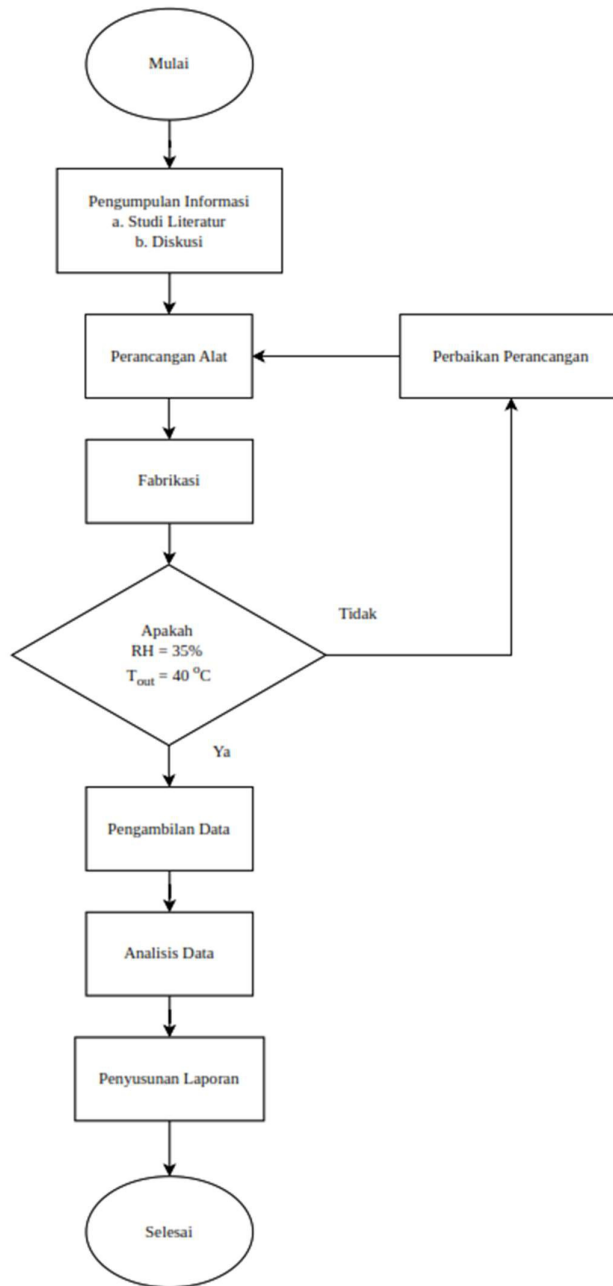


BAB III

METODOLOGI

Berikut ini beberapa tahapan yang akan dilakukan untuk menyelesaikan Proyek Akhir ini seperti Gambar 3.1



Gambar 3.1 Diagram alir

3.1 Pengumpulan Informasi

Untuk mencapai tujuan proyek akhir yaitu merancang dan membangun pompa kalor (*heat pump*) sebagai penyedia udara pengering ceri kopi skala laboratorium diperlukan pengumpulan informasi yang sistematis dan relevan. Tahapan pengumpulan informasi dilakukan melalui beberapa metode sebagai berikut:

A. Studi Literatur

Studi literatur adalah kegiatan mengumpulkan, mengevaluasi, dan menyintesis informasi dari berbagai sumber seperti buku, jurnal, artikel, dan laporan penelitian yang relevan dengan topik yang sedang diteliti. Tujuannya adalah untuk membangun landasan teori, mengidentifikasi celah pengetahuan, dan memberikan konteks bagi proyek akhir yang dilakukan. Memiliki fungsi untuk mengetahui dan memperdalam informasi yang berhubungan dengan pompa kalor (*heat pump*) dalam rangka memperoleh dasar teori.

