

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian penelitian sebelumnya

Wang Huajun dan Qi Chengying (2010), melakukan penelitian tentang “*Experimental Study of Operation Performance of a Low Power Thermoelectric cooling Dehumidifier*”. Pada penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan data kelembaban relatif udara yang telah mendapatkan efek *cooling* dari *thermoelectric* akibat perubahan inputan daya pada komponen *thermoelectric*. Setiap perubahan input daya pada *thermoelectric* mengakibatkan perubahan kelembaban udara dengan durasi waktu tertentu pada skala kelembaban $98 \% \pm 1 \%$ ke $40 \% \pm 1 \%$. Dari hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa inputan daya *thermoelectric* paling optimal untuk mengurangi kelembaban dengan durasi waktu terpendek adalah pada daya 60 Watt dimana dicapai penurunan kelembaban dengan durasi waktu 120 menit.

Nasrudin (2006), melakukan penelitian tentang “Penelitian Perbandingan Unjuk Kerja Tiga Refrigeran Hidrokarbon Indonesia Terhadap Refrigeran R12 (CFC-12)”. Dimana penelitian ini bertujuan untuk membandingkan tiga jenis refrigeran hidrokarbon terhadap refrigeran R12. Pengujian dilakukan pada kondisi putaran kompresor 2980 rpm, temperatur keluar kondensor sebesar 39°C lalu temperatur masuknya bervariasi antara -2°C sampai 6°C . Hasil pengujian didapatkan unjuk kerja refrigeran hidrokarbon hampir sama dengan CFC-12 bahkan pada beberapa parameter pengujian menunjukkan refrigeran hidrokarbon lebih baik, dan didapatkan kesimpulan bahwa refrigeran hidrokarbon cocok untuk menjadi alternatif pengganti refrigeran CFC-12

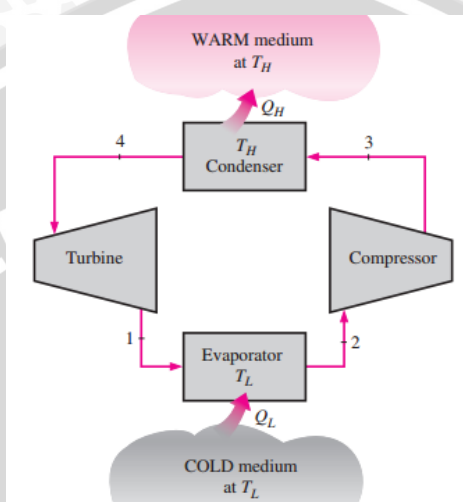
Jaka Nugraha (2013) melakukan penelitian tentang “Pengaruh Variasi Tingkat *Superheating* Terhadap Unjuk Kerja Mesin Pendingin Dengan Refrigeran Musicool (MC-22)”. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi tingkat *superheating* terhadap unjuk kerja berupa efek refrigerasi, kerja kompresi dan koefisien prestasi. Hasil pengujian didapatkan bahwa semakin besar tingkat *superheating* dan massa alir maka semakin besar kapasitas pendinginan sehingga unjuk kerja mesin pendingin meningkat.

2.2 Penyegaran Udara dan Daur Refrigerasi

Penyegaran udara adalah suatu proses mendinginkan udara sehingga dapat mencapai temperatur dan kelembaban yang sesuai dengan yang dipersyaratkan terhadap

kondisi udara dari suatu ruangan tertentu. Selain itu, mengatur aliran udara dan kebersihannya. (Arismunandar dan Saito, 1981:1).

Daur refrigerasi Carnot merupakan kebalikan dari mesin kalor tersebut, karena menyalurkan energi dari suhu rendah menuju suhu yang lebih tinggi. Daur refrigerasi membutuhkan kerja dari luar untuk dapat kerja. (Stoecker, 1996:177). Daur refrigerasi Carnot bisa kita lihat pada Gambar 2.1 berikut ini:



Gambar 2.1. Daur Refrigerasi Carnot
Sumber: Cengel (2009:609)

2.3 Persamaan Energi Aliran Mantap

Pada sistem refrigerasi laju aliran massa cenderung tetap sehingga laju aliran dapat dianggap mantap. Keseimbangan energi pada Gambar 2.8 dapat dinyatakan sebagai berikut:

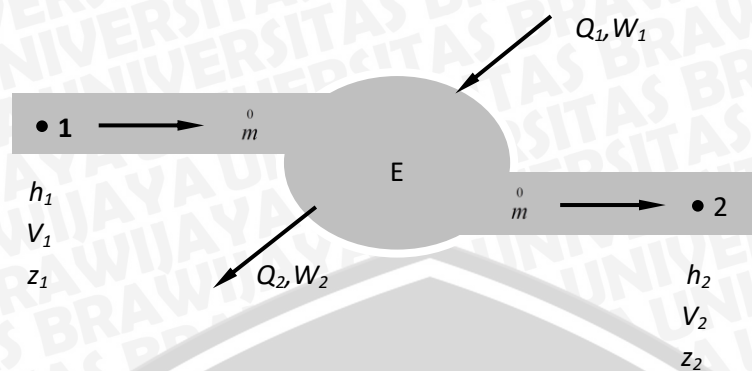
Besarnya energi yang masuk bersama aliran dititik 1 ditambah dengan besarnya energi yang ditambahkan berupa kalor yang dikurangi dengan besarnya energi dalam bentuk kerja dan dikurangi dengan energi yang meninggalkan sistem pada titik 2 sama dengan besarnya perubahan energi di dalam volume kendali (Stoecker; 1996:20).

