

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pompa kalor (*heat pump*) merupakan alat sistem termal yang dapat dijelaskan dengan model sistem dan model proses. Model sistem meliputi komponen utama berupa kompresor, kondensor, evaporator, dan katup ekspansi yang bekerja secara terpadu membentuk siklus refrigerasi. Sementara itu, model proses direpresentasikan melalui diagram tekanan-entalpi (P-h) refrigeran R290 yang menggambarkan tahapan kompresi, kondensasi, ekspansi, dan evaporasi sebagai dasar analisis perpindahan kalor pada sistem. Selanjutnya dibahas mengenai siklus termodinamika kompresi uap sebagai prinsip kerja pompa kalor, *Air Handling Unit* (AHU) beserta komponen dan fungsinya dalam mengondisikan udara pengering, serta konsep psikrometri melalui tabel dan diagram psikrometrik sebagai dasar analisis sifat udara lembap. Bab ini juga menjelaskan integrasi antara sistem pompa kalor dan AHU untuk menghasilkan udara pengering yang memiliki temperatur, kelembaban relatif, dan laju aliran udara sesuai kebutuhan proses pengeringan, disertai pembahasan mengenai efisiensi dan unjuk kerja sistem sebagai parameter evaluasi performa.

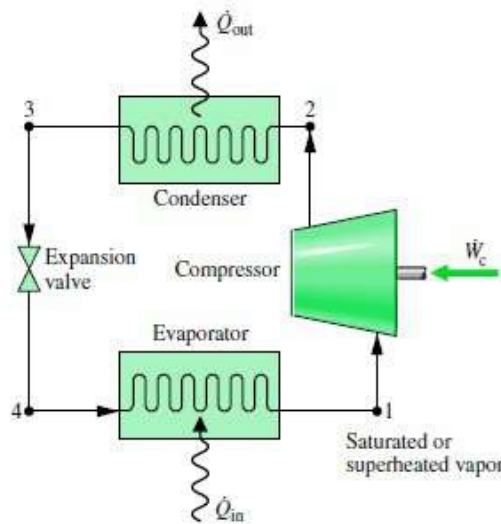
Selain landasan teori mengenai sistem termal, bab ini juga membahas teori perancangan yang digunakan sebagai metode sistematis dalam pengembangan alat, mulai dari penentuan konsep hingga spesifikasi desain. Tahapan fabrikasi dan perakitan pompa kalor dipaparkan untuk menjelaskan implementasi rancangan menjadi sebuah prototipe yang siap dioperasikan. Selanjutnya dibahas konsep *Inspection Test Plan* (ITP) beserta penerapannya sebagai metode pengendalian mutu selama proses manufaktur dan perakitan sehingga setiap komponen memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan. Pada bagian akhir disajikan tinjauan mengenai karakteristik ceri kopi dan proses pengeringannya, termasuk mekanisme perpindahan panas dan massa serta faktor-faktor yang memengaruhi kualitas hasil pengeringan. Keseluruhan teori yang disajikan pada bab ini menjadi dasar ilmiah dalam proses perancangan, fabrikasi, pengujian, analisis, dan evaluasi unjuk kerja sistem pompa kalor sebagai penyedia udara pengering ceri kopi skala laboratorium.

2.1 Pompa Kalor *Heat pump*

2.1.1 Definisi dan Prinsip Kerja Pompa Kalor

Pompa kalor adalah sistem termal yang berfungsi memindahkan energi termal dari media bersuhu rendah ke media bersuhu lebih tinggi dengan bantuan energi eksternal, umumnya dalam bentuk listrik. Berbeda dengan sistem pemanas konvensional yang menghasilkan panas melalui pembakaran atau pemanasan langsung, pompa kalor memanfaatkan panas yang sudah ada di lingkungan, seperti dari udara, tanah, atau air, sehingga penggunaannya lebih efisien secara energi (Mete Ozturk et al., 2020).

Prinsip kerja pompa kalor didasarkan pada siklus termodinamika kompresi uap yang berlangsung secara tertutup. Siklus ini melibatkan empat komponen utama, yaitu kompresor, kondensor, katup ekspansi, dan evaporator. Refrigeran yang bersirkulasi di dalam sistem mengalami perubahan fase dan kondisi termodinamika sehingga memungkinkan terjadinya proses penyerapan dan pelepasan panas secara berulang (Casi et al., 2022). Model sistem pompa kalor dan model proses siklus refrigerasinya dapat dilihat pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2.



Gambar 2.1 Model sistem pompa kalor

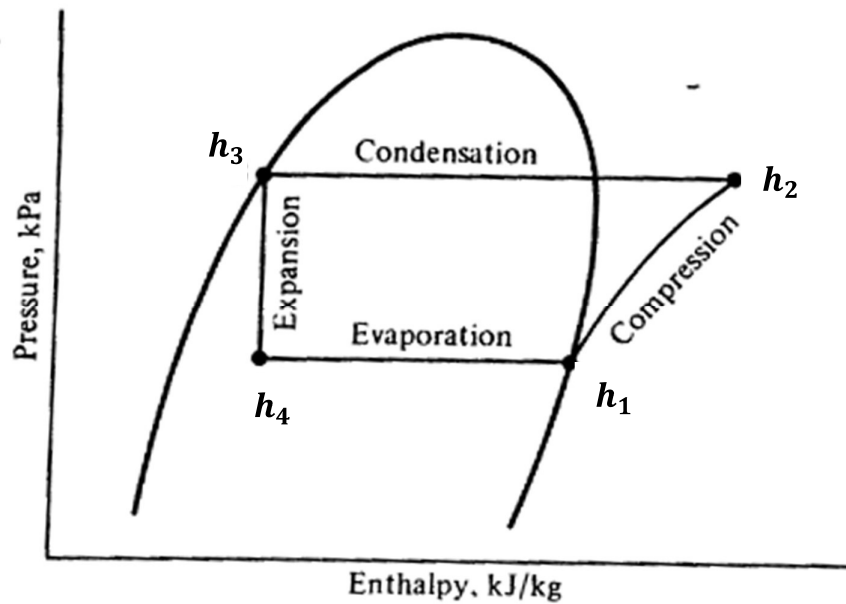
(Moran & Shapiro, 2016)

Siklus refrigerasi terdiri dari empat proses utama yang berlangsung secara tertutup dan berulang, yaitu:

1 → 2 : Proses Kompresi (*Compressor*).

- 2 $\rightarrow$ 3 : Proses Kondensasi (*Condenser*).
- 3 $\rightarrow$ 4 : Proses Ekspansi (*Expansion Valve*).
- 4 $\rightarrow$ 1 : Proses Evaporasi (*Evaporator*).

Sehingga dari proses model sistem pompa kalor di atas dapat dilihat juga dengan model proses siklus refrigerasi yang digunakan yaitu pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Model proses pompa kalor

(Stoecker & Jones, 1982)

Pada tahap evaporasi, refrigeran menyerap panas dari lingkungan dan berubah fase dari cair menjadi uap. Uap refrigeran kemudian diisap dan dikompresi oleh kompresor sehingga tekanan dan temperaturnya meningkat. Selanjutnya, pada kondensor, panas dilepaskan ke media pemanas, dan refrigeran kembali berubah menjadi cair sebelum melewati katup ekspansi untuk menurunkan tekanannya dan mengulangi siklus tersebut (Navarro-Esbri & Mota-Babiloni, 2023).

Siklus kompresi uap memungkinkan pompa kalor bekerja secara terus-menerus dengan tingkat efisiensi yang tinggi. Pemahaman mendalam mengenai prinsip kerja siklus ini menjadi landasan penting dalam merancang, mengoperasikan, dan menilai kinerja sistem pompa kalor, baik untuk aplikasi praktis maupun pengembangan alat peraga pembelajaran (Kropas et al., 2021).

