Hg} = Massa Jenis air raksa (13.600 kg/m³)
- g = Percepatan gravitasi bumi (9,81 m/s²)
- $h_1 - h_2$ = Beda level fluida pada sisi masuk dan keluar (m)

Untuk menghitung laju aliran massa refrigeran perlu dibuat grafik hubungan antara beda tekanan *orifice* terhadap bilangan Re dan grafik hubungan bilangan Re terhadap koefisien curah (C). Maka laju aliran massa refrigeran dapat ditentukan dengan persamaan 2.21.

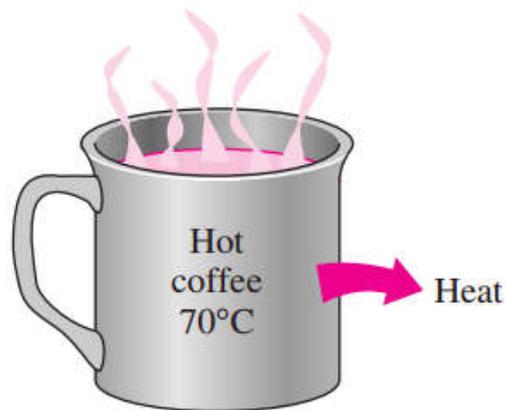
$$m_{refrigeran} = \rho_{R-134a} \cdot V_{Refrigeran, aktual} \dots\dots\dots(2.21)$$

2.2.6 Modus Perpindahan Kalor

Perpindahan panas (*heat transfer*) adalah proses perpindahan energi panas karena adanya perbedaan temperatur antara benda atau suatu material. Proses terjadinya perpindahan panas terjadi pada material dengan temperatur tinggi berpindah menuju temperatur yang lebih rendah seperti ditunjukkan pada gambar 2.26. Dengan melakukan pemberian atau pengurangan panas pada suatu benda dapat mengubah fasa dan temperatur suatu benda secara lokal. Perpindahan panas sangat berkaitan erat dengan ilmu termodinamika, walaupun dalam ilmu termodinamika perpindahan panas telah dipelajari namun, pada ilmu termodinamika hanya membahas berdasarkan kondisi awal dan kondisi akhir pada suatu proses dimana perpindahan energi dalam bentuk panas adalah selisih antara

energi dalam suatu sistem pada kondisi awal dan kondisi akhir proses atau kesetimbangan energi (Haryadi, 2012).

Mekanisme perpindahan panas dibagi dalam 3 jenis yaitu : konduksi, konveksi, dan radiasi.



Gambar 2.26 Perpindahan Kalor (Cengel, 2003)

1. Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi adalah proses perpindahan kalor pada suatu material atau bahan berbentuk padat, cair, gas atau partikel yang berkontak secara langsung namun tidak ada pergerakan relatif pada material atau zat tersebut seperti ditunjukkan pada gambar 2.27. Contoh perpindahan panas konduksi adalah pada batang logam yang diberi panas pada salah satu ujungnya, temperatur panas juga akan merambat menuju ujung yang lainnya hingga akhirnya temperatur akan mencapai kondisi steady. Menurut Incropera dan Dewitt (2002) perpindahan panas konduksi pada kondisi satu dimensi dinyatakan dengan persamaan 2.22 sebagai berikut:

$$Q = k \times A \times \frac{dT}{dx} \dots \dots \dots (2.22)$$

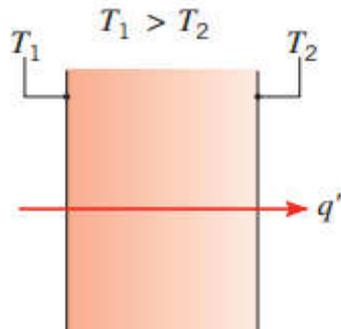
Atau dapat dinyatakan dengan persamaan 2.23

$$Q = k \times \frac{A}{L} \times (T_1 - T_2) \dots \dots \dots (2.23)$$

Dengan:

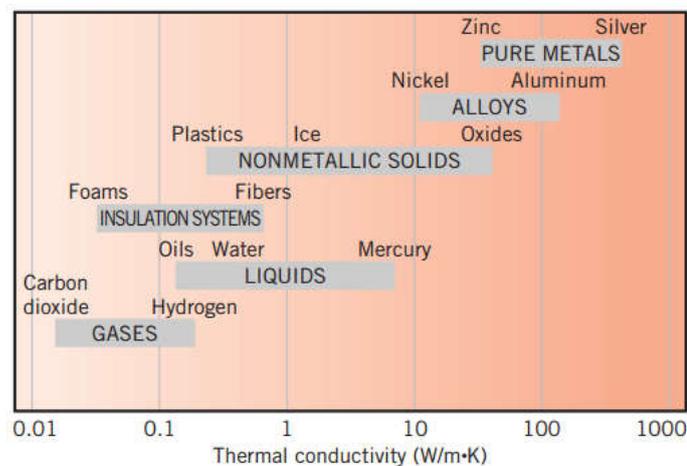
- Q = Laju perpindahan kalor konduksi (Watt)
- k = Konduktivitas termal material (W/m.°C)
- A = Luas penampang dialiri oleh kalor secara konduksi (m²)
- $\frac{dT}{dx}$ = Gradien temperatur di arah x (°C/m)

- L = Panjang perpindahan kalor konduksi (m)
 T_1 = Temperatur permukaan 1 ($^{\circ}\text{C}$)
 T_2 = Temperatur permukaan 2 ($^{\circ}\text{C}$)



Gambar 2.27 Perpindahan kalor konduksi (Incropera dan Dewitt, 2002)

Nilai konduktifitas termal pada setiap material juga berbeda-beda tergantung pada jenis materialnya. Berikut adalah nilai konduktifitas termal beberapa material ditunjukkan pada Gambar 2.28.



Gambar 2.28 Konduktivitas termal beberapa jenis material (Incropera dan Dewitt, 2002)

2. Konveksi

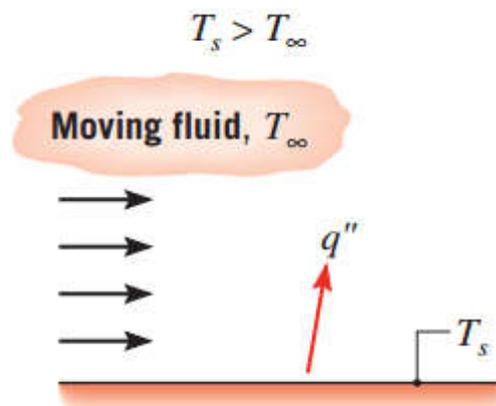
Perpindahan kalor konveksi dinyatakan sebagai perpindahan panas yang terjadi pada permukaan suatu material dengan aliran fluida yang mengalir melewati permukaan material tersebut, karena adanya perbedaan temperatur antara material dan fluida yang mengalir seperti ditunjukkan pada gambar 2.29.

Berbeda dengan konduksi, pada peristiwa konveksi perpindahan panas sangat dipengaruhi oleh gerakan curah dari fluida. Sehingga, selain dipengaruhi oleh sifat-sifat fluida aliran fluida juga berpengaruh terhadap laju perpindahan panas konveksi. Menurut Dewitt dan Incropera (2002), persamaan dasar laju perpindahan kalor konveksi sebagai berikut:

$$Q = h \times A \times \Delta T \dots \dots \dots (2.24)$$

Dengan :