B. Diskusi

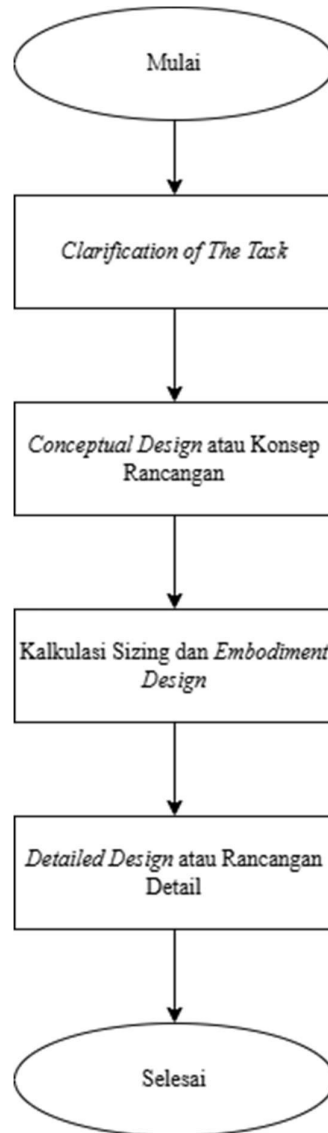
Diskusi merupakan sebuah teknik penelitian yang melibatkan interaksi langsung antara peneliti dan kelompok untuk mendapat wawasan, pandangan, atau pemahaman mendalam tentang topik proyek akhir.

3.2 Perancangan Alat

Proses perancangan menggunakan metode yang dikembangkan oleh Gerhard Pahl dan Wolfgang Beitz. Metode ini membagi proses perancangan menjadi empat tahapan utama, yaitu *clarification of the task*, *conceptual design*, *embodiment design*, dan *detail design*, yang bertujuan memastikan solusi yang dihasilkan optimal secara fungsional, teknis, dan ekonomis. Pendekatan sistematis ini sangat relevan untuk perancangan *heat pump* karena sistem *heat pump* merupakan sistem termal kompleks yang melibatkan interaksi antara komponen termodinamika, perpindahan kalor, fluida kerja, dan sistem kontrol (Kroes, 2009). Alat dirancang untuk merepresentasikan siklus kompresi uap standar secara nyata, sehingga dapat digunakan sebagai media pembelajaran yang mendukung pemahaman konsep termodinamika dan konversi energi. Oleh karena itu, spesifikasi desain ditentukan

dengan mempertimbangkan aspek fungsional, edukatif, keselamatan, serta kesesuaian dengan skala laboratorium.

Berikut ini merupakan proses perancangan alat yang didasarkan pada buku dalam *Engineering Design: A Systematic Approach* (Kroes, 2009) yang ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram alir perancangan

3.2.1 *Clarification of The Task*

Tahap pertama yaitu *clarification of the task*, yang mengidentifikasi kebutuhan fungsional dan batasan teknis dari sistem *heat pump*. Tahap ini mencakup analisis

kebutuhan pengguna seperti kapasitas pemanasan atau pengeringan, rentang temperatur operasi, efisiensi energi, jenis refrigeran, serta kondisi lingkungan operasi. Selain nantinya sebagai peraga edukasi, namun pada proyek akhir ini kebutuhan fungsional *heat pump* adalah dirancang sebagai alat pengering kopi yang harus mampu untuk mengeringkan 1 kg ceri kopi dari kadar air (*moisture content – mc*) 40% menjadi 11%. Batasan teknis *heat pump* tersaji pada Tabel 3.1 Basis perancangannya adalah pengeringan 1 kilogram ceri kopi yang memiliki diameter ceri 15 mm, dan jumlah ceri kopi 700 buah/kg. Refrigeran yang digunakan berorientasi ramah lingkungan.

Tabel 3.1 Batasan teknis *heat pump*

No.	Parameter	Nilai
1.	Temperatur lingkungan, T_{ling} (°C)	30 – 32
2.	Kelembaban relatif lingkungan, RH (%)	51 – 54%
3.	Kecepatan udara keluar <i>heat pump</i> , $v_{u,out}$ (m/s)	1
4.	Temperatur udara keluar <i>heat pump</i> , $T_{u,o}$ (°C)	40 - 45
5.	RH udara keluar <i>heat pump</i> (%)	25 - 30%

Parameter operasi pada Tabel 3.1 ditetapkan berdasarkan kondisi lingkungan laboratorium, karakteristik iklim tropis Indonesia, serta kebutuhan proses pengeringan menggunakan *heat pump*. Temperatur lingkungan sebesar 30 – 32°C dan kelembaban relatif 51 – 54% digunakan sebagai kondisi udara masuk yang mewakili kondisi aktual pengujian. Sistem dirancang menghasilkan udara keluar dengan temperatur 40–45°C dan kelembaban relatif 25–30%, karena rentang tersebut mampu meningkatkan kemampuan udara dalam menyerap uap air tanpa menurunkan kualitas produk yang dikeringkan. Laju aliran udara sebesar 1 m/s dipilih agar distribusi udara di ruang pengering merata dan perpindahan panas konveksi berlangsung optimal, sehingga proses pengeringan menjadi lebih efektif dengan konsumsi energi yang tetap efisien.