Ungkapan matematika untuk keseimbangan energi tersebut adalah:

$$\dot{m} = \left[h_1 + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 \right] + Q - \dot{m} \left[h_2 + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \right] - W = \frac{dE}{d\theta} \quad (2.1)$$

Oleh karena perhatian dibatasi pada masalah proses aliran mantap, maka tak ada perubahan harga E terhadap waktu, karena itu $dE/d\theta = 0$, dan persamaan energi aliran mantap menjadi:

$$\dot{m} = \left[h_1 + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 \right] + Q = \dot{m} \left[h_2 + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \right] + W = \frac{dE}{d\theta} \quad (2.2)$$



Gambar 2.2. Keseimbangan energi pada sebuah volume atur yang sedang mengalami laju aliran mantap

Sumber : Stoecker (1996:20)

dengan:

$\dot{m}$	= Laju aliran massa	[kg.det ⁻¹]
h	= Entalpi	[J.kg ⁻¹]
v	= Kecepatan	[m.det ⁻¹]
z	= Ketinggian	[m]
g	= Percepatan gravitasi = 9,81	[m.det ⁻²]
Q	= Laju aliran energi dalam bentuk kalor	[W]
W	= Laju aliran energi dalam bentuk kerja	[J.det ⁻¹]
E	= Energi dalam sistem	[J]

2.4 Mesin Pendingin

Mesin pendingin adalah mesin konversi energi yang fungsinya untuk memindahkan panas dari tempat yang bersuhu rendah menuju ke tempat bersuhu tinggi dengan pemasukan kerja dari luar. Mesin pendingin bekerja dengan cara menyerap panas pada ruangan yang dikondisikan sehingga temperaturnya turun dan melepaskan panas ke lingkungan dengan menggunakan kerja dari kompresor.

Berdasarkan cara kerjanya, mesin pendingin dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Mesin pendingin siklus kompresi uap.
2. Mesin pendingin siklus absorpsi.

Mesin pendingin dengan siklus kompresi uap menggunakan kompresor dalam melakukan kerja untuk menaikkan tekanan serta temperatur refrigeran. Sedangkan

mesin pendingin dengan siklus absorpsi menggunakan pompa untuk menaikkan tekanan refrigeran dan menggunakan generator untuk meningkatkan temperaturnya. Refrigeran yang digunakan pada mesin pendingin kompresi uap menggunakan satu jenis refrigeran sebagai fluida kerjanya sedangkan untuk mesin pendingin absorpsi menggunakan dua jenis refrigeran yaitu refrigeran primer dan refrigeran sekunder sebagai *absorbing liquid* (zat cair penyerap).

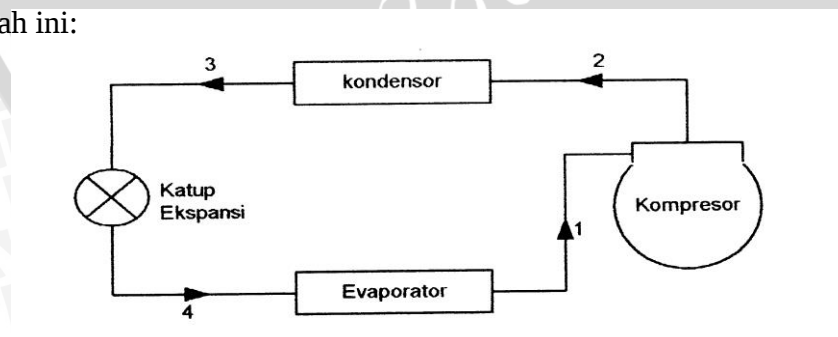
2.4.1 Mesin Pendingin Dengan Siklus Kompresi Uap

Siklus kompresi uap merupakan siklus mesin pendingin yang banyak digunakan dalam penggunaan mesin pendingin. Pada mesin kompresi uap, kompresor menjadi komponen dimana kerja masuk dan digunakan untuk menaikkan suhu dan tekanan refrigeran untuk kemudian masuk ke dalam kondensor. Pelepasan panas terjadi pada komponen kondensor dimana suhu dan tekanan refrigeran tinggi sehingga terjadi perubahan fase refrigeran dari uap menjadi fase cair. Setelah dari kondensor diteruskan ke katup ekspansi dimana pada katup ini tekanan refrigeran diturunkan sehingga temperatur menjadi turun agar terjadi pemasukan kalor pada evaporator. Kalor masuk pada komponen evaporator dimana refrigeran di dalam evaporator bertekanan dan bersuhu rendah. Di dalam evaporator terdapat perubahan fase refrigeran dari fase cair menjadi fase uap.

Mesin pendingin kompresi uap dipilih untuk digunakan karena:

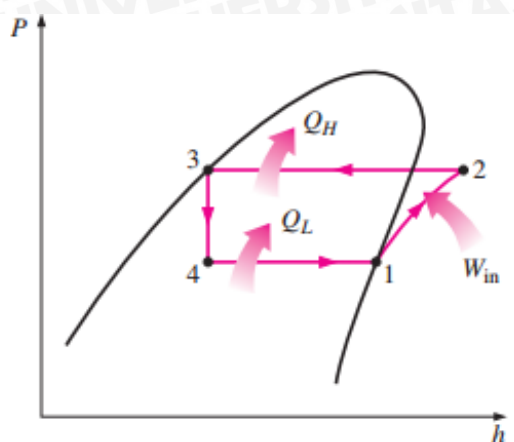
1. Penggunaannya mudah dan tahan lama
2. Konstruksinya sederhana
3. Mudah diperbaiki bila terjadi kerusakan

Instalasi mesin pendingin kompresi uap ditunjukkan pada Gambar 2.3 di bawah ini:



Gambar 2.3 Diagram aliran mesin pendingin siklus kompresi uap
Sumber : Stoecker (1996:187)

Daur kompresi uap standar dalam diagram tekanan-entalpi (p-h diagram) ditunjukkan oleh Gambar 2.4 sebagai berikut:



Gambar 2.4 Daur kompresi uap standar dalam diagram tekanan-entalpi
Sumber : Cengel (2009:612)

Keterangan gambar:

- a. Proses 1-2: Proses peningkatan tekanan (kompresi) secara isentropik pada komponen kompresor, sehingga:

$$s_1 = s_2 \quad (2.3)$$

Di dalam proses ini, temperatur, tekanan dan entalpi refrigeran naik. Fase refrigeran juga mengalami perubahan dari fase uap jenuh kering menjadi uap panas lanjut.

