

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Untuk menganalisis sistem pengkondisian udara (AC) berdasarkan analisis energi dan standar VDMA 24247-2 (*Verband Deutscher Maschinen-und Anlagenbau e.V.*) dibutuhkan beberapa hubungan matematis. Dengan melalui hubungan matematis ini maka akan diketahui nilai kinerja energi dalam berbagai komponen dan juga dapat membandingkan dengan refrigeran yang berbeda berdasarkan parameter energi.

Model berbasis siklus refrigerasi yang disederhanakan telah diterapkan dalam penelitian ini, yang mana mempertimbangkan empat komponen utama mesin pendingin (evaporator, kompresor, kondensor dan katup ekspansi) dalam hal termodinamika dan hubungan perpindahan panas.

2.1 AC INVERTER

Teknologi inverter sudah umum dipakai industri dalam proses produksi dengan tujuan lebih cepat, lebih hemat dan lebih akurat, tetapi harga lebih mahal. Dan teknologi ini digunakan juga dalam bidang AC, yang memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan AC konvensional.

AC inverter adalah teknologi hemat energi terbaru yang mengeliminasi proses yang tidak diperlukan pada sistem pendingin dengan cara mengontrol kecepatan motor secara efisien. Sebaliknya, AC tipe non-inverter memiliki kecepatan motor yang konstan dan temperatur diatur dengan menghidupkan dan mematikan motor kompresor. AC inverter mampu mengubah kecepatan putaran motor kompresor untuk menyesuaikan temperatur dalam ruangan. Saat temperatur disetting lebih rendah (lebih dingin), putaran motor kompresor otomatis akan lebih cepat. Sebaliknya, ketika temperatur dinaikkan, putaran motor akan melambat.

Perbedaan utama antara unit AC inverter dan unit non-inverter adalah kecepatan kompresor. Untuk menghemat konsumsi energi, unit inverter dapat menurunkan kecepatan kompresornya setelah temperatur ruangan mencapai suhu

yang disetting pada termostat. Hal ini berbeda dari kecepatan kompresor unit AC non-inverter, yang mana kondisinya tetap pada satu kecepatan konstan selama penggunaan walaupun ruangan telah didinginkan hingga mencapai temperatur yang disetting.

Ada banyak faktor yang dapat diperhatikan pada sistem AC inverter, seperti: efisiensi, *noise*, hemat energi, dan lain sebagainya. Di bawah ini beberapa kelebihan AC inverter yang membuat lebih unggul dari AC non-inverter:

1) Efisiensi Energi

Pada AC non inverter, masih dapat terdengar suara on/off kompresor. Setiap kali kompresor menyala, motor akan menarik sebagian besar daya listrik. Sebaliknya, AC inverter mengubah daya AC menjadi daya DC sehingga frekuensi motor dapat diatur sesuai dengan kebutuhan temperatur ruangan. Karena inilah, AC inverter lebih hemat energi.

2) Bising

AC Inverter dirancang untuk ramah terhadap lingkungan seperti kebisingan. Disini AC Inverter dirancang untuk menekan tingkat kebisingan akibat motor kompresor yang terus berputar. AC inverter telah dirancang untuk berputar pada putaran yang lebih ringan, karena harus dapat berputar dengan arus DC. Karena berputar lebih ringan, maka suara yang dihasilkan juga lebih halus. Berbeda dengan AC konvensional yang mengandalkan arus AC, sehingga setiap kali memulai siklus start-stop, motor kompresor akan memulai bekerja dengan beban yang lebih berat.

3) Pendinginan Lebih Cepat

AC non inverter harus mematikan dan menyalakan mesin kompresor agar bisa menyamakan temperatur AC dengan temperatur yang disetting. Karena itu, AC non inverter membutuhkan waktu lebih lama untuk bisa mencapai suhu yang sesuai. Berbeda dengan AC Inverter yang memberikan pendinginan dalam waktu yang sangat singkat karena frekuensi kompresor akan mengikuti temperatur yang disetting.

4) Temperatur

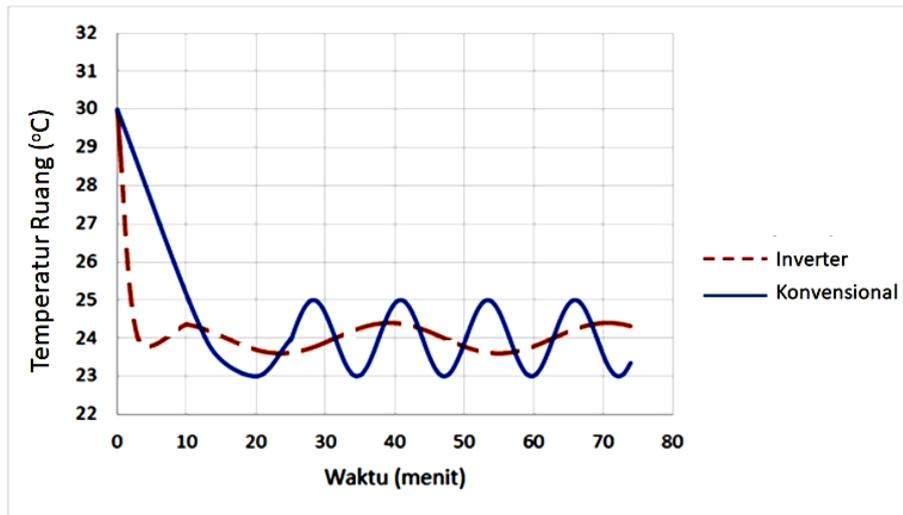
Pada AC non inverter, ketika temperatur yang disetel tercapai, kompresor akan mati. Setelah itu, kompresor akan menyala lagi ketika temperatur turun beberapa derajat di bawah temperatur yang disetting. Hal ini menyebabkan fluktuasi pada temperatur ruangan. Inverter AC, di sisi lain, memiliki kompresor yang menyesuaikan kecepatan putaran motornya untuk mempertahankan temperatur yang disetting, sehingga temperatur lebih stabil.