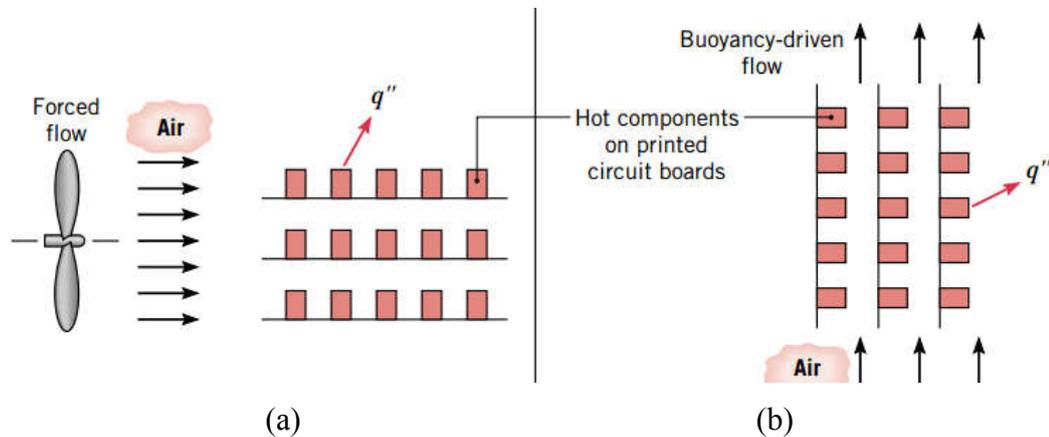
- Q = Laju perpindahan kalor konveksi (Watt)
- h = Koefisien perpindahan kalor konveksi ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
- A = Luas permukaan perpindahan kalor (m^2)
- ΔT = Beda temperatur antara T_∞ (fluida, $^\circ\text{C}$) dengan T_s (permukaan, $^\circ\text{C}$)
- $\Delta T = T_s - T_\infty$, jika $T_\infty < T_s$
- $\Delta T = T_\infty - T_s$, jika $T_\infty > T_s$



Gambar 2.29 Perpindahan kalor konveksi (Incropera dan Dewitt, 2002)

Sehingga menentukan besarnya laju perpindahan panas konveksi secara analisis seperti peristiwa konduksi menjadi tidak dapat dilakukan. Maka, dalam perhitungan laju perpindahan panas konveksi dapat dinyatakan dengan korelasi-korelasi bilangan tak berdimensi yang diperoleh dari eksperimen. Menurut sifat alirannya perpindahan panas konveksi dibagi menjadi 2 yaitu konveksi bebas dimana aliran fluida yang mengalir secara alami dan konveksi paksa yaitu adanya

mekanisme eksternal yang menyebabkan terjadinya aliran fluida seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.30.



Gambar 2.30 (a) Konveksi paksa
 (b) Konveksi bebas
 (Incropera dan Dewitt, 2002)

Penentuan laju perpindahan kalor konveksi dapat ditentukan dengan beberapa bilangan tak berdimensi berikut :

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (\text{Angka Nusselt}) \dots\dots\dots(2.25)$$

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (\text{Angka Rayleigh}) \dots\dots\dots(2.26)$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (\text{Angka Prandtl}) \dots\dots\dots(2.27)$$

3. Radiasi

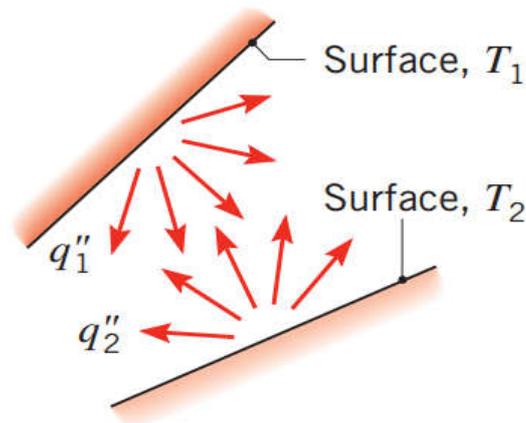
Radiasi adalah proses terjadinya perpindahan panas pada suatu material atau zat tanpa perlu adanya medium seperti ditunjukkan pada gambar 2.31. Contoh perpindahan panas secara radiasi adalah panas dari matahari yang sampai hingga permukaan bumi. Laju perpindahan panas secara radiasi dapat dinyatakan dengan persamaan 2.28.

$$Q_{\text{radiasi}} = \epsilon \times \sigma \times A_s (T_s^4 - T_{\infty}^4) \dots\dots\dots(2.28)$$

Dengan :

- Q_{radiasi} = Laju perpindahan kalor radiasi (Watt)
- ϵ = Emisivitas permukaan ($0 \leq \epsilon \leq 1$)
- σ = konstanta Stefan Boltzmann = $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
- A_s = Luasan perpindahan kalor (m^2)