- b. Proses 2-3: Proses pengeluaran panas secara isobarik, sehingga:

$$P_2 = P_3 \quad (2.4)$$

Pada proses ini terjadi penurunan panas lanjut (*desuperheating*) dan terjadi pengembunan pada refrigeran. Di dalam proses ini temperatur dan entalpi refrigeran turun lalu refrigeran mengalami perubahan fase dari fase uap panas lanjut menjadi cair jenuh.

- c. Proses 3-4: Proses penurunan tekanan secara isoentalpi dimana tekanan dan temperatur refrigeran turun lalu refrigeran mengalami perubahan fase dari fase cair menjadi fase campuran. Proses penghambatan (*throttling process*) pada mesin pendingin terjadi pada katup ekspansi atau pipa kapiler. Pada proses ini berlangsung secara isoentalpi, sehingga:

$$h_3 = h_4 \quad (2.5)$$

- d. Proses 4-1: Proses penambahan panas pada tekanan konstan (*isobarik*), sehingga:

$$P_4 = P_1 \quad (2.6)$$

Pada proses ini refrigeran mengalami kenaikan temperatur dan entalpi sehingga refrigeran mengalami perubahan fase dari fase campuran menjadi uap jenuh kering.

Istilah-istilah penting pada mesin pendingin adalah sebagai berikut:

- a. Efek refrigerasi

Efek refrigerasi adalah banyaknya kalor yang diserap oleh evaporator setiap satuan massa refrigeran untuk menghasilkan efek pendinginan.

$$q_e = (h_1 - h_4) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2.7)$$

- b. Kerja kompresi

Kerja kompresi adalah banyaknya kalor yang dikompresikan kompresor setiap satuan massa refrigeran (kJ/kg).

$$w = \dot{m} (h_1 - h_2) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2.8)$$

dimana:

k = konstanta adiabatik = 1,33

T_1 = temperatur refrigeran masuk kompresor [$^{\circ}\text{C}$]

P_2 = tekanan refrigeran keluar kompresor [kPa]

P_1 = tekanan refrigeran masuk kompresor [kPa]

R = konstanta gas universal [kJ/kmol.K]

Berat molekul refrigeran MC-22 = 44,11

Konstanta gas refrigeran $R = 8,314/86,5 = 0,096$ [kJ.kg⁻¹.K]

- c. Kapasitas pendinginan

Kapasitas pendinginan adalah kemampuan mesin pendingin untuk menyerap kalor persatuan waktu. Penyerapan kalor ini terjadi di evaporator. Besarnya kapasitas pendinginan (Q_1 atau Q_{ref}) adalah:

$$Q_{ref} = \dot{m} (h_1 - h_4) \quad [\text{kW}] \quad (2.9)$$

- d. Kerja kompresi

Kerja kompresi adalah banyaknya kalor yang dikompresikan kompresor setiap satuan massa refrigeran (kJ/kg).

$$W = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot [(P_2/P_1)^{k-1/k} - 1] \quad [\text{kJ.kg}^{-1}] \quad (2.10)$$

dimana:

T_1 = temperatur refrigeran masuk kompresor [$^{\circ}\text{C}$]

P_2 = tekanan refrigeran keluar kompresor [kPa]

P_1 = tekanan refrigeran masuk kompresor [kPa]

R = konstanta gas universal [$\text{kJ.kmol}^{-1}.\text{K}$]

Berat molekul refrigeran MC-22 = 44,11

Konstanta gas refrigeran $R = 8,314/44,11 = 0,188$ [$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}$]

e. Koefisien prestasi

Istilah prestasi di dalam siklus refrigerasi disebut dengan koefisien prestasi (KP) atau *COP* (*coefficient of performance*), yang dirumuskan sebagai berikut:

$$KP = \frac{q_1}{W} = \frac{h_1 - h_4}{\frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot [(P_2/P_1)^{k-1/k} - 1]} \quad (2.11)$$

Siklus mesin pendingin yang dijelaskan pada gambar 2.1 dan gambar 2.2 dimana proses bermula dari kompresor yang menaikkan tekanan refrigeran ke dalam kondensor, di kondensor kemudian panas refrigeran dibuang sehingga mengakibatkan perubahan fase refrigeran menjadi cair jenuh. Setelah kondensor, refrigeran masuk ke katup ekspansi kemudian diekspansikan (dikabutkan) sehingga temperatur nya turun, disini refrigeran akan berubah fase dari cair menjadi fase campuran. Kemudian refrigeran masuk ke evaporator, dengan temperatur refrigeran yang sudah rendah maka mampu evaporator menyerap kalor yang akan didinginkan. Proses 1-2 adalah kompresi secara isentropik pada garis entropi konstan, dari uap jenuh kering hingga ke tekanan pengembunan refrigeran. Proses 2-3 adalah proses pelepasan kalor dengan tekanan konstan (isobarik), yang merupakan garis horisontal pada diagram tekanan-entalpi (p-h). Proses ekspansi pada titik 3-4 memiliki nilai entalpi tetap, karena tegak lurus dengan sumbu entalpi pada diagram (p-h). Proses 4-1 merupakan garis lurus horisontal karena aliran refrigeran melewati evaporator dianggap isobarik.

2.4.2 Komponen-komponen Penting Pada Mesin Pendingin

Pada mesin pendingin sistem kompresi uap terdapat empat komponen penting yang menjadi penunjang dari sistem refrigerasi, yaitu:

1. Kompresor

Kompresor mempunyai bermacam-macam jenis, tetapi pada umumnya dibagi menjadi dua, yaitu:

- a. Kompresor dinamis, dimana gas dihisap masuk dipercepat alirannya oleh sebuah impeller yang kemudian mengubah energi kinetik untuk menaikkan tekanan.
- b. Kompresor langkah positif, dimana gas dihisap masuk ke dalam silinder dan dikompresikan.