5) Keandalan

Salah satu alasan memilih AC inverter adalah keandalannya. Kompresor AC inverter dapat bertahan lebih lama daripada AC non inverter karena kecepatan yang tanpa fluktuasi dan stabil.

Meskipun AC Inverter umumnya lebih mahal dari segi harga beli dan perawatannya daripada AC non-inverter, pada kenyataannya dapat menghemat energi listrik lebih banyak.

Perkembangan teknologi mesin AC saat ini menggunakan motor inverter untuk menggerakkan kompresor. Kecepatan putar kompresor ini menyebabkan laju aliran masa refrigeran akan berubah. Pada beban pendinginan yang rendah, kompresor akan berputar dengan kecepatan rendah. Sedangkan pada beban pendinginan yang tinggi, kompresor akan berputar pada kecepatan putar yang tinggi. Dengan digunakannya motor *inverter*, maka kecepatan putar kompresor dapat divariasikan berdasarkan beban pendinginan. Keuntungan dengan menggunakan motor inverter suhu ruang yang dicapai tidak terlalu bervariasi terlalu besar dan operasional kompresor lebih lembut dan hemat energi. Pada gambar 2.1 dapat dilihat perbandingan operasional mesin AC dengan inverter dan konvensional (non-inverter) [Ref: 8, 9, 11, 12].



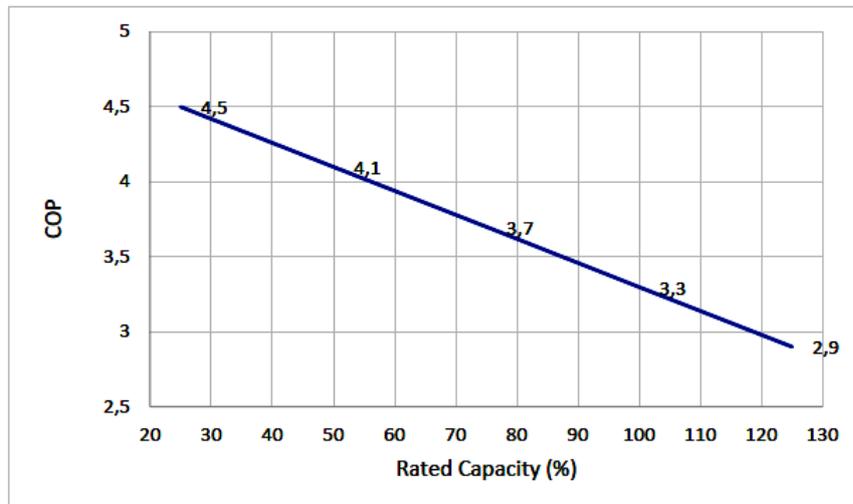
Gambar 2.1. Ilustrasi operasional AC inverter dan non-inverter (Ref. 8, 9, 11, 12)

Pada gambar 2.1 diberikan ilustrasi temperatur ruang operasional untuk AC *inverter* dengan garis merah, sedangkan AC non inverter dengan garis biru. Ilustrasi operasional ke mesin itu adalah sebagai berikut: dua buah ruang yang identik dikondisikan dengan AC inverter dan AC konvensional. Temperatur yang ingin dicapai adalah $24^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Mula-mula dua ruang yang identik mempunyai temperatur 30°C . Ruang yang dikondisikan dengan menggunakan AC inverter lebih cepat mencapai temperatur ruang yang diinginkan dibandingkan dengan ruang yang dikondisikan dengan AC konvensional.

Variasi temperatur ruang untuk ruang yang dikondisikan dengan menggunakan AC inverter lebih rendah dibandingkan dengan ruang yang dikondisikan dengan menggunakan AC konvensional. Dari pengalaman, operasional, AC inverter lebih lembut dibandingkan dengan operasional AC konvensional karena kecepatan putar dan rasio tekanan kompresor lebih rendah (Ref. 8, 9, 11, 12).

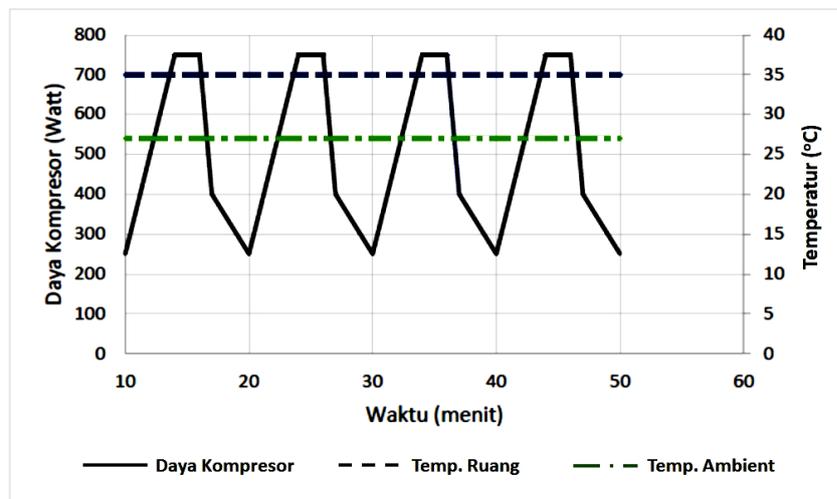
Kapasitas pendinginan untuk AC Inverter akan berubah sesuai dengan beban pendinginan yang ada. Perubahan beban pendinginan akan merubah kecepatan putar kompresor. Akibatnya daya kompresor juga akan berubah, COP pada mesin AC inverter juga akan berubah sesuai dengan beban pendinginan. COP adalah rasio kapasitas pendinginan dengan daya yang dibutuhkan