T_s = Temperatur permukaan (K)
 T_∞ = Temperatur lingkungan sekitar (K)



Gambar 2.31 Perpindahan kalor Radiasi (Incropera dan Dewitt, 2002)

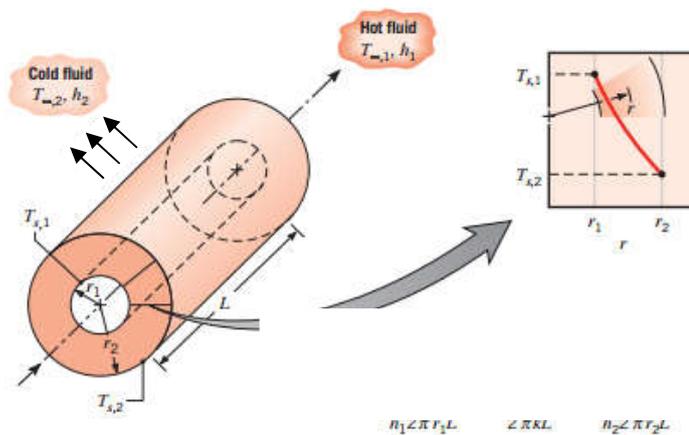
Perpindahan panas radiasi erat hubungannya dengan nilai emisivitas permukaan (ϵ) yaitu kemampuan suatu permukaan untuk memancarkan radiasi dan absorpsivitas permukaan (α) yaitu kemampuan suatu permukaan dalam menyerap radiasi. Sedangkan material yang memiliki nilai (ϵ) dan (α) mendekati nilai satu disebut benda hitam. Berikut adalah nilai emisivitas permukaan (ϵ) dan absorpsivitas permukaan (α) beberapa jenis material ditunjukkan pada tabel 2.3.

Tabel 2.3 Nilai (ϵ) dan (α) beberapa jenis material (Cengel, 1998) dan (incropera, 2002)

Emissivities of some materials at 300 K		Surface	α_s	ϵ (300 K)	α_s/ϵ
Aluminum foil	0.07	Evaporated aluminum film	0.09	0.03	3.0
Anodized aluminum	0.82	Fused quartz on aluminum film	0.19	0.81	0.24
Polished copper	0.03	White paint on metallic substrate	0.21	0.96	0.22
Polished gold	0.03	Black paint on metallic substrate	0.97	0.97	1.0
Polished silver	0.02	Stainless steel, as received, dull	0.50	0.21	2.4
Polished stainless steel	0.17	Red brick	0.63	0.93	0.68
Black paint	0.98	Human skin (Caucasian)	0.62	0.97	0.64
White paint	0.90	Snow	0.28	0.97	0.29
White paper	0.92–0.97	Corn leaf	0.76	0.97	0.78
Asphalt pavement	0.85–0.93				
Red brick	0.93–0.96				
Human skin	0.95				
Wood	0.82–0.92				
Soil	0.93–0.96				
Water	0.96				
Vegetation	0.92–0.96				

4. Perpindahan Panas Pada Koordinat Silinder Berlubang

Apabila perpindahan panas terjadi pada suatu sistem dengan koordinat berbentuk silinder seperti diilustrasikan pada gambar 2.32 dengan radius dalam (r_1) dan radius luar (r_2) dengan panjang (L). Temperatur dinding dalam (T_1) dan temperatur permukaan luar adalah (T_2) dengan kalor yang mengalir (Q) yang berlangsung kearah radial saja.