2.1.2 Klasifikasi Pompa Kalor

Pompa kalor dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis sumber panas yang dimanfaatkan. Klasifikasi ini berpengaruh terhadap kinerja sistem, kompleksitas instalasi, serta kesesuaian aplikasi di lapangan (Carroll et al., 2020).

a. *Air Source Heat pump (ASHP)*

Air Source Heat pump (ASHP) merupakan sistem pompa kalor yang memanfaatkan udara luar sebagai sumber panas untuk proses pemanasan. Sistem ini bekerja dengan menyerap energi termal dari udara lingkungan dan mentransfernya ke dalam bangunan melalui sistem distribusi air atau udara. Keunggulan utama ASHP adalah kemudahan instalasi dan kebutuhan lahan yang relatif kecil, sehingga cocok diterapkan pada bangunan eksisting maupun kawasan perkotaan. Namun, karena bergantung pada temperatur udara luar, kinerjanya dapat berfluktuasi mengikuti kondisi iklim, terutama pada suhu rendah yang dapat memengaruhi efisiensi sistem (Carroll et al., 2020).

b. *Groundwater/ hydrothermal*

Groundwater atau *hydrothermal heat pump* menggunakan air tanah atau air permukaan sebagai media sumber panas. Sistem ini memanfaatkan kestabilan temperatur air untuk meningkatkan efisiensi perpindahan kalor. Karena karakteristik termal air yang lebih konstan dibandingkan udara, sistem ini berpotensi menghasilkan performa yang baik. Namun, penerapannya sangat bergantung pada ketersediaan sumber air yang memadai serta kondisi geografis dan perizinan lingkungan, sehingga tidak semua lokasi memungkinkan penggunaan sistem ini (Carroll et al., 2020).

c. *Ground Source Heat pump (GSHP)*

Ground Source Heat pump (GSHP) memanfaatkan energi panas yang tersimpan di dalam tanah sebagai sumber panas. Temperatur tanah yang relatif stabil sepanjang tahun menjadikan sistem ini memiliki performa yang lebih konsisten dibandingkan sistem berbasis udara. GSHP umumnya menggunakan pipa yang ditanam secara horizontal atau vertikal untuk

menyerap panas dari tanah. Meskipun menawarkan efisiensi yang lebih stabil, instalasi sistem ini memerlukan area lahan yang cukup luas dan proses pemasangan yang lebih kompleks, sehingga kurang fleksibel untuk bangunan di wilayah padat atau perkotaan (Carroll et al., 2020).

2.2 Siklus Termodinamika Kompresi Uap

2.2.1 Pengertian Siklus Kompresi Uap

Siklus termodinamika kompresi uap merupakan siklus yang paling umum digunakan pada sistem pompa kalor dan mesin pendingin. Siklus ini bekerja berdasarkan prinsip pemindahan energi panas dari satu media ke media lain melalui perubahan fase refrigeran di dalam sistem tertutup.

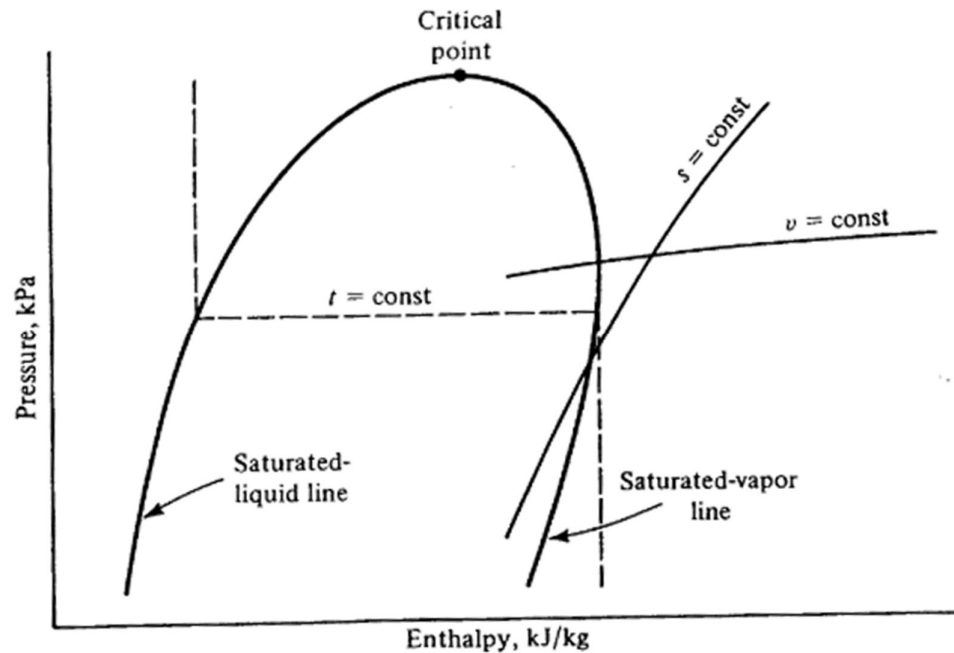
Secara konseptual, siklus kompresi uap bekerja dengan memanfaatkan energi mekanik yang diberikan oleh kompresor untuk meningkatkan tekanan dan temperatur refrigeran sehingga panas dapat dipindahkan dari sumber bersuhu rendah menuju media bersuhu lebih tinggi. Proses ini mengikuti prinsip termodinamika dan dibatasi oleh efisiensi *Carnot*, sehingga memerlukan kerja eksternal untuk memungkinkan perpindahan kalor yang secara alami berlangsung dari temperatur tinggi ke rendah. Kinerja sistem dinyatakan melalui nilai *Coefficient of Performance* (COP), yaitu perbandingan antara panas yang dilepaskan pada kondensor dan daya kompresor yang digunakan. Formulasi ini secara eksplisit menunjukkan bahwa energi mekanik menjadi *input* utama dalam menjaga keberlangsungan siklus kompresi uap (Navarro-Esbrí & Mota-Babiloni, 2023).

Dalam penerapannya, siklus kompresi uap terdiri atas rangkaian proses termodinamika yang berlangsung secara berulang dan kontinu. Setiap proses memiliki peran penting dalam menentukan kinerja keseluruhan sistem, baik dari sisi efisiensi energi maupun stabilitas operasi. Oleh karena itu, pemahaman terhadap siklus ini menjadi elemen fundamental dalam perancangan dan analisis sistem pompa kalor (Casi et al., 2022).

Seiring dengan perkembangan teknologi refrigeran dan komponen sistem, siklus kompresi uap terus mengalami peningkatan performa. Optimalisasi siklus ini menjadi fokus utama dalam upaya meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi dampak lingkungan dari sistem pendinginan dan pemanasan.

2.2.2 Diagram Tekanan-Entalpi ($P-h$) dan Temperatur-Entropi ($T-s$)

Analisis siklus kompresi uap secara termodinamika umumnya dilakukan dengan menggunakan diagram tekanan–entalpi ($P-h$) dan temperatur–entropi ($T-s$). Diagram $P-h$ digunakan untuk menggambarkan perubahan tekanan dan energi spesifik refrigeran selama proses siklus, sehingga memudahkan evaluasi kerja kompresor dan perpindahan kalor. Di mana dapat dilihat pada Gambar 2.3.

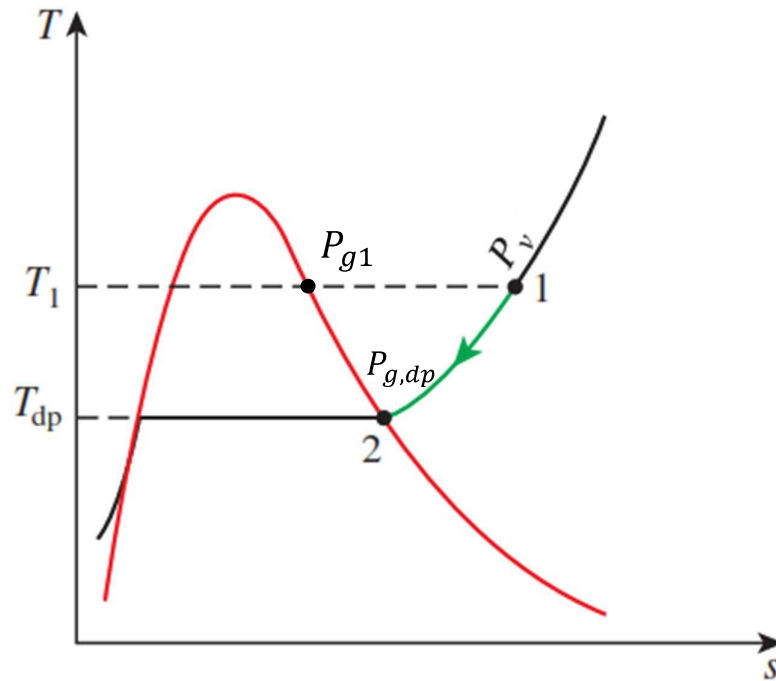


Gambar 2.3 Diagram $P-h$

(Stoecker & Jones, 1982)

Diagram tekanan–entalpi sangat bermanfaat dalam analisis praktis karena secara langsung menunjukkan nilai entalpi pada setiap titik siklus. Melalui diagram ini, besarnya kerja kompresi, kapasitas pendinginan, serta pelepasan kalor pada kondensor dapat ditentukan secara kuantitatif. Oleh sebab itu, diagram $P-h$ banyak digunakan dalam perancangan dan pengujian sistem pompa kalor.