kompresor. Gambar 2.2 menunjukkan perubahan fungsi COP dengan kapasitas pendinginan. Pada kapasitas pendinginan yang rendah COP akan tinggi, sedangkan COP akan menurun dengan naiknya kapasitas pendinginan Daya kompresor vs waktu (Satya, M and Airah,M, 2017).



Gambar 2.2. COP vs Kapasitas Pendinginan Daya kompresor vs waktu (Satya, M and Airah, M, 2017)

Pada gambar 2.3 menunjukkan bahwa operasional AC *inverter* dan temperatur udara luar yang konstan dan temperatur ruang yang dicapai.



Gambar 2.3. Daya kompresor vs waktu (Satya, M and Airah,M, 2017)

Dari gambar 2.3 dapat diperoleh kebutuhan energi pada pemakaian AC dengan selang waktu tertentu. Daya listrik rata-rata diperoleh dengan menggunakan persamaan (2.1) berikut ini.

$$\dot{W} = \sum_{t=0}^{t=n} P(t) \Delta t \quad (2.1)$$

2.2 SISTEM REFRIGERASI

Secara umum sistem refrigerasi didefinisikan sebagai suatu proses perpindahan kalor. Namun lebih khusus lagi, sistem refrigerasi didefinisikan sebagai bagian dari ilmu pengetahuan yang berfungsi untuk pengkondisian temperatur di bawah temperatur ruangan. Jadi dalam hal ini terjadi proses penyerapan kalor dari suatu benda atau ruangan sehingga temperatur benda atau ruangan tersebut lebih rendah dari temperatur lingkungan sekitar. Dapat dikatakan bahwa refrigerasi merupakan penerapan dari teori perpindahan kalor dan termodinamika. Hal ini dikarenakan hampir semua proses yang terjadi (kecuali pada sistem kelistrikan) merupakan proses perpindahan kalor dan termodinamika. (S. K. Wang, 2000)

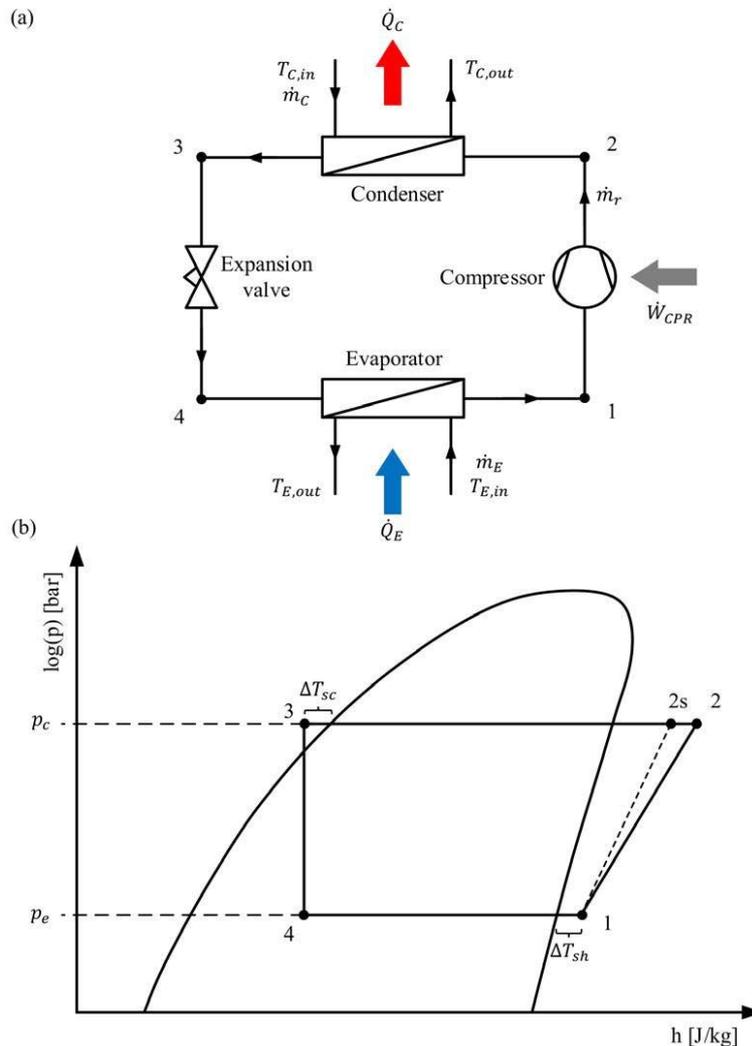
Berbagai konsep, model dan hukum termodinamika serta perpindahan kalor dikembangkan dari serangkaian konsep yang dikembangkan dari dunia fisika, model khusus dan juga hukum yang digunakan untuk memecahkan masalah dan sistem rancangan. Berdasarkan keutamaan masing-masing alat atau komponen penyusun sistem refrigerasi, komponen sistem refrigerasi secara umum dibagi menjadi dua. Komponen tersebut yaitu:

- 1) Komponen utama, terdiri dari: kompresor, kondenser, katup ekspansi, dan evaporator
- 2) Komponen pendukung, terdiri dari: komponen pendukung mekanik dan komponen pendukung kelistrikan yaitu komponen yang digunakan sebagai kontrol sistem refrigerasi. Sama halnya dengan komponen pendukung mekanik, komponen pendukung kelistrikan juga hanya sebagai penambah efisiensi dari sistem refrigerasi.