Fungsi kompresor antara lain:

- a. Menaikkan tekanan refrigeran sehingga refrigeran dapat terkondensasi pada kondisi lingkungan
- b. Membuat refrigeran bersirkulasi
- c. Menyedot gas bertekanan dan bertemperatur rendah yang keluar dari evaporator, kemudian menekan gas tersebut menjadi gas yang bertekanan dan bertemperatur tinggi, lalu dialirkan ke kondensor. Dalam penelitian ini menggunakan AC dengan kompresor jenis hermetik rotari, dimana pada kompresor hermetik, motor dan kompresor dimasukkan bersama dalam rumah kompresor. Rumah kompresor ini terbuat dari baja dan dilas sehingga tidak dapat dibuka seperti terlihat pada gambar 2.5 dibawah ini:



Gambar 2.5. Kompresor hermetik jenis rotari
Sumber : Dokumentasi pribadi

Daya kompresi teoritik adalah maasa alir refrigeran dikali dengan selisih antara entalpi keluar refrigeran dan entalpi masuk, sedangkan daya aktual dapat dilihat pada inputan daya mesin berupa tegangan dikali arus listriknya. Efisiensi kompresor pada umumnya lebih rendah dibandingkan dengan kondisi idealnya. Hal tersebut terjadi dikarenakan adanya gesekan pada permukaan bagian-bagian komponen kompresor yang bergerak serta penurunan tekanan pada katupnya.

Kerja kompresi merupakan perubahan entalpi pada proses 1-2 atau h_1 ke h_2 . Hubungan ini diturunkan dari persamaan aliran energi

$$h_1 + q = h_2 + w \quad (2.12)$$

Karena proses kompresi berjalan secara adiabatik yaitu nilai $q = \text{nol}$ sehingga persamaan menjadi :

$$w = h_1 - h_2 \text{ [kJ.kg}^{-1}\text{]} \quad (2.13)$$

dengan:

h_1 = Entalpi refrigeran pada daerah saturasi uap [kJ.kg⁻¹]

h_2 = Entalpi refrigeran pada daerah panas lanjut [kJ.kg⁻¹]

Perbedaan entalpi merupakan besaran negatif yang menunjukkan bahwa kerja diberikan pada sistem. Semakin besar massa refrigeran yang dimasukkan ke dalam ruang kompresi silinder yang melalui katup isap akan menyebabkan bertambahnya massa refrigeran di dalam silinder. Hal tersebut mengakibatkan tekanan untuk mengeluarkan massa refrigeran menjadi semakin besar. Sehingga menyebabkan daya kompresor (konsumsi listrik) yang menjadi semakin besar. Untuk menghasilkan daya kompresor yang besar dibutuhkan torsi dan putaran lengan torak yang semakin besar.

Koefisien prestasi mesin pendingin didapatkan dari efek refrigerasi dibandingkan kerja kompresor, dimana laju alir volume per-satuan kapasitas refrigerasi merupakan pertanda ukuran fisik atau kecepatan kompresor yang dibutuhkan untuk menghasilkan 1 kW refrigerasi

2. Kondensor

Kondensor adalah komponen mesin pendingin yang berfungsi untuk mengeluarkan panas (Q_{out}), suhu kondensor lebih tinggi daripada suhu lingkungan sehingga terjadi perpindahan panas dan biasanya dipercepat perpindahan panasnya dengan menambahkan prinsip konveksi paksa. Di kondensor terjadi perubahan fase refrigeran dari uap panas lanjut menjadi fase cair jenuh. Bentuk kondensor dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Kondensor
Sumber : Dokumentasi Pribadi

Untuk meningkatkan perpindahan panas yang terjadi pada kondensor umumnya diberikan kipas atau *blower* sebagai pendingin dengan menggunakan udara sekitar. Di permukaan kondensor biasanya terdapat tambahan sirip-sirip atau kawat sebagai penambahan luas permukaan kondensor yang juga berfungsi untuk mempercepat terjadinya perpindahan panas. Pada kondensor, kondisi refrigeran berada pada tekanan dan temperatur tinggi setelah tekanannya ditingkatkan oleh kompresor. Besar kalor yang dilepas dari kondensor tiap detiknya oleh uap refrigeran ke udara sama dengan besar selisih entalpi refrigeran pada sisi masuk dan pada sisi keluar kondensor dikali dengan laju aliran massanya. Pelepasan kalor dalam kilo joule per kilogram adalah perpindahan kalor dari refrigeran pada proses 2-3, sesuai persamaan berikut:

$$h_3 + q_c = h_2 + w \quad (2.14)$$

karena tidak dilakukan kerja maka:

$$q_c = h_2 - h_3 \quad (2.15)$$

dengan:

q_c = Pelepasan kalor terjadi dari kondensor [kJ.kg⁻¹]

h_3 = Entalpi refrigeran pada daerah saturasi cair [kJ.kg⁻¹]

4. Alat Ekspansi

Alat ekspansi merupakan komponen mesin pendingin yang fungsinya untuk menurunkan tekanan refrigeran sehingga terjadi penurunan suhu, disini terjadi perubahan fase refrigeran dari cair jenuh menjadi fase campuran. Alat ekspansi ada yang berupa katup dan ada juga yang berupa pipa kapiler. Pipa kapiler terbuat dari tembaga yang diameter dalam lubang yang sangat kecil. Sehingga pada pipa kapiler terjadi resistensi (hambatan) yang mengakibatkan *pressure drop* penurunan tekanan ini yang menyebabkan penurunan suhu. Panjang dan lubang pipa kapiler dapat mengontrol banyaknya refrigeran yang masuk evaporator. Tekanan dan temperatur refrigeran cair dari kondensor sangat tinggi untuk terjadi proses penguapan di evaporator dalam kondisi ruangan, sehingga digunakan pipa kapiler (*liquid control device*) yang bekerja sebagai suatu hambatan terhadap aliran refrigeran. Tahanan tersebut sebagian kecil refrigeran menguap (*flash gas*). Pipa kapiler (*capillary tube*) berguna untuk :

- Menurunkan tekanan refrigeran cair.
- Mengatur besar tekanan refrigeran.

c. Menjaga beda tekanan pada kondensor dan evaporator.