Selain diagram $P-h$, diagram temperatur–entropi ($T-s$) digunakan untuk memahami sifat *irreversibility* dan efisiensi proses yang terjadi dalam siklus. Diagram ini menampilkan hubungan antara temperatur dan entropi, sehingga dapat digunakan untuk menganalisis kerugian energi akibat gesekan, ekspansi tak isentropik, dan proses perpindahan kalor (Aized et al., 2022).

Gambar 2.4 Diagram T - s

(Çengel et al., 2019)

Diagram temperatur–entropi (T - s) dapat digunakan untuk menjelaskan hubungan antara temperatur udara, tekanan uap air, dan kelembapan relatif (*relative humidity*, RH). Pada Gambar 2.4, sumbu vertikal menunjukkan temperatur (T), sedangkan sumbu horizontal menunjukkan entropi spesifik (s). Kurva berbentuk kubah merupakan kurva saturasi uap air yang membatasi kondisi uap jenuh dan uap *superheat*.

Pada temperatur *dew point* (T_{dp}), tekanan uap jenuh dinyatakan sebagai ($P_{g,dp}$), yaitu tekanan maksimum uap air yang dapat dikandung udara pada temperatur tersebut. Sementara itu, tekanan uap aktual (P_v) sama dengan tekanan uap jenuh pada temperatur *dew point* (T_{dp}) sehingga dapat dinyatakan sebagai:

$$P_v = P_{g,dp}$$

Relative humidity (RH) adalah perbandingan antara jumlah uap air aktual yang terdapat di dalam udara dengan jumlah uap air maksimum yang dapat ditampung udara pada temperatur yang sama, yang dinyatakan sebagai:

$$RH = \frac{P_v}{P_{g1}} \times 100\%$$

Berdasarkan hubungan tersebut, kenaikan temperatur udara akan meningkatkan tekanan uap jenuh (P_g) sehingga nilai RH menurun apabila kandungan uap air tetap. Sebaliknya, pendinginan udara akan meningkatkan RH hingga mencapai 100% pada saat temperatur udara sama dengan temperatur *dew point*.

Pada sistem *heat pump*, udara didinginkan di evaporator hingga mendekati atau melewati titik embun sehingga sebagian uap air mengembun dan tekanan uap aktual (P_v) menurun. Selanjutnya udara dipanaskan kembali di kondensor sehingga tekanan uap jenuh meningkat, sedangkan tekanan uap aktual relatif tetap. Akibatnya, udara keluar memiliki temperatur lebih tinggi dan RH lebih rendah, sehingga lebih efektif digunakan sebagai udara pengering.

2.2.3 Proses Utama Dalam Siklus Kompresi Uap

1. Proses kompresi

Proses kompresi terjadi di dalam kompresor, di mana uap refrigeran bertekanan rendah dikompresi menjadi uap bertekanan dan bertemperatur tinggi. Proses ini membutuhkan masukan kerja mekanik dan sangat menentukan konsumsi energi sistem. Efisiensi kompresor menjadi faktor kunci dalam menentukan performa pompa kalor.

2. Proses kondensasi

Setelah proses kompresi, refrigeran memasuki kondensor dan mengalami proses kondensasi. Pada tahap ini, panas dilepaskan ke lingkungan atau media pemanas, dan refrigeran berubah fase dari uap menjadi cair. Proses ini berlangsung pada tekanan relatif konstan dan berperan penting dalam pemanfaatan panas pada sistem pompa kalor.

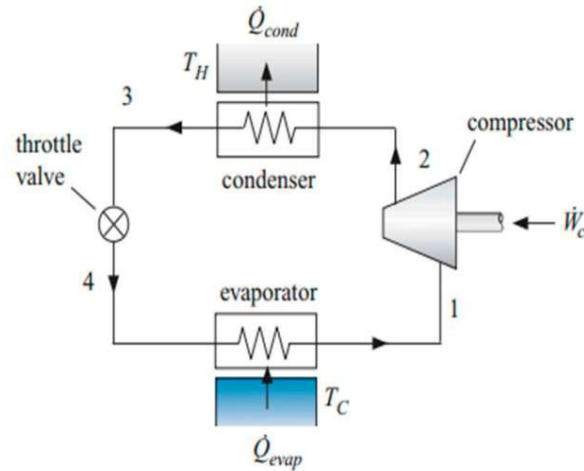
3. Proses ekspansi

Refrigeran cair kemudian melewati katup ekspansi, yang menyebabkan penurunan tekanan dan temperatur secara tiba-tiba. Proses ekspansi ini bersifat isentalpik dan menyiapkan refrigeran untuk menyerap panas pada tahap berikutnya.

4. Proses evaporasi

Selanjutnya, pada evaporator, refrigeran menyerap panas dari lingkungan dan menguap kembali menjadi uap, sehingga siklus dapat diulang (Streckienė et al., 2024).

Diagram sistem refrigeran juga dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Diagram sistem

(Aized et al., 2022)

2.2.4 Komponen Utama Dalam Siklus Kompresi Uap

1. Kompresor

Kompresor merupakan komponen utama yang berfungsi menaikkan tekanan dan temperatur refrigeran dari kondisi uap jenuh atau uap super panas bertekanan rendah menjadi uap bertekanan tinggi. Proses kompresi ini memungkinkan refrigeran melepaskan panas pada temperatur yang lebih tinggi di kondensor. Dengan demikian, kompresor berperan sebagai penggerak utama siklus kompresi uap.

Secara termodinamika, proses kompresi ideal diasumsikan berlangsung secara isentropik. Namun, dalam kondisi nyata selalu terjadi kerugian energi akibat gesekan dan *irreversibility*, sehingga efisiensi kompresor menjadi parameter penting dalam evaluasi kinerja sistem.

2. Kondensor

Kondensor berfungsi sebagai penukar panas yang melepaskan energi panas dari refrigeran ke lingkungan atau media pemanas. Pada proses ini, refrigeran berubah fase dari uap bertekanan tinggi menjadi cair bertekanan tinggi. Proses

kondensasi berlangsung pada tekanan relatif konstan dan merupakan tahapan penting dalam pemanfaatan panas pada sistem pompa kalor. Efektivitas kondensor dipengaruhi oleh perbedaan temperatur antara refrigeran dan media pendingin, luas permukaan penukar panas, serta karakteristik aliran fluida. Kondensor yang dirancang dengan baik akan meningkatkan kapasitas pelepasan panas dan menurunkan beban kerja.

3. Katup ekspansi

Katup ekspansi berfungsi menurunkan tekanan dan temperatur refrigeran dari kondisi cair bertekanan tinggi menjadi campuran cair-uap bertekanan rendah sebelum masuk ke evaporator. Proses ini berlangsung tanpa adanya pertukaran panas dengan lingkungan dan diasumsikan bersifat isentalpik.

Meskipun tidak menghasilkan kerja maupun perpindahan kalor secara langsung, katup ekspansi memiliki peran penting dalam mengatur laju aliran refrigeran dan menjaga kestabilan operasi sistem. Kesalahan dalam pemilihan atau pengaturan katup ekspansi dapat menyebabkan penurunan kinerja evaporator.

4. Evaporator

Evaporator merupakan komponen yang berfungsi menyerap panas dari lingkungan atau media pendingin. Pada tahap ini, refrigeran bertekanan rendah menyerap panas dan mengalami perubahan fase dari cair menjadi uap. Proses evaporasi inilah yang memungkinkan terjadinya pendinginan atau penyerapan panas lingkungan.