Refrigerasi disebut sebagai proses untuk mencapai dan mempertahankan temperatur di bawah atmosfer luar dengan tujuan untuk mendinginkan beberapa produk atau ruang ke temperatur yang diperlukan.

Sistem refrigerasi paling sering digunakan untuk memberikan kenyamanan termal bagi manusia sehingga pengkondisian udara dapat dimanfaatkan. Di sini, penyejuk udara dapat disebut sebagai perawatan udara untuk secara bersamaan mengontrol suhu, kadar air, kebersihan, bau dan sirkulasi yang dibutuhkan oleh beban pendinginan.

Siklus refrigerasi kompresi uap merupakan siklus yang terbanyak digunakan dalam siklus refrigerasi. Pada siklus ini udara ditekan kemudian diembunkan menjadi cairan, lalu tekananya diturunkan agar cairan tersebut dapat menguap kembali. Untuk mendinginkan suatu ruangan dan ruang tersebut harus dikenakan kepada suatu fluida yang lebih dingin dari temperatur ruang yang diinginkan. Dengan demikian energi sebagai panas dapat dipindahkan dari suatu ruang dingin ke fluida yang lebih dingin tersebut, dan keadaan ini akan mempertahankan temperatur ruang dingin tersebut terhadap perpindahan energi sebagai panas yang keluar dari lingkungan yang hangat melalui dinding ruang yang terisolasi. Pada gambar 2.4 disampaikan ilustrasi siklus refrigerasi kompresi uap.



Gambar 2.4. Skematik diagram (a) Siklus refrigerasi kompresi uap (b) Diagram P-h (Lorenz Brenner, 2021)

Siklus refrigerasi kompresi uap merupakan suatu sistem yang memanfaatkan aliran perpindahan kalor melalui refrigeran. Proses utama kompresi uap adalah:

- 1) Proses kompresi (1-2)

Refrigerant di dalam evaporator menyerap panas disekitar evaporator tersebut. Selama proses ini cairan berubah fase dari cair ke gas, dan pada keluaran evaporator gas tersebut diberi pemanasan berlebih/*superheated gas*.

2) Proses kondensasi (2-3)

Uap yang diberi panas berlebih masuk menuju kompresor. Dimana tekanannya dinaikan sekaligus akan berpengaruh pada peningkatan suhu refrigeran, sebab bagian energi yang menuju proses kompresi dipindahkan ke refrigeran.

3) Proses ekspansi (3-4)

Gas bertekanan tinggi lewat dari kompresor menuju kondensor. Refrigerasi untuk proses ini biasanya dicapai dengan menggunakan udara atau air. Penurunan suhu lanjut terjadi pada kondensor dimana fase gas diubah ke fase cair, sehingga cairan refrigeran didinginkan ke tingkat lebih rendah ketikan cairan ini menuju ekspansi valve.

4) Proses evaporasi (4-1)

Dari cairan yang mempunyai tekanan tinggi melalui katup ekspansi menuju evaporator hingga tekanan akan turun.

1) Proses kompresi

Proses kompresi yaitu proses kenaikan tekanan refrigeran. Refrigeran berfasa uap dengan tekanan rendah yang dari evaporator akan dikompresi atau ditekan di kompresor sehingga menghasilkan uap refrigeran bertekanan tinggi. Kenaikan tekanan tersebut akan berbanding lurus dengan kenaikan temperatur refrigeran. Hasil dari kompresi adalah uap refrigeran bertekanan dan bertemperatur tinggi yang selanjutnya akan di alirkan ke kondensor melalui *discharge line*. Besarnya daya kompresi yang dilakukan dapat dihitung dengan persamaan (2.2) berikut ini:

$$Q_k = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \quad (2.2)$$

Sedangkan besarnya kerja per satuan massa refrigeran yang dikompresikan dapat ditentukan dengan persamaan (2.3):

$$Q_k = h_2 - h_1 \quad (2.3)$$

Dimana:

Q_k = Daya atau kerja kompresor yang dilakukan (kW)

Q_k = Besarnya kerja kompresi yang dilakukan (kJ/kg)

h_1 = Enthalpi saat masuk kompresor (kJ/kg)

h_2 = Enthalpi saat keluar kompresor (kJ/kg)