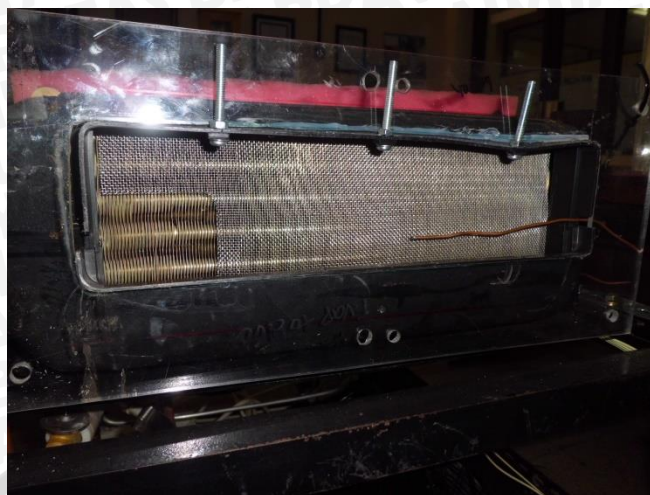
Alat ekspansi yang banyak digunakan adalah katup ekspansi termostatik dan pipa kapiler. Katup ekspansi termostatik adalah katup ekspansi berkendali panas lanjut yang fungsinya agar refrigeran yang masuk evaporator sesuai dengan beban pendingin yang harus dilayani dengan menempatkan sensornya pada permukaan pipa keluaran evaporator sehingga sensor akan membaca jumlah massa alir refrigeran yang harus dialirkan sesuai dengan beban pendinginan yang harus diserap pada evaporator. Pipa kapiler adalah alat ekspansi yang memanfaatkan tahanan gesek refrigeran terhadap permukaan pipa, sehingga tekanan refrigeran turun. Pipa kapiler mempunyai diameter yang kecil (0,031 – 0,054 inch) dengan panjang 5 – 20 ft. Pipa kapiler digunakan karena kemudahan dan harganya yang relatif murah dibandingkan katup ekspansi. Katup ekspansi dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Alat ekspansi
Sumber : Dokumentasi Pribadi

4. Evaporator

Evaporator adalah komponen mesin pendingin yang berfungsi untuk memasukkan kalor (Q_{in}) sehingga terjadi penambahan entalpi pada evaporator. Sama seperti di kondensor, di evaporator juga terdapat prinsip konveksi paksa serta ditambahi sirip plat atau kawat untuk meningkatkan terjadinya perpindahan panas dari lingkungan ke dalam evaporator. Bentuk evaporator dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Evaporator

Sumber : Dokumentasi Pribadi

<http://www.maniacelectricmotors.com/acevfor193a.html>

Di dalam evapoator, refrigeran fase campuran dari kondensor harus dirubah kembali menjadi uap jenuh di dalam evaporator, sehingga evaporator harus menyerap kalor. Agar penyerapan panas ini dapat berlangsung dengan baik maka pipa-pipa evaporator juga diperluas permukaannya dengan memberi kisi-kisi (elemen) berupa sirip plat atau kawat dan kipas listrik (*blower*), supaya udara dingin juga dapat dihembuskan ke dalam ruangan.

Di bagian bawah evaporator terdapat saluran atau pipa untuk keluarnya air kondensasi yang terjadi akibat penyerapan kalor dari udara yang mengumpul disekitar evaporator sehingga udara mengalami penurunan kelembaban.

Pada evaporator, jumlah kalor yang diserap oleh refrigeran adalah selisih entalpi refrigeran pada sisi keluar evaporator dan sisi masuk evaporator. Hal tersebut dapat dilihat pada persamaan aliran energi, dimana energi kinetik, energi potensial dan kerja diabaikan sehingga persamaannya menjadi sebagai berikut:

$$q_e = h_1 - h_4 \quad (2.16)$$

dengan:

q_e = Penyerapan kalor oleh refrigeran dalam evaporator [kJ.kg⁻¹]

h_1 = Entalpi refrigeran pada daerah saturasi uap [kJ.kg⁻¹]

h_4 = Entalpi refrigeran pada daerah campuran [kJ.kg⁻¹]

Pada evaporator terjadi dampak atau efek pendinginan yang apabila dikalikan dengan laju aliran masa refrigeran akan merupakan nilai dari kapasitas refrigerasi atau pendinginan untuk AC dan bila efek refrigerasi dibagi dengan kerja kompresor maka akan menghasilkan koefisien prestasi mesin pendingin.

2.5 Sifat Termodinamika

Bagian penting dalam menganalisis sistem termal adalah penentuan sifat termodinamika yang bersangkutan. Suatu sifat adalah setiap karakteristik atau ciri dari bahan yang dapat dijabari secara kualitatif, seperti suhu, tekanan, dan rapat massa (Stoecker 1996:14). Sifat-sifat termodinamika yang paling penting dalam penelitian ini adalah:

1. Temperatur

Temperatur (t) dari suatu bahan menyatakan keadaan termalnya dan kemampuannya untuk bertukar energi dengan bahan lain yang bersentuhan dengannya. Jadi, suatu bahan yang bersuhu lebih tinggi akan memberikan energi kepada bahan lain yang temperaturnya lebih rendah. Titik acuan bagi skala Celcius adalah titik beku air (0°C) dan titik didih air (100°C). Temperatur absolut (T) adalah derajat di atas temperatur nol absolut yang dinyatakan dengan Kelvin (K), yaitu $T = t^{\circ}\text{C} + 273$.