3.2.2 *Conceptual Design* atau Konsep Rancangan

Pada tahap ini, sistem *heat pump* diuraikan menjadi fungsi-fungsi dasar seperti kompresi, kondensasi, ekspansi, dan evaporasi. Metode *functional decomposition* dan *morphological chart* digunakan untuk menghasilkan berbagai alternatif solusi, seperti pemilihan jenis kompresor (*scroll*, *reciprocating*, *rotary*), jenis *heat exchanger* (*fin-and-tube*, *plate heat exchanger*), serta konfigurasi sistem (*single-stage* atau *cascade*). Alternatif konsep kemudian dievaluasi berdasarkan kriteria teknis seperti efisiensi termal, kompleksitas, biaya, dan keandalan untuk memilih konsep terbaik (Kroes, 2009). Kriteria yang ditetapkan dalam proyek akhir ini dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Kriteria untuk pemilihan konsep rancangan

No	Item	Kriteria Nilai Tinggi
A	Sistem <i>Heat pump</i>	
1.	Efisiensi energi	COP tinggi dan stabil pada beban operasi
2.	Kesesuaian aplikasi	Mampu menyediakan udara pengering ceri kopi
3.	Keandalan sistem	Operasi stabil dalam skala laboratorium
4.	Kemudahan fabrikasi	Struktur mudah dibuat dan dirakit
B	Kompresor	
1.	Harga	Ekonomis dan terjangkau
2.	Ketersediaan	Mudah diperoleh di pasar lokal
3.	Daya kerja	Sesuai kapasitas sistem pengering
4.	Efisiensi	Konsumsi daya rendah dengan performa tinggi
C	Kondensor (<i>Heat Exchanger</i>)	
1.	Efektivitas perpindahan kalor	Transfer panas tinggi ke udara pengering
2.	Konstruksi	Kompak dan mudah diintegrasikan dengan AHU

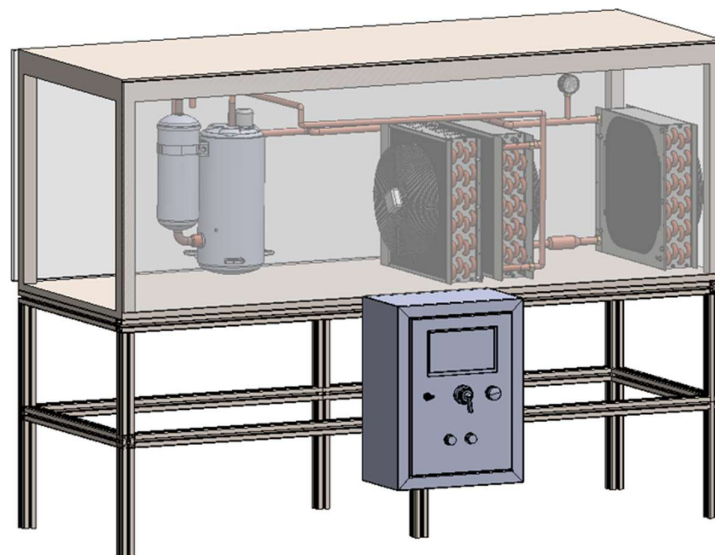
Lanjutan Tabel 3.2 Kriteria untuk pemilihan konsep rancangan