Kinerja evaporator sangat dipengaruhi oleh perbedaan temperatur antara refrigeran dan media yang didinginkan, serta kondisi aliran fluida. Evaporator yang efisien akan meningkatkan kapasitas penyerapan panas dan memperbaiki kinerja keseluruhan sistem.

2.3 *Air Handling Unit* (AHU)

2.3.1 Pengertian dan Fungsi AHU

Air handling unit (AHU) merupakan perangkat utama dalam sistem *Heating, Ventilation, and Air Conditioning* (HVAC) yang berfungsi untuk mengolah udara sebelum didistribusikan ke dalam ruang. Proses pengolahan udara oleh AHU meliputi pengaturan temperatur, kelembapan, kebersihan udara, serta laju aliran

udara agar sesuai dengan kebutuhan kenyamanan termal dan kualitas udara dalam ruangan (Michalak, 2021).

Dalam sistem HVAC terpusat, *air handling unit* (AHU) berfungsi sebagai penghubung antara sumber energi termal seperti *chiller* atau pompa kalor dan ruang yang dilayani. AHU memproses campuran udara luar dan udara balik melalui tahap filtrasi, pengaturan kelembapan, serta perpindahan kalor pada *coil* pendingin atau pemanas sebelum mendistribusikannya kembali ke ruang melalui jaringan *ducting*. Karena berperan langsung dalam pengaturan kondisi udara suplai, performa operasional AHU sangat menentukan konsumsi energi, kestabilan temperatur ruang, serta efisiensi keseluruhan sistem HVAC (Hong et al., 2020).

2.3.2 Komponen Utama dalam Sistem AHU

Air handling unit terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja secara terintegrasi untuk memastikan proses pengolahan udara berjalan dengan baik dan efisien (Michalak, 2021).

1. *Fan* atau blower berfungsi untuk mengalirkan udara melalui seluruh komponen AHU dan mendistribusikannya ke ruang yang dilayani. Kinerja *fan* menentukan laju aliran udara serta berpengaruh langsung terhadap konsumsi energi listrik dan tekanan statis sistem (Wang et al., 2023).
2. *Heating coil* pada sistem HVAC berbasis pompa kalor berfungsi sebagai penukar panas sisi udara (*air-side heat exchanger*) yang mentransfer panas dari refrigeran atau fluida pemanas ke aliran udara suplai. Pada sistem pompa kalor, *heating coil* umumnya dikonfigurasi sebagai bagian dari sisi kondensor, sehingga kalor hasil proses kondensasi refrigeran digunakan untuk meningkatkan temperatur udara sebelum didistribusikan ke ruang terkondisi (Chakraborty et al., 2025).
3. Filter udara berfungsi menyaring partikel debu, mikroorganisme, dan kontaminan lain yang terdapat dalam udara. Penggunaan filter yang tepat meningkatkan kualitas udara dalam ruangan, namun juga menyebabkan penurunan tekanan (*pressure drop*) yang harus diperhitungkan dalam desain AHU (Michalak, 2021).
4. *Casing* berfungsi sebagai pelindung dan penopang komponen AHU, sedangkan saluran udara (*ducting*) digunakan untuk mendistribusikan

udara ke ruang. Desain *casing* dan *ducting* yang baik dapat meminimalkan kebocoran udara dan kehilangan tekanan sehingga meningkatkan efisiensi sistem.

2.3.3 Prinsip Kerja AHU pada Mode Pemanasan

Pada mode pemanasan, AHU bekerja dengan memanfaatkan panas dari *heating coil* untuk menaikkan temperatur udara sebelum dialirkan ke ruang. Dalam sistem yang terintegrasi dengan pompa kalor, *heating coil* berfungsi sebagai media perpindahan kalor antara kondensor *heat pump* dan aliran udara (Xiao et al., 2020).

Proses pelepasan panas pada *coil* kondensor *heat pump* terjadi ketika refrigeran bertekanan dan bertemperatur tinggi dari kompresor mengalami kondensasi di dalam pipa dan sirip (*fin-tube coil*). Panas laten yang dilepaskan kemudian ditransfer ke udara yang mengalir melintasi permukaan *coil* melalui mekanisme konveksi paksa, yang dipengaruhi secara signifikan oleh kecepatan/laju aliran udara, luas permukaan efektif sirip, dan karakteristik desain *heat exchanger* (Sureddi et al., 2025).

Selain itu, integrasi pompa kalor dengan *air handling unit* (AHU) terbukti meningkatkan efisiensi sistem HVAC dibandingkan pemanas listrik langsung (*direct electric heating*), karena pompa kalor memindahkan energi panas daripada mengubah energi listrik sepenuhnya menjadi panas, sehingga menghasilkan nilai COP yang lebih tinggi dan konsumsi energi yang lebih rendah (Sureddi et al., 2025).

2.3.4 Parameter Kinerja AHU

Kinerja *Air handling unit* dapat dievaluasi menggunakan beberapa parameter utama yang berkaitan dengan performa aliran udara dan proses perpindahan kalor (Michalak, 2021).

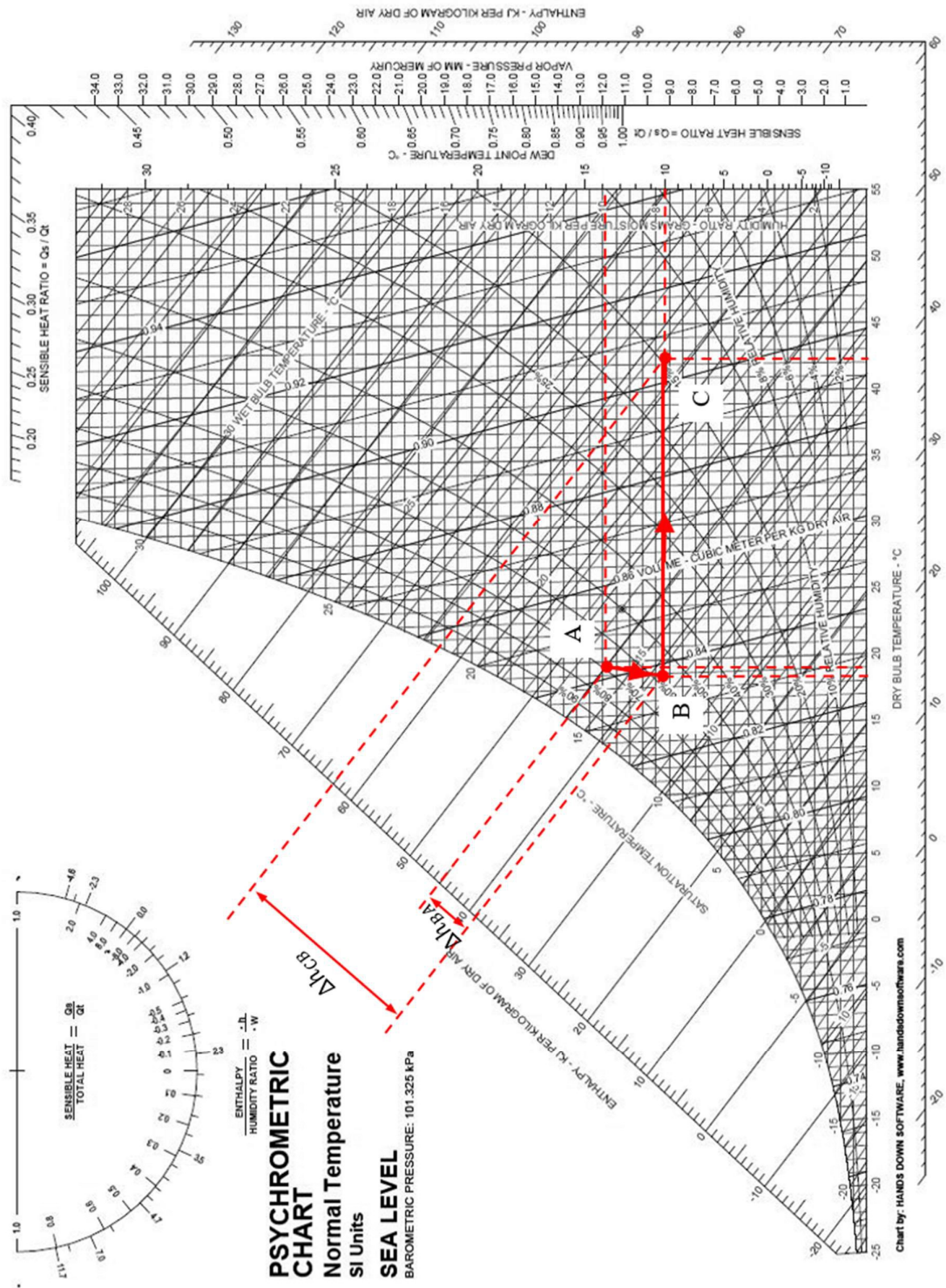
- A. Laju aliran udara menentukan jumlah udara yang dapat dikondisikan oleh AHU dalam satuan waktu. Parameter ini berpengaruh langsung terhadap kapasitas pemanasan serta distribusi udara di dalam ruang (Wang et al., 2023).
- B. Kenaikan temperatur udara menunjukkan efektivitas proses pemanasan yang terjadi pada *heating coil*. Parameter ini dipengaruhi oleh kapasitas *heat pump*, karakteristik *coil*, serta kondisi udara masuk (Xiao et al., 2020).