2. Tekanan

Tekanan (p) adalah gaya normal (tegak lurus) yang diberikan oleh suatu fluida per satuan luas benda yang terkena gaya tersebut. Tekanan absolut adalah ukuran tekanan diatas nol (tekanan yang sebenarnya yang berada diatas nol). Tekanan pengukuran (*gauge pressure*) adalah tekanan yang diukur di atas tekanan atmosfer suatu tempat (nol tekanan pengukuran sama dengan tekanan atmosfer di tempat tersebut). Satuan yang dipakai untuk tekanan adalah Newton per-meter kuadrat (N/m^2), juga disebut pascal (Pa). Tekanan atmosfer standar adalah 101.325 [Pa].

3. Rapat massa dan volume spesifik

Rapat massa (ρ) dari suatu fluida adalah massa yang mengisi satu satuan volume, sebaliknya volume spesifik (v) adalah volume yang diisi oleh satu satuan massa. Rapat massa dan volume spesifik saling berkaitan satu sama lain. Rapat massa udara pada tekanan atmosfer standar dengan suhu 25°C mendekati 1,2 [kg/m^3].

4. Kalor spesifik

Kalor spesifik dari suatu bahan adalah jumlah energi yang diperlukan untuk menaikkan suhu satu satuan massa bahan tersebut sebesar 1°K . Oleh karena besaran ini dipengaruhi oleh cara proses berlangsung, maka cara kalor ditambahkan atau

dilepaskan harus disebutkan. Dua besaran yang umum adalah kalor spesifik pada 8volume tetap (c_v) dan kalor spesifik pada tekanan tetap (c_p). Besaran yang kedua (c_p) lebih banyak berguna bagi kita karena banyak dipakai pada proses pemanasan dan pendinginan dalam teknik refrigerasi dan pengkondisian udara.

Nilai pendekatan untuk kalor spesifik dari beberapa bahan yang penting adalah sebagai berikut:

$$c_p = \begin{cases} 1,0 \text{ [kJ.kg}^{-1}\text{.K]} & \text{udara kering} \\ 4,19 \text{ [kJ.kg}^{-1}\text{.K]} & \text{air} \\ 1,88 \text{ [kJ.kg}^{-1}\text{.K]} & \text{uap air} \end{cases}$$

5. Entalpi

Entalpi spesifik (h) adalah energi kalor yang dimiliki suatu bahan per satuan massa [kJ/kg]. Suatu perubahan entalpi (Δh) dalam [kJ.kg⁻¹] adalah energi kalor yang ditambahkan atau diambil per satuan massa melalui proses-proses tertentu. Sifat entalpi dapat juga menyatakan efek pemindahan kalor untuk proses penguapan dan pengembunan.

6. Entropi

Entropi spesifik (s) adalah energi kalor yang dibutuhkan untuk menaikkan 1° temperatur setiap satuan massa [kJ.kg⁻¹.°K] . Dua sifat dari entropi adalah sebagai berikut:

- Jika suatu gas atau uap ditekan atau diekspansikan tanpa gesekan dan tanpa penambahan atau pelepasan kalor selama proses berlangsung maka entropi bahan tersebut tetap.
- Dalam proses yang disebutkan dalam butir a, perubahan entalpi menyatakan jumlah kerja per satuan massa yang diperlukan oleh proses penekanan atau yang dilepaskan oleh proses ekspansi tersebut.

2.6 Psikrometri

Psikrometri adalah ilmu yang membahas tentang sifat-sifat udara lembab. Sifat termal dari udara basah pada umumnya ditunjukkan dengan mempergunakan diagram psikometri. Psikrometri merupakan kajian tentang sifat-sifat campuran udara dan uap air. Psikrometri mempunyai arti penting dalam teknik pengkondisian udara, karena udara atmosfer tidak sepenuhnya kering melainkan merupakan campuran antara udara dan uap air. Dalam hal tersebut dipakai beberapa istilah dan simbol sebagai berikut:

1. Temperatur bola kering

Temperatur bola kering dapat dibaca pada termometer dengan sensor kering dan terbuka. Namun, penunjukannya tidaklah tepat karena adanya pengaruh radiasi panas, kecuali jika sensornya memperoleh ventilasi yang cukup baik.

2. Temperatur bola basah

Dalam hal ini digunakan termometer dengan sensor yang dibalut dengan kain basah untuk menghilangkan pengaruh radiasi panas. Namun perlu diperhatikan bahwa melalui sensor harus terjadi aliran udara sekurang-kurangnya 5 m/s. Temperatur bola basah kadang-kadang dinamai temperatur jenuh adiabatik (*adiabatic saturated temperature*).

3. Rasio kelembaban (*humidity ratio*)

Rasio kelembaban (W) adalah berat atau massa air yang terkandung dalam setiap kilogram udara kering. Dalam teknik pengkondisian udara, untuk menghitung rasio kelembaban dapat digunakan persamaan gas ideal. Jadi uap air dan udara dapat dianggap sebagai gas ideal, sehingga mengikuti persamaan $p_v = RT$ serta memiliki kalor spesifik yang tetap. Dengan demikian diperoleh persamaan untuk rasio kelembaban sebagai berikut:

$$W = 0,622 \frac{p_s}{p_t - p_s} \quad (2.17)$$

dengan:

- W = Rasio kelembaban [kg udara/kg udara kering]
- p_t = Tekanan atmosfer, dimana $p_t = p_a + p_s$ [Pa]
- p_s = Tekanan parsial uap air [Pa]
- p_a = Tekanan parsial udara kering [Pa]

4. Kelembaban relatif (ϕ)

Kelembaban relatif (ϕ) didefinisikan sebagai perbandingan fraksi molekul uap air di dalam udara basah terhadap fraksi molekul uap air jenuh pada suhu dan tekanan yang sama. Kelembaban relatif (ϕ) dapat dinyatakan dengan:

$$\phi = \frac{p_s}{p_w} \quad (2.18)$$

dengan:

- ϕ = Kelembaban relatif

p_s = Tekanan uap air parsial

P_w = Tekanan jenuh air murni pada suhu yang sama

5. Volume spesifik

Volume spesifik adalah volume udara campuran dengan satuan meter kubik per kilogram udara kering. Dapat dikatakan sebagai meter kubik campuran per kilogram udara kering, karena volume yang diisi oleh masing-masing substansi sama.