No	Item	Kriteria Nilai Tinggi
3.	Perawatan	Mudah dibersihkan dan diservis
4.	Material	Tahan korosi dan tekanan kerja
D	Evaporator	
1.	Efektivitas pendinginan	Mampu menyerap panas dengan optimal
2.	Stabilitas operasi	Tidak mudah <i>frost</i> pada kondisi operasi
3.	Integrasi sistem	Mudah dihubungkan dengan siklus refrigerasi
E	Katup Ekspansi	
1.	Kontrol aliran	Stabil dalam mengatur laju refrigeran
2.	Akurasi kerja	Respons cepat terhadap perubahan beban
3.	Keandalan	Tidak mudah tersumbat atau rusak
F	Refrigeran	
1.	Keamanan	Tidak mudah terbakar dan aman digunakan
2.	Lingkungan	GWP rendah dan ramah lingkungan
3.	Efisiensi termal	Memiliki efek refrigerasi tinggi
4.	Ketersediaan	Mudah diperoleh di pasar
G	Sistem Pengering (AHU + Ruang Pengering)	
1.	Distribusi area	Aliran udara merata pada ruang pengering
2.	Kontrol temperatur	Stabil sesuai <i>setpoint</i> pengeringan
3.	Kontrol kelembapan	Mampu menurunkan <i>RH</i> secara efektif
4.	Integrasi sistem	Mudah dikombinasikan dengan <i>heat pump</i>
H	Sistem Keseluruhan	
1.	Keselamatan	Aman terhadap tekanan dan listrik

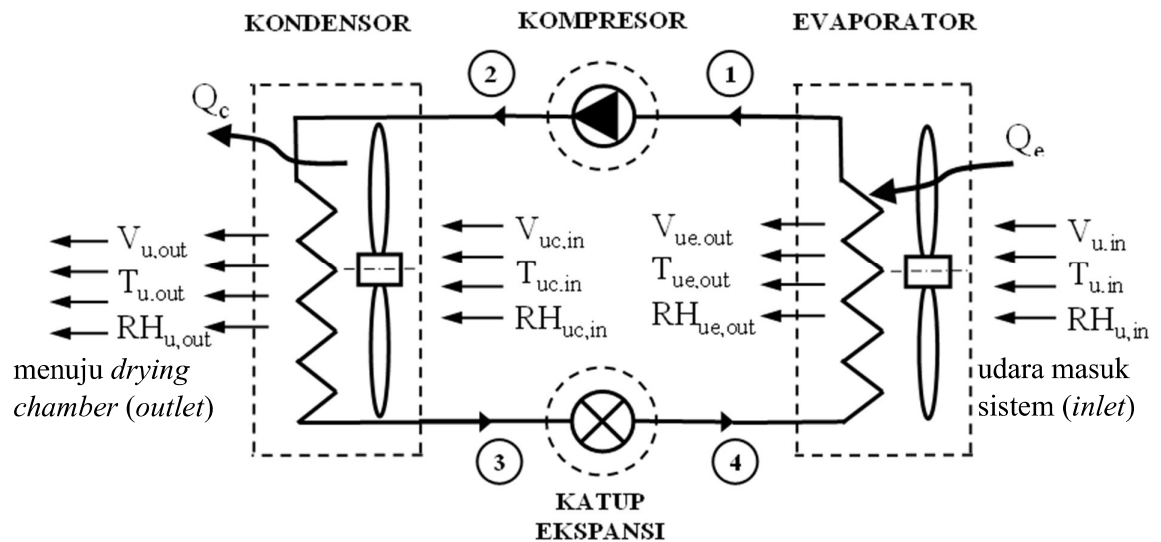
Lanjutan Tabel 3.2 Kriteria untuk pemilihan konsep rancangan

No	Item	Kriteria Nilai Tinggi
2.	Kemudahan operasi	Mudah dioperasikan pada skala laboratorium
3.	Perawatan	Mudah dalam <i>maintenance</i> sistem
4.	Stabilitas performa	Parameter operasi tidak fluktuatif

Konsep rancangan digambarkan dalam suatu skema yang menggambarkan integrasi sistem refrigerasi dan ruang pengering yang dapat dilihat pada Gambar 3.3 dan Gambar 3.4.