Gambar 2.32 Perpindahan kalor pada silinder berlubang (Incropera dan Dewitt, 2002)

Maka luasan perpindahan kalor dinyatakan dengan persamaan 2.29.

$$A = 2\pi rL \dots \dots \dots (2.29)$$

Sehingga apabila material tersebut memiliki harga konduktifitas termal (k) maka nilai perpindahan kalor konduksi pada silinder tersebut dinyatakan dalam persamaan 2.30.

$$Q_{\text{konduksi}} = k A \left(\frac{dT}{dr} \right) = k (2\pi rL) \frac{dT}{dr} \dots \dots \dots (2.30)$$

Dengan mengetahui Temperatur dinding dalam (T_1) dan temperatur permukaan luar adalah (T_2) dan mengasumsikan nilai konduktifitas termal material konstan (k) maka dapat ditentukan distribusi temperatur pada radius tertentu dengan persamaan 2.31.

$$T_r = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln(r_1/r_2)} \ln \left(\frac{r}{r_2} \right) + T_{s,2} \dots \dots \dots (2.31)$$

Sehingga dengan menerapkan hukum Fourier nilai perpindahan kalor pada silinder berlubang dapat dituliskan dengan persamaan 2.32.

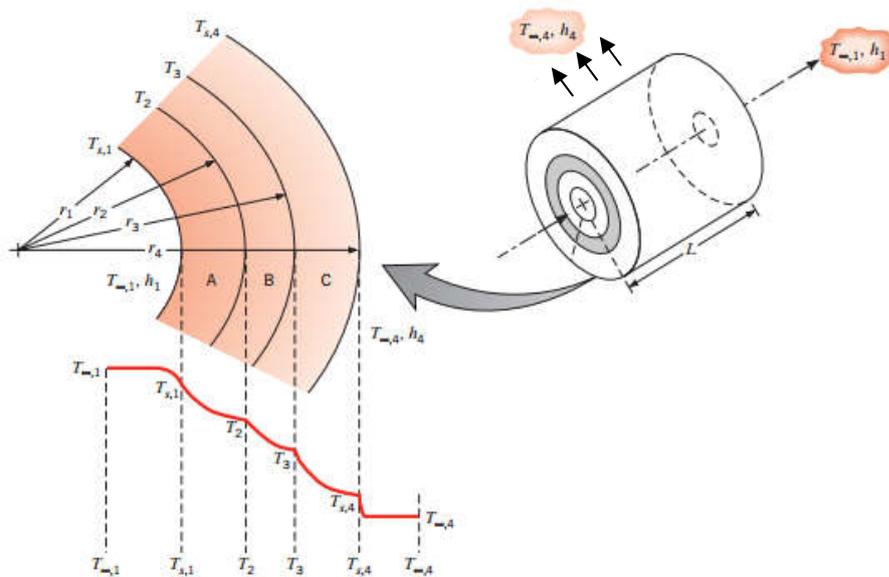
$$Q = \frac{2\pi Lk(T_{s,1}-T_{s,2})}{\ln(r_1/r_2)} \dots\dots\dots(2.32)$$

Sedangkan nilai tahanan termal untuk konduksi dinyatakan dengan persamaan 2.33.

$$R_{t,Konduksi} = \frac{\ln(r_1/r_2)}{2\pi Lk} \dots\dots\dots(2.33)$$

Apabila suatu material silinder diisolasi dengan ketebalan tertentu seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.33 maka perpindahan kalor yang terjadi dapat dituliskan dengan persamaan 2.34.

$$Q = \frac{T_{\infty,1}-T_{\infty,4}}{R_{total}} \dots\dots\dots(2.34)$$



Gambar 2.33 Perpindahan kalor pada silinder berlubang yang diisolasi (Incropera dan Dewitt, 2002)

dan dengan melibatkan perpindahan kalor secara konveksi pada setiap permukaan silinder, maka pipa dengan lapisan bahan komposit yang berbeda, maka tahanan termal total dapat dinyatakan dengan persamaan 2.35.