Dari persamaan gas ideal, volume spesifik (v) adalah:

$$v = \frac{R_a T}{p_t - p_s} \quad (2.19)$$

dengan:

v = Volume spesifik $[m^3.kg^{-1}]$

R_a = Tetapan gas untuk udara kering $[J.kg^{-1}.K]$

p_t = Tekanan atmosfer $[Pa]$

p_s = Tekanan parsial uap air $[Pa]$

6. Titik embun

Titik embun adalah temperatur air pada keadaan dimana tekanan uapnya sama dengan tekanan uap dari udara (lembab). Jadi, pada temperatur tersebut uap air dalam udara mulai mengembun dan hal tersebut terjadi apabila udara (lembab) didinginkan.

7. Entalpi

$$h = C_p \cdot T \quad (2.20)$$

dengan:

h = Entalpi $[kJ.kg^{-1}]$

C_p = kalor jenis $[kJ.kg^{-1} \text{ } ^\circ C]$

T = Temperatur $[^\circ C]$

2.7 Refrigeran

Refrigeran adalah fluida pembawa kalor yang bersirkulasi di dalam mesin pendingin yang dapat berubah fase dari gas menjadi cair atau sebaliknya. Untuk sistem refrigerasi kompresi uap, refrigeran menyerap panas di dalam evaporator pada temperatur dan tekanan rendah serta melepaskan panas pada kondensor pada tekanan serta temperatur tinggi.

2.7.1 Refrigeran Musicool (MC-22)

Musicool adalah refrigeran hidrokarbon produksi PT. Pertamina yang ramah lingkungan karena tidak menyebabkan kerusakan ozon ataupun efek rumah kaca yang menyebabkan pemanasan global. Banyak jenis refrigeran terutama refrigeran sintetis CFC – HCFC yang merupakan bahan perusak ozon dan dapat menimbulkan efek rumah kaca. Musicool 22 biasa digunakan untuk *AC Window*, *AC Split* dan sejenisnya. Keuntungan menggunakan MUSICOOL 22 adalah:

1. Tidak memerlukan penggantian komponen
2. Tidak memerlukan penggantian oli / pelumas
3. Jumlah pengisian media pendingin hanya 30% dari jumlah media pendingin CFC maupun HFC
4. Menurunkan aliran listrik rata-rata 18 - 23%
5. Menambah umur pemakaian kompresor
6. Pencapaian temperatur dingin lebih cepat
7. Momen torque terhadap motor listrik penggerak kompresor menjadi turun
8. Pada kompresor 1 phase, saat dilakukan penyalaan tidak memerlukan bantuan "*starting capasitor*"
9. Tidak merusak lapisan ozon
10. Tidak meningkatkan pemanasan global

Tabel 2.1 Parameter Lingkungan Refrigeran

No	Parameter	R-12	R-22	R-134	HC
1	Ozon Depletion Potential (ODP)	1,0	0,06	0	0
2	Global Warming Potential (GWP)	1500	510	420	3
3	Atsmosfer Life Time (ALT)	130	15	16	<1

Sumber: Nugraha, Ganjar & Hidayat, Komara. 2005

Tabel 2.2 Komposisi Refrigeran Musicool

Composition	MC-22	MC-12	MC-134	MC-600
Ethane, % wt	< 0,5	Traces	traces	traces
Propane, % wt	> 99,5	*	**	< 0,3
i- Butane, % wt	< 0,3	*	**	> 99,5
n-Butane, % wt	< 0,3	*	**	< 0,5
Pentane	< 100 ppm	< 100 ppm	< 100 ppm	< 0,3% wt
n-Hexane	< 50 ppm	< 50 ppm	< 50 ppm	< 50 ppm
Olefins	< 0,03% wt	< 0,03% wt	< 0,03% wt	< 0,03% wt
Water Content	< 10 ppm	< 10 ppm	< 10 ppm	< 10 ppm
Sulphur Content	< 2 ppm	< 2 ppm	< 2 ppm	< 2 ppm

Sumber: Nugraha, Ganjar & Hidayat, Komara. 2005

Refrigeran hidrokarbon Musicool juga sudah mengikuti prosedur keamanan dan keselamatan pada :

- **British Standard/BS 4434** : 1995 *safety and environmental aspect in the design, construction and installation of refrigerating system and appliances.*
- **AS/NZS-1677** : *refrigeration and air Conditioning safety for the use of all refrigerant, including hidrocarbons.*
- **Standar Nasional Indonesia (SNI)**
 - **SNI 06-6500-2000** : Aturan Keamanan Penggunaan Refrigeran pada Instalasi Tetap.
 - **SNI 06-6511-2000** : Pedoman Keamanan Pengisian, Penyimpanan dan Transportasi Refrigeran Hidrokarbon.
 - **SNI 06-6512-2000** : Pedoman Praktis Pemakaian Refrigeran Hidrokarbon Pada mesin Tata Udara Kendaraan Bermotor.