Gambar 3.3 Desain keseluruhan alat



Gambar 3.4 Desain sistem pompa kalor

3.2.3 Morfologi Prinsip Kerja

Berikut adalah morfologi prinsip kerja pompa kalor (*heat pump*) dalam bentuk *morphological chart* yang digunakan dalam tahap perancangan konseptual (*conceptual design*) menurut Pahl & Beitz. menampilkan beberapa alternatif solusi untuk setiap sub fungsi utama sistem seperti pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Morfologi prinsip kerja

No	Sub sistem	Alternatif I	Alternatif II	Alternatif III	Alternatif IV
1.	Sumber energi	Listrik PLN	Hybrid PLN-surya	Listrik PLN	Listrik PLN
2.	Sistem refrigerasi	Single stage	Single stage	Single stage	Single stage
3.	Heat exchanger	Air cooled	Air cooled	Fin-tube	Fin-tube
4.	Katup ekspansi	TXV	TXV	Kapiler	Kapiler
5.	Refrigeran	R134a	R134a	R290	R134a
6.	Sistem sirkulasi udara	Centrifugal fan	Axial fan	Axial fan	Centrifugal fan

3.2.4 Proses Eliminasi

Pada tahap perancangan konseptual, telah dihasilkan beberapa alternatif kombinasi sistem yang meliputi jenis sistem kompresi, tipe *heat exchanger*, katup ekspansi, serta jenis refrigeran. Untuk menentukan konsep terbaik yang akan dikembangkan lebih lanjut, dilakukan proses seleksi awal melalui metode eliminasi.

Metode eliminasi bertujuan untuk menyaring alternatif yang tidak memenuhi kriteria dasar perancangan berdasarkan aspek biaya, kemudahan manufaktur, keselamatan (*safety*), performa operasional, serta ketersediaan komponen di pasaran. Alternatif yang tidak memenuhi persyaratan minimum pada salah satu aspek utama akan dieliminasi sebelum dilakukan tahap penilaian berbobot.

Tabel 3.4 berikut menunjukkan hasil evaluasi awal terhadap setiap alternatif berdasarkan kriteria yang telah ditentukan. Alternatif yang memenuhi kriteria akan dipertahankan untuk tahap seleksi lanjutan, sedangkan alternatif yang memiliki kelemahan signifikan akan dieliminasi dari proses perancangan berikutnya.

Tabel 3.4 Tabel eliminasi

No.	Kriteria	Konsep alternatif 1	Konsep alternatif 2	Konsep alternatif 3	Konsep alternatif 4
1.					
2.					
3.					
4.					

3.2.5 Kalkulasi *Sizing* dan *Embodiment Design*

Setelah mendapatkan konsep rancangan, kemudian setiap komponen dikalkulasi untuk menentukan ukuran (*size*) dan spesifikasi setiap komponen. Komponen-komponen yang akan dikalkulasi *sizing* adalah kompresor, kondensor, katup ekspansi, dan evaporator.

Kalkulasi didasarkan pada fungsi alat untuk mengeringkan 1 kg ceri kopi dari kadar air (*moisture content* – mc) 40% menjadi 11%. Basis perancangannya adalah pengeringan 1 kilogram ceri kopi yang memiliki diameter ceri 15 mm, dan jumlah ceri kopi 700 buah /kg.

Udara lingkungan perkebunan kopi, dengan kondisi masuk *heat pump* bertemperatur 22 °C dan *RH* 80%, akan mengalami proses dehumidifikasi pada evaporator sehingga kelembapan relatif udara dirancang turun hingga sekitar 40%. Selanjutnya, udara dipanaskan pada kondensor hingga mencapai temperatur 40 °C sebelum digunakan sebagai media pengering ceri kopi. Pemilihan kondisi udara tersebut didasarkan pada penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa proses pengeringan ceri kopi dipengaruhi secara signifikan oleh temperatur dan kelembapan relatif udara pengering. (Coradi et al., 2014) mengevaluasi pengeringan ceri kopi pada kelembapan relatif 40%, 50%, dan 60% dengan berbagai temperatur udara, dan menunjukkan bahwa *RH* 40% menghasilkan laju pengeringan yang lebih tinggi dibandingkan *RH* 50% dan 60% karena udara memiliki kapasitas yang lebih besar untuk menyerap uap air dari bahan. Selain itu, (Isquiredo et al., 2013) melaporkan bahwa penggunaan temperatur udara pengering pada kisaran 40–45 °C dengan kelembapan udara yang rendah mampu meningkatkan laju difusi air dan mempercepat proses pengeringan tanpa menurunkan mutu kopi. Setiap perubahan kondisi udara tersebut kemudian diplot pada diagram psikrometri untuk memperoleh sifat-sifat termodinamika udara. Berdasarkan diagram psikrometri, perubahan entalpi udara dihitung pada setiap titik keadaan, kemudian selisih entalpi dikalikan dengan laju alir massa udara untuk menentukan kapasitas pendinginan evaporator dan kapasitas pemanasan kondensor sebagai dasar dalam perancangan (*sizing*) komponen sistem pompa kalor.