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

2) Proses kondensasi

Pada proses ini uap refrigeran bertekanan dan bertemperatur tinggi akan melepas kalor ke lingkungan karena temperatur lingkungan lebih rendah dari pada temperatur refrigeran. Proses kondensasi ini terjadi pada kondensor. Idealnya refrigeran akan berfasa cair jenuh (*saturated liquid*) di akhir kondensor. Temperatur kondensor ini masih lebih tinggi dari temperatur lingkungan. Oleh karena itu, refrigeran yang keluar dari kondensor menuju alat ekspansi melalui *liquid line* masih akan mengalami proses perpindahan kalor yang akan menurunkan suhu refrigeran lebih rendah lagi dari suhu cair jenuhnya (*saturated liquid*). Besarnya kalor per satuan massa refrigeran yang dilepaskan kondensor dinyatakan dengan peresamaan (2.4) berikut ini:

$$q_c = h_2 - h_3 \quad (2.4)$$

Dengan menggunakan persamaan (2.5), maka kapasitas kondensasi Q_c adalah:

$$Q_c = \dot{m} \cdot q_c \quad (2.5)$$

Dimana:

Q_c = Besarnya kalor yang dilepaskan kondensor (kW)

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

q_c = besarnya kalor yang dibuang kondensor (kJ/kg)

h_2 = entalpi refrigeran saat masuk kondensor (kJ/kg)

h_3 = entalpi refrigeran saat keluar kondensor (kJ/kg)

3) Proses Ekspansi

Refrigeran berfasa cair dari kondensor akan melewati katup ekspansi yang memiliki diameter kecil sehingga akan menyebabkan penurunan tekanan refrigeran yang diikuti dengan penurunan temperatur refrigeran. Hasil dari proses ekspansi adalah refrigeran yang mayoritas cair. Pada proses ekspansi ini akan ada

beberapa persen refrigeran cair yang berubah fasa menjadi uap. Proses ekspansi ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.6) berikut ini.

$$h_3 - h_4 \quad (2.6)$$

Dimana:

h_3 = Entalpi refrigeran masuk ekspansi (kJ/kg)

h_4 = Entalpi refrigeran keluar ekspansi (kJ/kg)

4) Proses Evaporasi

Proses evaporasi terjadi pada evaporator. Refrigeran keluaran ekspansi yang mayoritas cair memiliki temperatur yang rendah, lebih rendah dari temperatur produk yang akan didinginkan oleh evaporator. Sesuai hukum termodinamika dua, refrigeran cair bertemperatur rendah tersebut akan menyerap kalor dari produk yang didinginkan sehingga refrigeran tersebut berubah fasa menjadi uap jenuh bertekanan rendah yang selanjutnya dihisap dan masuk ke kompresor untuk mengalami proses kompresi dan bersirkulasi kembali. Sedangkan produk yang didinginkan dalam evaporator setelah melepaskan kalor ke refrigeran mengalami penurunan temperatur. Besarnya kalor yang diserap evaporator dihitung dengan menggunakan persamaan (2.7) berikut ini.

$$q_e = h_4 - h_1 \quad (2.7)$$

Kapasitas refrigerasi atau beban pendinginan dapat dihitung dengan persamaan (2.8).

$$Q_e = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) \quad (2.8)$$

Dimana:

Q_e = Kapasitas panas yang diserap evaporator (kW)

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

q_e = kalor yang diserap evaporator (kJ/kg)

h_4 = entalpi keluaran evaporator (kJ/kg)

h_1 = entalpi masukan evaporator (kJ/kg)

2.3 KINERJA SISTEM REFRIGERASI

A. COP carnot

COP_{carnot} adalah perbandingan temperatur evaporasi dibandingkan dengan selisih temperatur kondensasi dan evaporasi. Satuan temperatur yang digunakan dalam rumus COP carnot adalah Kelvin. Persamaan (2.9) ini dapat digunakan untuk menghitung nilai COP carnot.

$$COP_{carnot} = \left(\frac{T_e}{T_c - T_e} \right) \quad (2.9)$$

Dimana:

T_e = Temperatur evaporator (K)

T_c = Temperatur kondensor (K)

B. COP actual

COP actual adalah perbandingan kalor yang diserap oleh evaporator dari lingkungan terhadap kerja yang dilakukan oleh kompresor. Nilai COP actual dapat diketahui dengan persamaan (2.10) ini.

$$COP_{act} = q_e / q_k \quad (2.10)$$

Dimana:

q_e = efek refrigerasi (kJ/kg)

q_k = kerja kompresi (kJ/kg)

C. Efisiensi Refrigerasi

Efisiensi refrigerasi adalah perbandingan antara COP_{actual} terhadap COP_{carnot} . Oleh karena itu, untuk menghitung efisiensi refrigerasi dapat menggunakan persamaan (2.11) berikut ini.

$$\eta_{ref} = \frac{COP_{act}}{COP_{carnot}} \quad (2.11)$$

D. Daya yang digunakan

Untuk pemakaian daya mesin refrigerasi biasanya tergantung dari daya kompresor. Dalam penelitian ini, mesin refrigerasi dioperasikan dalam kurun waktu 24 jam sehingga menghitung daya yang terpakai menggunakan persamaan (2.12).

$$W = V \cdot I \cdot \text{COS } \theta \quad (2.12)$$

Dimana:

W = Daya (Watt)

V = Tegangan listrik (Volt)

I = Arus listrik (Ampere)

$\text{COS } \theta$ = Faktor nilai yang sering digunakan adalah 0,85

Untuk konsumsi listrik setiap hari atau bulanan dapat dihitung dengan persamaan (2.13) dan (2.14)

Pemakaian listrik per hari:

$$= (P/1000) \times \text{Waktu pemakaian (kWh/hari)} \quad (2.13)$$

Pemakaian listrik per bulan:

$$= \text{Pemakaian perhari} \times 30 \text{ hari (kWh/bulan)} \quad (2.14)$$

E. Superheat

Superheat memberikan indikasi jika jumlah refrigeran yang mengalir ke evaporator sesuai bebannya. Jika *superheat* terlalu tinggi kemudian tidak cukup refrigeran yang di *supply*, akan mengakibatkan pendinginan yang buruk dan kelebihan penggunaan energi. Sebaliknya, jika *superheat* yang terlalu rendah, maka refrigeran terlalu banyak di *supply* mungkin akan mengakibatkan kerusakan kompresor karena banyaknya cairan refrigeran kembali ke kompresor (ASHRAE, 2005).