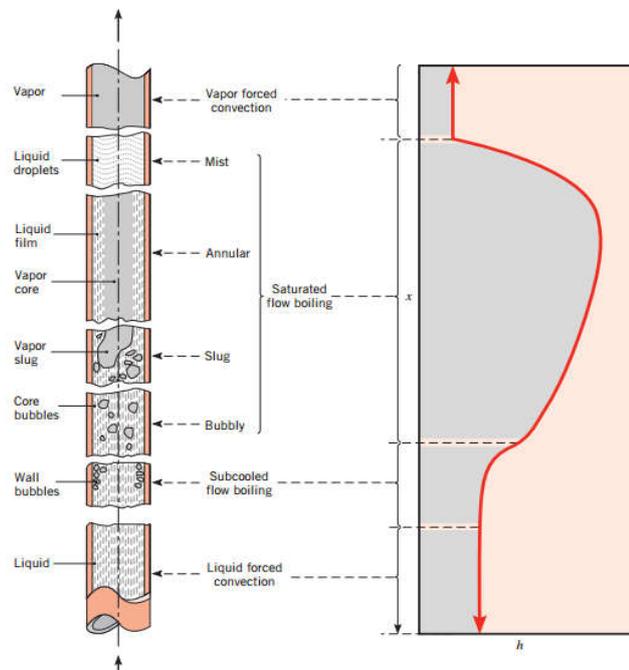
$$R_{total} = \frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi k_A L} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi k_B L} + \frac{\ln \frac{r_4}{r_3}}{2\pi k_C L} + \frac{1}{h_4 A_4} \dots\dots\dots(2.35)$$

Sehingga nilai perpindahan kalor pada silinder dengan isolator tersebut dapat ditulis dengan persamaan 2.36.

$$Q = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_A L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_B L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_C L} + \frac{1}{2\pi r_4 L h_4}} \dots\dots\dots(2.36)$$

2.2.7 Koefisien Perpindahan Kalor Evaporasi

Pertukaran panas oleh fluida refrigeran pada evaporator terjadi karena temperatur refrigeran lebih rendah dari pada temperatur lingkungannya. Sehingga, terdapat nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi di dalam suatu saluran yang dapat ditentukan dengan metode analitik. Namun, hal ini sangat sulit dilakukan karena sifat fluida baik sifat fisik maupun sifat termodinamik akan menyebabkan nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi tidak stabil. Selain itu, adanya perubahan fasa refrigeran akan membentuk suatu pola aliran yang beragam seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.34 rejim aliran didih yang terjadi secara konveksi paksa di dalam pipa. Karena untuk menentukan nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi sulit dilakukan dengan metode analitik maka dapat dilakukan dengan metode eksperimental.



Gambar 2.34 Rejim aliran didih secara konveksi paksa di dalam pipa (Incopera dan Dewitt, 2002)

2.2.8 Kualitas Uap

Kualitas uap adalah perbandingan massa uap dengan massa total suatu zat atau kondisi dimana sebagian zat berupa uap dan sebagian lain berupa cairan (cholil,2015). Sehingga dapat dikatakan bahwa perubahan kualitas uap sendiri terjadi pada suatu *property* yang hanya berlaku pada fasa campuran. Kualitas uap hanya dapat terjadi pada kondisi jenuh yaitu suatu kondisi pada temperatur dan tekanan jenuhnya. Kualitas disimbolkan dengan huruf (x), untuk menghitung kualitas uap refrigeran dapat dirumuskan dengan persamaan 2.37.

$$Q_{\text{refrigeran}} = (h_4' - h_4) m_{\text{refrigeran}} \dots\dots\dots (2.37)$$

dan

$$h_4' = \frac{Q_{\text{refrigeran}}}{m_{\text{refrigeran}}} + h_4 \dots\dots\dots (2.38)$$

Dengan:

$Q_{\text{refrigeran}}$ = Laju perpindahan kalor yang diserap refrigeran (Watt)

$m_{\text{refrigeran}}$ = Laju aliran massa refrigeran (kg/ det)

h_4' = Entalpy pada kualitas tertentu (kJ/kg)

h_3 = Entalpy pada titik 3 (sebelum katup ekspansi) (kJ/kg) = h_4

Untuk menghitung kualitas uap (x) tertentu dapat dihitung dengan persamaan 2.39.

$$h_4' = hf + (x \times hfg) \dots\dots\dots (2.39)$$

Dengan:

hf = Entalpy fasa cair pada kondisi 4

hg = Entalpy fasa uap pada kondisi 4

hfg = Entalpy fasa campuran

$$hfg = hg - hf \dots\dots\dots (2.40)$$

sehingga nilai kualitas uap (x) didapat:

$$x = \frac{h_4' - hf}{hfg} \dots\dots\dots (2.41)$$