- C. *Pressure drop* merupakan penurunan tekanan udara akibat hambatan aliran pada filter, *coil*, dan *ducting*. Nilai *pressure drop* yang besar akan meningkatkan konsumsi daya *fan* dan menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan (Michalak, 2021).
- D. Efisiensi perpindahan kalor pada *coil* menunjukkan kemampuan penukar panas dalam mentransfer energi dari fluida pemanas ke udara. Kinerjanya dipengaruhi oleh desain *coil* (luas permukaan dan susunan pipa), kecepatan aliran udara yang menentukan konveksi paksa, serta perbedaan temperatur antara media pemanas dan udara sebagai gaya pendorong utama perpindahan kalor (Nassif et al., 2025).

2.4 Tabel Psikrometri

Psikrometri merupakan bagian dari Termodinamika yang mempelajari sifat udara lembap sebagai campuran udara kering dan uap air, khususnya hubungan antara temperatur, kelembaban, dan energi. Dalam studi terkini, psikrometri menjadi dasar penting dalam analisis sistem HVAC dan pengeringan karena mampu menggambarkan keterkaitan antara perpindahan panas dan massa secara simultan serta kontribusinya terhadap efisiensi energi sistem (Lešinskis et al., 2024). Pendekatan ini memungkinkan evaluasi kondisi udara secara lebih komprehensif dalam berbagai aplikasi teknik.

Tabel atau diagram psikrometri merupakan alat grafis yang digunakan untuk merepresentasikan sifat-sifat udara lembap pada tekanan konstan. Diagram ini memuat parameter utama seperti temperatur bola kering, temperatur bola basah, kelembaban relatif, rasio kelembaban, titik embun, dan entalpi. Dengan mengetahui dua parameter independen, kondisi udara lainnya dapat ditentukan secara langsung, sehingga analisis menjadi lebih efisien dan praktis. Selain itu, penelitian berbasis visualisasi interaktif menunjukkan bahwa diagram psikrometri membantu memahami hubungan antar parameter udara lembap secara lebih intuitif dan sistematis (Erdélyi & Rajkó, 2016). Berikut ini gambaran tabel psikrometri terlampir pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Psychrometric chart

(Handsdownsoftware, 2026)

Sifat-sifat udara lembap dalam diagram psikrometri saling berkaitan dan menjadi dasar dalam analisis proses termal. Temperatur bola kering merepresentasikan kondisi aktual udara, sedangkan temperatur bola basah berkaitan dengan proses evaporasi. Kelembaban relatif menunjukkan tingkat kejenuhan udara terhadap uap air, sementara rasio kelembaban menyatakan kandungan uap air per satuan massa udara kering. Entalpi berperan sebagai parameter energi total yang mencerminkan kombinasi energi sensibel dan laten, sehingga banyak digunakan dalam analisis efisiensi sistem termal (Erdélyi & Rajkó, 2016).

Secara matematis, hubungan antar parameter dalam psikrometri dijelaskan melalui persamaan entalpi udara lembap yang menghubungkan temperatur dan kandungan uap air. Persamaan ini digunakan untuk mengevaluasi kebutuhan energi serta performa sistem dalam berbagai aplikasi teknik. Selain itu, diagram psikrometri memungkinkan visualisasi proses pemanasan, pendinginan, humidifikasi, dan dehumidifikasi sebagai lintasan perubahan kondisi udara, sehingga mempermudah analisis proses yang melibatkan perubahan temperatur dan kelembaban secara bersamaan (Lešinskis et al., 2024).

Perkembangan dalam satu dekade terakhir menunjukkan bahwa penggunaan tabel psikrometri telah berkembang ke arah digital dan interaktif, yang meningkatkan akurasi serta kemudahan interpretasi data. Studi terbaru menegaskan bahwa pendekatan visual berbasis diagram psikrometri tetap menjadi metode yang efektif dalam memahami fenomena udara lembap dan mendukung analisis sistem teknik modern (Erdélyi & Rajkó, 2016). Oleh karena itu, tabel psikrometri tetap menjadi alat fundamental dalam penelitian teknik, khususnya pada aplikasi pengeringan dan sistem berbasis kontrol kondisi udara.

2.5 Integrasi *Heat pump* dengan *Air Handling Unit* (AHU)

2.5.1 Konsep Sistem Terintegrasi

Integrasi *heat pump* dengan AHU merupakan sistem HVAC terpusat di mana pompa kalor menyediakan energi termal dan AHU mendistribusikan udara. Panas dari sisi kondensor dimanfaatkan langsung oleh *heating coil* untuk memanaskan udara suplai, sehingga kebutuhan pemanas listrik atau berbahan bakar fosil dapat dikurangi (Żelazna & Pawłowski, 2025).

Pada sistem peraga atau sistem laboratorium, skema aliran terdiri dari dua sirkuit utama, yaitu sirkuit refrigeran dan sirkuit udara. Refrigeran bersirkulasi melalui kompresor, kondensor (*heating coil*), katup ekspansi, dan evaporator, sedangkan udara dialirkan oleh *fan* melalui filter, *heating coil*, dan saluran udara. Integrasi kedua sirkuit ini memungkinkan pengguna laboratorium mengamati hubungan antara parameter refrigeran dan perubahan kondisi udara secara langsung, sehingga sistem efektif digunakan sebagai media pembelajaran konversi energi (Johra et al., 2021).

Integrasi *heat pump* meningkatkan efisiensi energi karena panas dari kondensor yang biasanya terbuang dapat langsung digunakan untuk memanaskan udara pada AHU. Dengan demikian, panas kondensasi dimanfaatkan secara optimal dan kebutuhan energi tambahan dapat dikurangi (Schito & Conti, 2025).

2.5.2 Mekanisme Pemanasan Udara Pada *Heat pump*

Pada mode pemanasan, mekanisme pemanasan udara pada AHU terjadi melalui proses perpindahan kalor antara kondensor *heat pump* dan aliran udara yang melewati *coil*. Refrigeran bertemperatur dan bertekanan tinggi yang keluar dari kompresor mengalami kondensasi di dalam *coil* kondensor dan melepaskan energi panas laten maupun sensibel ke permukaan *coil* (Alsouda et al., 2023).

Udara yang dialirkan oleh *fan* melintasi permukaan *coil* menyerap panas tersebut melalui mekanisme konveksi paksa, sehingga temperatur udara meningkat sebelum didistribusikan ke ruang. Dalam analisis termal, udara yang dipanaskan ini diperlakukan sebagai beban pemanas (*heating load*), di mana besar kenaikan temperatur udara bergantung pada kapasitas panas kondensor dan laju aliran massa udara (Xiao et al., 2020).

Pemanfaatan kondensor *heat pump* sebagai sumber panas menjadikan sistem ini lebih efisien dibandingkan pemanas listrik konvensional, karena energi panas yang digunakan sebagian besar berasal dari lingkungan dan hanya memerlukan energi listrik untuk menggerakkan kompresor (Diaby et al., 2019).