F. Subcooling

Pada sistem refrigerasi, proses kondensasi ini adalah proses dari titik 2 ke titik 3. Pada titik 3 idealnya seluruh refrigeran telah berubah fasa menjadi cair

jenuh (*saturated liquid*). Jika perancangan dan pemilihan ukuran kondensor tidak tepat ataupun sirip-sirip kondensor kotor maka pada ujung kondenser belum tentu semua refrigeran telah berbentuk cair. Temperatur pada waktu proses kondensasi ini terjadi masih lebih tinggi dari temperatur udara disekitarnya. Oleh karena itu refrigeran yang mengalir keluar dari kondenser menuju TXV (*Thermostatic Expansion Valve*) melalui “*filter drier*” masih akan mengalami proses perpindahan kalor yang mana akan menurunkan temperatur refrigeran lebih rendah lagi dari temperatur cair jenuhnya (*saturated liquid*). Proses penurunan suhu setelah melalui titik “*saturated liquid*” ini disebut proses *subcooling* dan wujud refrigeran disebut “*subcooled liquid*”. Daerah *subcooled liquid* ini terletak disebelah kiri dari kurva *saturated liquid* pada diagram p-h. Besarnya pendinginan lanjut yang terjadi di kondenser ini dihitung dengan cara mengurangi temperatur kondensasi dengan temperatur yang terukur di akhir kondensor (ASHRAE, 2005).

Evaluasi sistem AC dapat juga menggunakan temperatur sisi sekunder serta beban pendinginan evaporator sebagai variabel input dan menggabungkan 6 (enam) parameter, yang mana diidentifikasi dari data pengujian. Untuk mengurangi jumlah parameter yang tidak diketahui, maka beberapa ketentuan digunakan pada penelitian ini, yaitu:

- operasi pada kondisi *steady*
- pertukaran panas yang dapat diabaikan dengan lingkungan
- kehilangan tekanan yang dapat diabaikan
- ekspansi isenthalpic

Evaporator dan kondensor dimodelkan dengan metode efektivitas NTU dan dianggap sebagai penukar panas dengan perubahan fasa pada sisi primer. Hal ini merupakan kasus khusus, di mana laju kapasitas panas dari uap yang mengembun atau cairan yang menguap cenderung menuju tak terhingga (proses hampir isothermal). Efektivitas evaporator (ϵ_e) diberikan oleh persamaan (2.15).

$$\epsilon_e = 1 - e^{-NTU_E} \quad (2.15)$$

dimana NTU_E menunjukkan jumlah parameter tak berdimensi dari unit transfer evaporator, yang didefinisikan oleh persamaan (2.16).

$$NTU_E = \frac{(UA)_E}{c_{p,E} \dot{m}_E} 1 - e^{-NTU_E} \quad (2.16)$$

Dimana:

$(UA)_E$ = koefisien perpindahan panas keseluruhan dikalikan luas perpindahan panas evaporator

$c_{p,E}$ = kapasitas panas spesifik

\dot{m}_E = laju aliran massa sisi sekunder

Karena kapasitas panas dan laju aliran massa sisi sekunder adalah tidak diketahui, maka dapat ditentukan dengan persamaan (2.17).

$$c_{p,E} \dot{m}_E = \frac{\dot{Q}_E}{T_{E,in} - T_{E,out}} = \frac{\dot{Q}_E}{\Delta T_E} \quad (2.17)$$

Dengan perbedaan temperatur antara *inlet* dan *outlet* sisi sekunder evaporator (T_E), maka temperatur penguapan refrigeran dapat diberikan dengan persamaan (2.18).

$$T_e = T_{E,in} - \frac{\Delta T_E}{\epsilon_E} \quad (2.18)$$

Secara analogi, Persamaan (2.15) – (2.18) berlaku juga untuk kondensor dengan menggunakan jumlah yang sesuai. Dengan pendekatan efektivitas NTU_{-e} yang dipilih, efek *superheating* dan *subcooling* di penukar panas tidak diperlakukan secara eksplisit. Namun, kesalahannya dianggap dapat diabaikan, karena dapat dikompensasikan dengan parameter UA saat mengkalibrasi model.