2.8 Thermoelectric

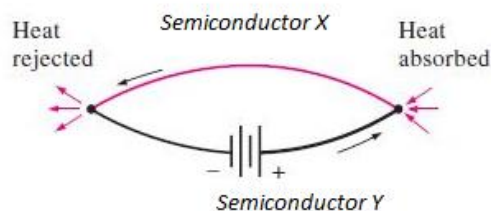
Thermoelectric merupakan suatu komponen yang memanfaatkan efek Peltier dimana arus yang mengalir pada pertemuan dua semikonduktor dari bahan *Bismuth Telluride* (Bi_2Te_3) sebagai semikonduktor tipe – p dan *Antimony Telluride* (Sb_2Te_3) sebagai semikonduktor tipe – n akan menghasilkan pemasukan kalor pada titik pertemuannya dan terjadi pengeluaran kalor pada sisi pertemuan yang lainnya. Efek Peltier dapat dinyatakan dengan:

$$Q_c = Q_h = \pi_{XY} \times I_{XY} \quad (2.21)$$

Sumber: Swapnil S. Khode (2015)

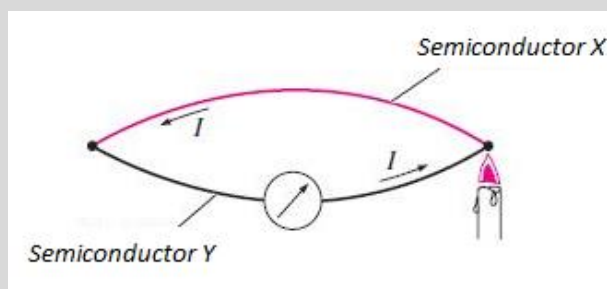
keterangan :

π_{XY}	= Koefisien Peltier antara dua semikonduktor, X dan Y (Volt)
I_{XY}	= Arus listrik yang mengalir (Ampere)
Q_c, Q_h	= Tingkat pendinginan atau pemanasan (Watt)



Gambar 2.9 Efek Peltier
Sumber : Cengel (2009:634)

Pada saat pertemuan dua semikonduktor yang berbeda di beri perlakuan pemanasan dan pendingin pada kedua sisi yang berlawanan, maka akan menghasilkan arus listrik searah disepanjang kedua logam tersebut (efek Seebeck).



Gambar 2.10 Efek Seebeck
Sumber : Cengel (2009:634)

Efek Seebeck dapat dinyatakan dengan:

$$V_0 = \alpha_{XY} (T_h - T_c) \quad (2.22)$$

Sumber: Swapnil S. Khode (2015)

keterangan :

V_0 = Tegangan keluaran (Volt)

α_{XY} = Koefisien Seebeck antara dua material, X dan Y, (Volt/K)

T_h, T_c = Temperatur termokopel panas dan dingin (K)

Efek Thompson adalah ketika suatu arus listrik dilewatkan melalui suatu konduktor yang memiliki gradien temperatur melebihi panjangnya, kalor hanya akan diserap oleh semikonduktor atau dilepaskan dari semikonduktor (hanya salah satu, diserap atau dilepas, tidak keduanya). Apakah kalor diserap atau dilepaskan tergantung pada arah arus listrik dan gradien temperatur. Sedangkan nilai kalor yang dilepas atau diserap tersebut untuk setiap satuan panjangnya adalah :

$$Q_{\tau} = \tau \times I \times \frac{dT}{dX} \quad (2.23)$$

Sumber: Swapnil S. Khode (2015)

keterangan :

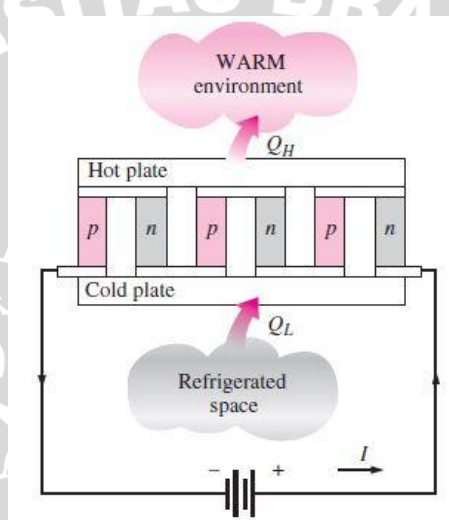
Q_{τ} = Jumlah kalor yang diserap atau dilepaskan persatuan panjang (W/m)

τ = Koefisien Thomson (Volt/K)

I = Arus listrik yang mengalir (A)

T = Temperatur (K)

X = Panjang semikonduktor (m)



Gambar 2.11 Skema *thermoelectric modern*

Sumber : Cengel (2009:636)

Thermoelectric sekarang sudah diproduksi dalam bentuk kepingan modul tipis yang sudah dipaketkan dan dilengkapi dengan kabel positif dan negatif. Pada rangkaian *thermoelectric* terdapat tiga macam gaya gerak listrik (ggl, *emf* = *electro motive force*), yaitu ggl Seebeck, yang disebabkan oleh dua material logam yang berbeda, ggl Peltier yang disebabkan arus yang mengalir di dalam rangkaian, serta ggl Thomson. Efektivitas *thermoelectric cooler* ditentukan oleh nilai *figure of merit* (ZT). Dimana nilai ZT dapat dirumuskan dengan:

$$ZT = \frac{TS^2}{\rho\kappa} \quad (2.24)$$

Sumber: Prof. A. M. Patil (2013)

Keterangan:

S = *thermopower* (Volt/K)

ρ = electrical resistivity (Ωcm)

κ = thermal conductivity (W/cmK)

T = temperature (K)

2.9 Hipotesis

Penambahan *thermoelectric cooler* sebelum evaporator akan menyebabkan temperatur udara keluar evaporator semakin rendah sehingga kelembapan relatif menjadi semakin rendah, namun koefisien prestasi mesin pendingin menurun sesuai dengan teori dimana efek refrigerasi berbanding terbalik dengan kerja kompresor dan semakin kecil kapasitas pendinginan akan semakin kecil sehingga koefisien prestasi akan berkurang seiring berkurangnya efek refrigerasi yang terjadi akibat kalor yang diserap oleh *thermoelectric cooler*