2.5.3 Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Sistem

Kinerja sistem terintegrasi *heat pump*–AHU dipengaruhi oleh berbagai parameter operasi dan karakteristik komponen. Faktor-faktor utama yang mempengaruhi performa sistem dijelaskan sebagai berikut.

- A. Kondisi udara masuk ke AHU, yang meliputi temperatur dan kelembapan udara, sangat mempengaruhi kapasitas pemanasan dan efisiensi perpindahan kalor. Udara masuk dengan temperatur lebih rendah akan membutuhkan energi pemanasan yang lebih besar, sehingga meningkatkan beban kerja sistem *heat pump* (Wang et al., 2023).
- B. Laju aliran massa udara menentukan jumlah energi panas yang dapat diserap oleh udara dalam satuan waktu. Laju aliran udara yang terlalu rendah dapat menyebabkan kenaikan temperatur udara yang tinggi namun kapasitas pemanasan total menjadi kecil, sedangkan laju aliran yang terlalu tinggi dapat menurunkan efektivitas perpindahan kalor pada *coil* (Wang et al., 2023).
- C. Temperatur kondensasi refrigeran merupakan parameter penting yang mempengaruhi kinerja *heat pump*. Temperatur kondensasi yang lebih tinggi meningkatkan kemampuan pemanasan udara, namun juga meningkatkan rasio kompresi dan konsumsi energi listrik, sehingga perlu ditentukan kondisi operasi yang optimal (Gruber et al., 2024).
- D. Karakteristik *coil*, seperti luas permukaan, jenis sirip, material, dan susunan pipa, berpengaruh langsung terhadap efektivitas perpindahan kalor antara refrigeran dan udara. Desain *coil* yang baik dapat meningkatkan efisiensi sistem tanpa menambah konsumsi energi yang signifikan (Alsouda et al., 2023).

2.6 Efisiensi dan Kinerja Pompa Kalor

2.6.1 Coefficient of Performance (COP)

Coefficient of Performance (COP) adalah rasio antara energi panas yang dipindahkan oleh pompa kalor dengan energi listrik yang dikonsumsi oleh kompresor selama siklus. COP menjadi parameter utama untuk mengevaluasi efisiensi sistem dalam mentransfer panas, di mana semakin tinggi nilai COP, semakin efisien sistem bekerja. Perhitungan COP berdasarkan Gambar 2.2 dapat dinyatakan sebagai:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{cond}}{W_{comp}} \quad (2.5)$$

(Moran & Shapiro, 2016)

Di mana:

$COP = \text{coefficient of performance}$

$\dot{Q}_{cond} = \text{Laju perpindahan kalor di kondensor (kW)}$

$W_{comp} = \text{Daya kompresor (kW)}$

Di mana masing-masing nilai entalpi didapatkan pada diagram *mollier*. Dalam konteks pembelajaran dan perancangan praktikum laboratorium konversi energi, COP digunakan sebagai indikator kinerja sistem dan dasar analisis efisiensi energi pompa kalor (Rulazi et al., 2024).

2.6.2 Faktor-faktor yang Memengaruhi Efisiensi Pompa Kalor

Efisiensi pompa kalor dipengaruhi oleh faktor desain sistem dan kondisi operasional, termasuk efisiensi kompresor, efektivitas penukar panas, serta pengaturan aliran refrigeran yang menentukan nilai COP sistem (Chun & Kim, 2021).

Selain itu, jenis refrigeran memiliki pengaruh signifikan karena sifat termodinamika seperti tekanan kerja, panas laten penguapan, dan konduktivitas termal menentukan kemampuan sistem dalam menyerap dan melepaskan panas secara efektif (Arpagaus et al., 2018).

2.6.3 Pengaruh Kondisi Operasi Terhadap Kinerja Sistem

Kinerja pompa kalor dipengaruhi secara signifikan oleh variasi tekanan dan temperatur pada evaporator dan kondensor, yang secara langsung mengubah rasio kompresi serta COP sistem (Arpagaus et al., 2018). Penurunan temperatur sumber panas atau peningkatan temperatur beban menyebabkan kenaikan daya kompresor dan penurunan efisiensi sistem.

Studi eksperimental menunjukkan bahwa COP menurun secara non-linear ketika perbedaan temperatur sumber–beban meningkat, terutama pada aplikasi suhu tinggi. Selain itu, laju aliran refrigeran dan fluida sekunder berpengaruh langsung terhadap kapasitas perpindahan kalor dan efektivitas *heat exchanger*.

Ketidakeimbangan distribusi aliran pada evaporator/kondensor meningkatkan *pressure drop* dan *irreversibilitas* sistem. Dalam sistem laboratorium atau alat peraga praktikum, variasi kondisi operasi terbukti efektif untuk mengamati hubungan tekanan–temperatur–daya kompresor–COP secara langsung.

2.7 Teori Perancangan

Dalam merancang pompa kalor (*heat pump*) sebagai penyedia udara pengering ceri kopi skala laboratorium, pemahaman terhadap prinsip dasar pada sistem tersebut sangat penting. Pustaka ini bertujuan untuk mengkaji berbagai teori, konsep, dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan pompa kalor (*heat pump*). Dengan menelaah literatur yang relevan, diharapkan dapat diperoleh landasan teoritis yang kuat sebagai acuan dalam proses perancangan, pembangunan, dan pengujian sistem yang akan dikembangkan. Selain itu, tinjauan ini juga membantu mengidentifikasi peluang inovasi serta kendala teknis yang mungkin muncul dalam proses integrasi dua sistem tersebut.

Pada perancangan dan pembuatan *air handling unit* (AHU), AHU akan dirancang menggunakan metode proses perancangan G. Pahl and Beitz. Proses perancangan meliputi *clarification of task* sampai mendapatkan konsep desain. Setelah mendapatkan konsep desain, proses kalkulasi *sizing* diterapkan untuk mendapatkan dimensi atau spesifikasi AHU. Kemudian, *detailed design* akan dilakukan dengan bantuan *computer aided design* (CAD) yang menghasilkan gambar lengkap dengan dimensi dan spesifikasi. *Detailed design* menjadi dasar perakitan komponen.

2.8 Proses Fabrikasi dan Perakitan Pompa Kalor

2.8.1 Tahapan Fabrikasi Unit Pompa Kalor

Fabrikasi dan perakitan merupakan tahapan penting dalam pembangunan unit *heat pump* skala laboratorium karena meliputi pembuatan rangka, pemasanganudukan komponen, penyambungan perpipaan fluida kerja, serta instalasi sistem kelistrikan yang sesuai spesifikasi teknis. Proses fabrikasi dan pemasangan komponen yang dilakukan tanpa ketelitian dapat menyebabkan kesalahan pemasangan atau *fault* pada sistem, yang pada studi empiris menunjukkan bahwa kesalahan pemasangan seperti penyambungan yang tidak tepat atau kondisi instalasi yang kurang baik berdampak negatif pada performa sistem siklik, termasuk perubahan parameter tekanan dan temperatur yang tidak sesuai desain serta penurunan efisiensi operasional (*common installation faults impact performance*) pada sistem *heat pump* dan sirkulasi refrigeran yang bekerja secara siklik (Hu et al., 2021).

2.8.2 Dampak Kesalahan Instalasi Terhadap Performa Sistem

Penelitian laboratorium terhadap sistem *heat pump* modern yang diuji dengan *fault* terkontrol menunjukkan bahwa *fault-fault* instalasi seperti *restriction* atau *charge* yang tidak tepat memengaruhi indikator utama seperti tekanan dan temperatur pada komponen sistem secara kuantitatif, yang menegaskan pentingnya kontrol kualitas dalam fabrikasi dan pemasangan unit laboratorium tersebut untuk mencegah kebocoran atau degradasi kinerja alat secara keseluruhan (Hu et al., 2021).

2.8.3 Aspek Keselamatan dalam Perakitan Pompa Kalor

Perakitan komponen *heat pump* juga harus memperhatikan aspek keselamatan kerja, terutama karena sistem ini melibatkan fluida kerja bertekanan dan perangkat listrik bertegangan. Misalnya, dalam penelitian numerik mengenai perilaku refrigeran yang bocor, penanganan kebocoran fluida kerja menunjukkan potensi risiko keselamatan seperti *flammability* dan pengaruhnya terhadap pengoperasian unit jika tidak ditangani dengan protokol keselamatan yang benar, yang menandakan bahwa prosedur inspeksi dan pengujian sistem harus mencakup pemeriksaan kebocoran, tekanan pipa, serta integritas kelistrikan agar unit yang dirakit memenuhi standar teknis dan layak digunakan sebagai peraga praktikum (Jung et al., 2023).