Dengan temperatur penguapan dan kondensasi, tingkat tekanan rendah dan tinggi, p_e dan p_c dapat ditentukan. Temperatur refrigeran T_1 pada keadaan 1 setelah evaporator dapat ditentukan dengan persamaan (2.19).

$$T_1 = T_e + \Delta T_{sh} \quad (2.19)$$

di mana T_{sh} adalah perbedaan temperatur *superheating*. Demikian pula, temperatur refrigeran T_3 pada keadaan 3 setelah kondensor dapat ditentukan dengan persamaan (2.20).

$$T_3 = T_c + \Delta T_{sc} \quad (2.20)$$

Dimana:

T_{sc} = adalah perbedaan temperatur *subcooling*

Bersama dengan tekanan yang teridentifikasi, maka nilai entalpi dan entropi spesifik (h_1 ; h_3 ; s_1 ; s_3) dari zat pendingin dapat diidentifikasi pada keadaan 1 dan 3. Setelah kondensor, refrigeran melewati katup ekspansi dan mengembang dari mengembun menjadi tekanan evaporasi. Saat berada dalam fase cair setelah kondensor, refrigeran menunjukkan perubahan fase cair-uap ketika mengembang. Dengan mengasumsikan isenthalpic proses ekspansi, entalpi spesifik h_4 pada keadaan 4 setelah katup ekspansi adalah setara dengan entalpi spesifik h_3 pada keadaan 3.

Setelah nilai kerja kompresor diketahui, maka nilai efisiensi isentropik kompresor dapat ditentukan oleh persamaan (2.21).

$$\eta_{isen} = \frac{\dot{W}_{k,isen}}{\dot{W}_{k,act}} = \frac{\dot{m}_r(h_{2s} - h_1)}{\dot{m}_r(h_2 - h_1)} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (2.21)$$

Nilai efisiensi isentropik kompresor menghubungkan *input* kompresor isentropik $\left(\dot{W}_{k,isen}\right)$ dengan kerja daya kompresor aktual $\left(\dot{W}_{k,act}\right)$, dimana h_{2s} merepresentasikan nilai spesifik entalpi pada keadaan 2s yang dihasilkan dari kondisi isentropik (yaitu reversibel) kompresi. Nilai h_{2s} dapat ditentukan, sebagai spesifik entropi s_{2s} pada keadaan 2s sama dengan nilai spesifik entropi s_1 pada keadaan 1. Dari persamaan efisiensi isentropik tersebut maka nilai h_2 dapat ditentukan dengan persamaan (2.22) berikut ini:

$$h_2 = \frac{(h_{2s} - h_1)}{\eta_{isen}} + h_1 \quad (2.22)$$

Untuk nilai daya listrik kompresor $\left(\dot{W}_k\right)$ dapat ditentukan dengan

persamaan (2.23):

$$\dot{W}_k = \frac{\dot{W}_{k,act}}{\eta_{el,mech}} \quad (2.23)$$

Dimana:

$$\eta_{el,mech} = \text{efisiensi elektrik-mekanik kompresor}$$

Nilai efisiensi elektrik-mekanik kompresor ini digunakan untuk memperhitungkan nilai kerugian elektrik-mekanik pada kompresor misalkan frekuensi konverter.

Untuk nilai laju aliran panas kondensor $\left(\dot{Q}_c\right)$ ditentukan dengan keseimbangan energi secara keseluruhan selama siklus pendinginan. Nilai tersebut dapat ditentukan dengan persamaan (2.24) berikut ini:

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_e + \dot{W}_{k,act} \quad (2.24)$$

2.4 PENDEKATAN BERBASIS ENERGI

Analisis energi adalah metode yang paling umum untuk mengevaluasi sistem termodinamika yang mana melibatkan transfer dan konversi energi. Hal ini didasarkan pada hukum pertama termodinamika, di mana energi dikonversikan dalam setiap komponen atau proses. Neraca energi biasanya dilakukan untuk menilai aliran energi masuk dan keluar yang sesuai dari suatu sistem atau komponen, sedangkan evaluasi kinerja diwujudkan dalam bentuk angka-angka, misalkan rasio keluaran energi terhadap masukan. Emisi sisa, seperti perpindahan panas ke lingkungan, dapat ditentukan dan dikurangi dengan meningkatkan efektivitas dengan tetap memastikan sistem awal yang diinginkan. Untuk menghitung efisiensi energi dapat menggunakan persamaan (2.25).

$$\eta_{en} = \frac{E_{keluar}}{E_{masuk}} \quad (2.25)$$

Dimana:

η_{en} = Efisiensi energi

E_{keluar} = Energi yang keluar dari sistem

E_{masuk} = Energi yang masuk ke dalam sistem

Nilai tersebut memberikan informasi tentang berapa banyak *input* yang dibutuhkan untuk mencapai *output* yang diinginkan. Dalam konteks mesin pendingin, koefisien kinerja (COP) banyak digunakan sebagai indikator kinerja, yang dijelaskan pada persamaan (2.26).

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_k} \quad (2.26)$$

dimana:

\dot{Q}_e = kapasitas pendinginan evaporator

\dot{W}_k = daya input listrik kompresor

Biasanya COP lebih besar dari 1 dan ditentukan dari data stasioner titik operasi. Parameter titik operasi ini, misalkan kondensasi atau penguapan suhu, harus diketahui untuk memastikan perbandingan antara perangkat peralatan sistem pendingin.

Tolak ukur lainnya yang digunakan untuk menentukan kinerja sistem pendinginan dalam aplikasi sistem AC adalah rasio efisiensi energi (EER), yang diberikan dengan persamaan (2.27).

$$EER = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_{eff}} \quad (2.27)$$

Nilai EER menggambarkan rasio kapasitas pendinginan terhadap *input* daya listrik efektif $\left(\dot{W}_{eff} \right)$ pada sistem refrigerasi.