2.8.4 Standar Acuan *Inspection Test Plan* (ITP)

Proses fabrikasi dan perakitan unit *heat pump* skala laboratorium dalam proyek akhir ini dilaksanakan dengan mengacu pada standar teknis yang relevan sebagai dasar penyusunan *Inspection Test Plan* (ITP). Penggunaan standar acuan bertujuan untuk memastikan bahwa setiap tahapan pekerjaan memenuhi persyaratan keselamatan, keandalan, dan kelayakan operasional sistem.

Dalam aspek struktur, proses fabrikasi mengacu pada standar dari International Organization for Standardization seperti ISO 2768 untuk toleransi umum dimensi dan ISO 5817 untuk kriteria penerimaan cacat pengelasan. Standar ini digunakan sebagai referensi dalam menentukan batas toleransi dimensi rangka serta kriteria visual terhadap hasil sambungan las sebelum dinyatakan layak pada dokumen ITP.

Pada tahap instalasi sistem perpipaan dan sambungan *brazing*, acuan yang digunakan adalah standar keselamatan sistem refrigerasi seperti EN 378 yang

diterbitkan oleh *European Committee for Standardization*, serta pedoman praktik instalasi sistem refrigerasi dari ASHRAE. Standar tersebut menjadi dasar dalam menetapkan prosedur uji tekanan, *vacuum test*, serta kriteria penerimaan kebocoran pada dokumen ITP.

Untuk aspek kelistrikan dan sistem kontrol, instalasi mengacu pada standar keselamatan instalasi listrik dari International *Electrotechnical Commission*, khususnya IEC 60204 dan IEC 60364. Standar ini digunakan sebagai rujukan dalam penyusunan *acceptance criteria* terkait resistansi isolasi, sistem pembumian, serta perlindungan arus lebih pada unit *heat pump*.

Pada tahap perakitan mekanikal kompresor dan komponen berputar, evaluasi vibrasi dan kestabilan operasi mengacu pada standar ISO 10816 mengenai batas getaran mesin berputar. Standar ini menjadi dasar dalam menentukan batas maksimum vibrasi yang diperbolehkan dalam pengujian performa sistem.

Dengan mengacu pada standar-standar tersebut, penyusunan ITP dalam proyek akhir ini tidak hanya bersifat administratif, tetapi memiliki landasan teknis yang jelas dan terukur. Setiap *acceptance criteria* yang ditetapkan dalam tabel ITP diturunkan dari batasan yang direkomendasikan dalam standar terkait, sehingga sistem yang dihasilkan memenuhi prinsip keselamatan dan praktik teknik yang berlaku.

2.9 Inspection Test Plan (ITP)

Inspection Test Plan (ITP) merupakan dokumen rencana inspeksi dan pengujian yang digunakan untuk memastikan bahwa proses fabrikasi dan perakitan suatu sistem telah sesuai dengan spesifikasi teknis dan standar mutu yang ditetapkan. Dokumen ini mencakup uraian item-item yang diperiksa, metode inspeksi atau pengujian yang akan dilakukan, kriteria penerimaan, serta prosedur dokumentasi hasil pengujian sehingga setiap tahapan pekerjaan dapat dikontrol dan dievaluasi secara sistematis untuk memenuhi persyaratan mutu dalam suatu proyek atau produksi (Chin et al., 2024).

Dalam pembangunan *heat pump* sebagai alat praktikum, ITP berfungsi untuk memastikan bahwa seluruh komponen terpasang dengan benar, tidak terjadi kebocoran fluida kerja, dan sistem mampu beroperasi dengan aman sesuai standar teknis yang telah disyaratkan. Penerapan ITP membantu proses fabrikasi dan

perakitan menjadi lebih terstruktur dengan langkah-langkah inspeksi yang jelas, sehingga kesalahan pemasangan atau pengujian dapat terdeteksi lebih awal dan alat yang dihasilkan layak digunakan dalam kegiatan pembelajaran teknik. Pendekatan sistematis ini merupakan bagian dari kerangka kerja *quality assurance* yang diperlukan untuk memastikan keluaran sistem memenuhi spesifikasi kualitas dan keamanan operasional.

2.10 Penerapan *Inspection Test Plan* (ITP) pada Pompa Kalor

Inspection Test Plan (ITP) merupakan dokumen pengendalian mutu yang digunakan untuk memastikan bahwa setiap tahapan fabrikasi, perakitan, dan pengujian suatu sistem dilakukan sesuai standar dan spesifikasi teknis yang ditetapkan. Dalam praktik manajemen mutu modern, perencanaan inspeksi menjadi bagian penting dari *quality assurance* karena mencakup identifikasi item yang harus diperiksa, metode pemeriksaan yang digunakan, kriteria penerimaan, serta dokumentasi hasil inspeksi sebagai bukti kesesuaian proses dan produk terhadap persyaratan desain (Martinez & Ahmad, 2021). Pendekatan ini memastikan bahwa proses produksi berlangsung secara terkendali dan terdokumentasi dengan baik.

Dalam rancang bangun *heat pump* skala laboratorium, ITP diterapkan untuk mengontrol kualitas rangka, ketepatan pemasangan komponen, sambungan perpipaan refrigeran, serta hasil pengujian kebocoran dan performa sistem. Studi eksperimental mengenai pengujian dan evaluasi performa *heat pump* menunjukkan bahwa ketidaksesuaian instalasi atau kesalahan perakitan dapat berdampak langsung terhadap parameter tekanan, temperatur, serta nilai *Coefficient of Performance* (COP), sehingga kontrol kualitas pada tahap fabrikasi dan instalasi menjadi sangat penting (Wang et al., 2024). Dengan adanya ITP, proses pembuatan menjadi lebih sistematis dan risiko kesalahan yang berpotensi membahayakan pengguna dapat diminimalkan melalui inspeksi dan verifikasi yang terstruktur.

Penerapan ITP juga memberikan nilai tambah dalam proyek akhir ini karena tidak hanya menghasilkan alat peraga praktikum, tetapi juga menyediakan pedoman inspeksi dan pengujian yang terdokumentasi dan dapat digunakan secara berkelanjutan oleh laboratorium untuk kegiatan pengoperasian serta pemeliharaan unit *heat pump*. Prinsip *process-based quality control* menekankan bahwa dokumentasi inspeksi yang konsisten berkontribusi pada peningkatan keandalan

sistem dan kesinambungan standar operasional dalam jangka panjang (Martinez & Ahmad, 2021).

2.11 Kopi dan Proses Pengeringan Ceri Kopi

2.11.1 Tahapan Pascapanen Kopi

Kopi merupakan salah satu komoditas perkebunan penting yang banyak diperdagangkan di dunia. Kualitas kopi tidak hanya ditentukan oleh faktor budidaya, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh proses penanganan pascapanen. Proses pascapanen bertujuan untuk mengubah buah kopi segar (*coffee cherry*) menjadi biji kopi hijau (*green bean*) yang siap disimpan, diperdagangkan, atau diproses lebih lanjut menjadi produk kopi. Penanganan pascapanen yang baik sangat berpengaruh terhadap mutu fisik, kimia, serta karakteristik sensori kopi yang dihasilkan (Florac et al., 2017).

Secara umum, proses pascapanen kopi meliputi beberapa tahapan utama yaitu pemanenan, sortasi, pengolahan buah kopi, pengeringan, serta pengupasan kulit tanduk. Pemanenan dilakukan ketika buah kopi telah mencapai tingkat kematangan optimal yang biasanya ditandai dengan warna merah cerah. Buah kopi yang matang memiliki kualitas terbaik karena kandungan gula dan senyawa aromatikny telah berkembang dengan baik (Ghosh & Venkatachalapathy, 2014).