2.5 STANDAR TEKNIS VDMA 24247-2 (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.)

Penilaian detail terhadap mesin pendingin diperkenalkan dalam standar teknis VDMA 24247-2. Dari standar ini disebutkan bahwa pengaruh terhadap COP karena perbedaan suhu pada penukar panas, yang mempengaruhi suhu penguapan dan kondensasi, serta interaksi antara komponen sistem tetap tersembunyi. Nilai ini dipengaruhi oleh keragaman parameter, dan dengan demikian, perbandingan yang andal antara sistem pendingin hanya mungkin pada kondisi operasi yang sama. Untuk alasan tersebut, potensi untuk mencapai efisiensi energi setinggi mungkin tetap tidak tereksplorasi. Empat parameter kunci diusulkan dalam standar teknis untuk memungkinkan penilaian yang komprehensif dari kinerja mesin pendingin adalah:

- Efisiensi produktivitas pendinginan (η_{CP})
- Efisiensi perpindahan panas (η_{HT})
- Efisiensi transportasi fluida (η_{FT})
- Efisiensi pemanfaatan dingin (η_{CU})

Efisiensi produktivitas pendinginan (η_{CP}) dapat ditentukan dengan membandingkan siklus pendinginan yang nyata dengan yang ideal dan dapat ditentukan dengan persamaan (2.28).

$$\eta_{CP} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_k} \frac{T_c - T_e}{T_e} \quad (2.28)$$

dimana:

\dot{Q}_e = kapasitas pendinginan evaporator

\dot{W}_{cpr} = daya input listrik kompresor

T_e = Temperatur penguapan refrigeran

T_c = Temperatur kondensasi refrigeran

Untuk melihat indikator kinerja pada mesin pendingin adalah dengan mengevaluasi pengaruh kerugian selama produktivitas pendinginan yang mana

biasanya dilambangkan dengan nilai kualitas Carnot. Efisiensi perpindahan panas (η_{HT}) didefinisikan dengan persamaan (2.29) berikut ini.

$$\eta_{HT} = \frac{T_e}{T_U} \frac{T_0 - T_U}{T_c - T_e} \quad (2.29)$$

Dimana:

T_U = suhu pendinginan yang berguna (misal: dari lokasi pendinginan)

T_0 = suhu dari pendingin (misal: lingkungan)

Perbedaan temperatur yang tidak menguntungkan dalam penukar panas dapat menurunkan kinerja sistem. Oleh karena itu, untuk mengevaluasi pengaruh ini maka dapat dihitung nilai perbedaan efisiensi mesin refrigerasi. Efisiensi transportasi fluida (η_{FT}) dapat ditentukan dengan persamaan (2.30).

$$\eta_{FT} = \frac{\dot{W}_k}{\dot{W}_{tot}} \quad (2.30)$$

di mana:

\dot{W}_{tot} = total input daya pada sistem AC sistem

Indikator kinerja menilai pengaruh kebutuhan energi pada peralatan mesin refrigerasi. Efisiensi pemanfaatan dingin (η_{CU}) diberikan persamaan (2.31).

$$\eta_{CU} = \frac{\dot{Q}_U}{\dot{Q}_e} \quad (2.31)$$

di mana:

\dot{Q}_U = daya termal yang berguna untuk pendinginan

\dot{Q}_e = kapasitas pendinginan evaporator

Kapasitas pendinginan yang lebih besar diperlukan untuk mengkompensasi aliran panas yang tidak diinginkan. Selain itu, dapat juga disebabkan oleh perpindahan panas yang tidak diinginkan ke mesin pendingin dari lingkungan, misalkan karena isolasi pipa yang tidak memadai. Kondisi ini menilai pengaruh

pasokan panas yang tidak diinginkan di sisi dingin pada kapasitas pendinginan yang berguna. Dari kondisi tersebut, standar teknis juga mengusulkan efisiensi sistem secara keseluruhan, tingkat efisiensi energi total dengan mengalikan beberapa nilai efisiensi seperti pada persamaan (2.32) berikut ini.

$$\eta_{tot} = \eta_{CP} \cdot \eta_{HT} \cdot \eta_{FT} \cdot \eta_{CU} = \frac{\dot{Q}_U}{\dot{W}_{tot}} \frac{T_0 - T_U}{T_U} \quad (2.32)$$

Nilai efisiensi total dapat diartikan sebagai rasio COP sistem dan COP reversibel siklus pendinginan. Tingkat efisiensi energi sesuai dengan definisi dari efisiensi exergi dari mesin pendingin jika T_0 dipilih sebagai suhu referensi lingkungan. Namun, korelasi ini tidak disebutkan dalam ketentuan sistem pendingin.

Seperti yang terlihat dalam tinjauan literatur, analisis energi banyak digunakan untuk mengevaluasi sistem pendingin secara termodinamika dan sangat berguna ketika menyelidiki perangkat yang ada. Energi *input* dan *output* dapat dinilai, di mana dapat dibagi menjadi energi yang berguna dan *waste* mengalir. Kinerja sistem refrigerasi biasanya ditentukan dan dibandingkan dengan nilai COP. Hal ini juga sering digunakan dalam perhitungan perancangan untuk pabrik baru dan dalam *commissioning* berikutnya untuk memverifikasi apakah kinerja yang ditentukan oleh pabrikan tercapai. Namun, pengaruh kondisi operasi, seperti suhu, pada COP tetap tersembunyi. Hal ini didasarkan bahwa energi dapat dilihat sebagai ukuran kuantitas, yang tidak dapat dimusnahkan atau dihasilkan, sesuai dengan hukum pertama termodinamika (Lorenz Brenner, 2021).