Setelah proses pemanenan, buah kopi umumnya melalui tahap penyortiran untuk memisahkan buah berkualitas baik dari buah yang cacat, belum matang, maupun yang tercampur dengan kotoran. Tahap ini berperan penting dalam menjamin homogenitas bahan baku sebelum memasuki proses pengolahan lebih lanjut. Selanjutnya, buah kopi diolah menggunakan beberapa metode utama seperti metode kering (*dry process*), metode basah (*wet process*), dan metode semi-basah (*honey process*). Masing-masing metode memiliki tahapan pengolahan yang berbeda serta memberikan pengaruh terhadap profil cita rasa kopi yang dihasilkan (Florac et al., 2017).

Setelah proses pengolahan, biji kopi kemudian dikeringkan untuk menurunkan kadar air hingga mencapai kadar air yang aman untuk penyimpanan. Pengeringan merupakan salah satu tahap paling penting dalam proses pascapanen karena dapat mempengaruhi kualitas biji kopi, termasuk aroma, warna, dan cita rasa kopi setelah proses penyangraian (Aung Moon et al., 2024).

2.11.2 Karakteristik Ceri Kopi

Ceri kopi merupakan buah dari tanaman kopi (*Coffea sp.*) yang memiliki bentuk menyerupai buah beri dengan beberapa lapisan struktur. Secara umum, ceri kopi terdiri dari kulit luar (*exocarp*), daging buah (*mesocarp*), lapisan lendir atau *mucilage*, kulit tanduk (*parchment*), serta biji kopi yang berada di bagian paling dalam. Struktur tersebut mempengaruhi proses pengolahan dan pengeringan kopi karena setiap lapisan memiliki kandungan air dan sifat fisik yang berbeda (Ghosh & Venkatachalapathy, 2014).

Tingkat kematangan ceri kopi merupakan faktor penting dalam menentukan kualitas kopi. Buah kopi yang belum matang umumnya berwarna hijau, sedangkan buah yang matang berwarna merah cerah dan memiliki tekstur yang lebih padat serta permukaan yang mengkilap. Buah kopi yang terlalu matang biasanya berwarna merah gelap hingga hitam. Perbedaan tingkat kematangan ini dapat mempengaruhi kandungan gula, senyawa kimia, dan kualitas sensori kopi yang dihasilkan (Florac et al., 2017).

Selain itu, ceri kopi juga mengandung berbagai senyawa kimia penting seperti kafein, asam klorogenat, dan berbagai senyawa fenolik yang berperan dalam pembentukan aroma dan rasa kopi setelah proses pengolahan dan penyangraian. Selama proses pascapanen, terutama pada tahap fermentasi dan pengeringan, komposisi senyawa tersebut dapat mengalami perubahan yang mempengaruhi kualitas akhir kopi (Kulapichitr et al., 2022).

2.11.3 Kadar Air pada Ceri Kopi

Kadar air merupakan salah satu parameter penting dalam proses pengolahan kopi, khususnya pada tahap pengeringan. Ceri kopi yang baru dipanen memiliki kadar air yang cukup tinggi sehingga rentan terhadap pertumbuhan mikroorganisme dan kerusakan kualitas apabila tidak segera dilakukan proses pengeringan (Aung Moon et al., 2024).

Secara umum, buah kopi yang baru dipanen memiliki kadar air sekitar 55–60% (basis basah). Melalui proses pengeringan, kadar air tersebut harus diturunkan hingga sekitar 10–12% agar biji kopi dapat disimpan dengan aman tanpa risiko pertumbuhan jamur maupun kerusakan mutu selama penyimpanan (Ghosh & Venkatachalapathy, 2014).

Pengeringan kopi dapat dilakukan secara alami menggunakan sinar matahari atau menggunakan pengering mekanis dengan aliran udara panas. Penggunaan metode pengeringan yang tepat sangat penting karena dapat mempengaruhi laju penurunan kadar air serta kualitas biji kopi yang dihasilkan. Selain itu, proses pengeringan juga berperan dalam mengurangi aktivitas mikroba dan mencegah terbentuknya kontaminan seperti mikotoksin pada kopi (Abreu et al., 2025).

Selama proses pengeringan, air yang terdapat di dalam ceri kopi akan berpindah dari bagian dalam biji menuju permukaan dan kemudian menguap ke lingkungan. Proses perpindahan massa ini dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti temperatur udara pengering, kelembaban relatif udara, kecepatan aliran udara, serta karakteristik bahan yang dikeringkan. Oleh karena itu, pengendalian kondisi pengeringan menjadi sangat penting untuk menghasilkan biji kopi dengan kualitas yang baik dan stabil selama penyimpanan (Yanel et al., 2024).

2.11.4 Pengeringan Ceri Kopi

Dalam pengeringan ceri kopi kecepatan aliran udara merupakan salah satu parameter operasi yang sangat memengaruhi keberhasilan proses pengeringan ceri kopi. Aliran udara berfungsi sebagai media pembawa panas menuju permukaan bahan sekaligus mengangkut uap air hasil penguapan ke luar ruang pengering. Semakin tinggi kecepatan udara, koefisien perpindahan panas dan massa akan meningkat sehingga laju pengeringan menjadi lebih cepat. Namun, peningkatan kecepatan udara yang terlalu tinggi tidak selalu meningkatkan laju pengeringan secara signifikan karena proses perpindahan kadar air pada tahap akhir lebih dipengaruhi oleh difusi kelembapan dari bagian dalam bahan menuju permukaan. Selain itu, kecepatan udara yang berlebihan dapat meningkatkan konsumsi energi sistem pengering (Mujumdar, 2006).

Pada pengeringan ceri kopi, kecepatan aliran udara sekitar 1 m/s banyak digunakan karena mampu menghasilkan distribusi udara yang baik serta mempercepat proses pengeringan tanpa menurunkan mutu produk. Penelitian (Yuwana & Sidebang, 2023) pada tandem *hybrid solar-biomass dryer* menunjukkan bahwa ruang pengering dengan kecepatan udara cerobong sebesar $1,3 \pm 0,44$ m/s mampu menghasilkan temperatur sekitar $59,8 \pm 6,3^{\circ}\text{C}$ dan kelembaban relatif $27,5 \pm 13,0\%$, sehingga proses pengeringan ceri kopi berlangsung lebih cepat hingga

mencapai kadar air akhir 12%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kecepatan udara yang mendekati 1 m/s efektif untuk mendukung proses pengeringan ceri kopi melalui peningkatan perpindahan panas dan massa selama proses pengeringan.

Selain kecepatan aliran udara, temperatur pengeringan juga menjadi faktor penting yang menentukan efisiensi proses dan kualitas akhir ceri kopi. Pemilihan temperatur pengeringan pada rentang 40 – 45°C didasarkan pada pertimbangan keseimbangan antara peningkatan laju pengeringan dan upaya mempertahankan mutu produk. Temperatur yang lebih tinggi mampu meningkatkan energi panas yang diterima bahan sehingga mempercepat penguapan air, tetapi penggunaan temperatur yang terlalu tinggi dapat meningkatkan risiko kerusakan mutu akibat degradasi senyawa penting, perubahan karakteristik fisik, maupun penurunan kualitas sensori kopi. Penelitian (Alves et al., 2017) menunjukkan bahwa proses pengeringan kopi Arabika pada temperatur sekitar 40 – 45°C mampu mempertahankan kualitas fisiologis dan sensori biji kopi karena berada pada kondisi yang cukup untuk mengurangi kadar air tanpa memberikan paparan panas berlebih. Oleh karena itu, rentang temperatur 40–45°C dipilih sebagai kondisi operasi yang optimal untuk mendukung proses pengeringan secara efektif dan menjaga kualitas ceri kopi.

Berdasarkan teori dan hasil penelitian tersebut, proyek akhir ini menggunakan kecepatan aliran udara sekitar 1 m/s sebagai acuan dalam perancangan sistem pompa kalor. Kecepatan tersebut diharapkan mampu menghasilkan distribusi udara yang merata di dalam ruang pengering, meningkatkan perpindahan panas dan massa, serta mendukung tercapainya temperatur udara pengering sebesar 40 – 45°C dengan kelembapan relatif 25 – 30% sesuai spesifikasi rancangan. Kombinasi parameter tersebut diharapkan mampu menghasilkan kondisi pengeringan yang stabil, efisien secara energi, dan tetap mempertahankan kualitas produk akhir ceri kopi.