Analisis energi pada sistem *heat pump* didasarkan pada prinsip konservasi energi atau Hukum I Termodinamika. Sistem *heat pump* termasuk dalam sistem aliran terbuka (*control volume*) karena terdapat aliran massa refrigeran yang masuk dan keluar pada setiap komponen utama, yaitu kompresor, kondensor, katup ekspansi, dan evaporator.

Persamaan umum kesetimbangan energi untuk *control volume* dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m} \left[(\Delta h) + \frac{(\Delta v^2)}{2} + g(\Delta z) \right] \quad (3.1)$$

(Moran & Shapiro, 2016)

Dengan:

$\frac{dE}{dt}$ = Perubahan energi dalam *control volume* (kW)

$\dot{Q}$ = Laju perpindahan kalor (kW)

$\dot{W}$ = Laju kerja yang terjadi pada sistem (kW)

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

Δh = Selisih energi internal spesifik (kJ/kg)

Δv = Selisih kecepatan aliran fluida (m/s)

g = Percepatan gravitasi (m/s²)

Δz = Ketinggian terhadap bidang referensi (m)

Pada sistem *heat pump*, analisis dilakukan pada kondisi *steady state* sehingga tidak terjadi perubahan energi di dalam *control volume*. Oleh karena itu:

$$\frac{dE}{dt} = 0$$

Selain itu, perubahan energi kinetik dan energi potensial refrigeran dianggap relatif kecil dibandingkan perubahan energi entalpi sehingga dapat diabaikan:

$$\frac{\Delta v^2}{2} = 0$$

$$g\Delta z = 0$$

Maka persamaan kesetimbangan energi pada kondisi aliran *steady state* dapat disederhanakan menjadi:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}_{ref}(h_{out} - h_{in}) \quad (3.2)$$

1. Kompresor

Pada kompresor terjadi proses pemasukan kerja untuk meningkatkan tekanan dan temperatur refrigeran. Perpindahan kalor dari kompresor ke lingkungan diabaikan sehingga:

$$\dot{Q}_{comp} = 0$$

Dengan refrigeran masuk pada titik 1 dan keluar pada titik 2 seperti pada gambar Gambar 2.2, maka persamaan energi menjadi:

$$W_{comp} = \dot{m}_{ref}(h_2 - h_1) \quad (3.3)$$

Dengan:

$\dot{m}_u$ = laju aliran massa udara (kg/s)

h_1 = Entalpi refrigeran di titik 1 (kJ/kg)

h_2 = Entalpi refrigeran di titik 2 (kJ/kg)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa kerja kompresor digunakan untuk meningkatkan energi refrigeran, yang ditunjukkan oleh peningkatan entalpi dari kondisi masuk menuju kondisi keluar kompresor.

2. Kondensor

Pada kondensor terjadi pelepasan energi panas dari refrigeran menuju udara pengering. Karena tidak terdapat kerja mekanik pada kondensor:

Dengan kondisi refrigeran masuk pada titik 2 dan keluar pada titik 3 berdasarkan pada Gambar 2.2, maka berdasarkan persamaan (3.2):

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{reff}(h_2 - h_3) \quad (3.4)$$

Di mana:

$\dot{m}_{reff}$ = laju aliran massa refrigeran (kg/s)

h_2 = Entalpi refrigeran di titik 2 (kJ/kg)

h_3 = Entalpi refrigeran di titik 3 (kJ/kg)

3. Evaporator

Pada evaporator terjadi proses penyerapan panas dari lingkungan menuju refrigeran. Karena tidak terdapat kerja pada evaporator:

$$\dot{W} = 0$$

Dengan kondisi udara masuk pada titik 4 dan keluar pada titik 1 berdasarkan pada Gambar 2.2, maka berdasarkan persamaan (3.2):

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{reff}(h_1 - h_4) \quad (3.5)$$

Di mana:

$\dot{m}_{reff}$ = laju alir massa refrigeran (kg/s)

h_1 = entalpi refrigeran di titik 1 (kJ/kg)

h_4 = entalpi refrigeran di titik 4 (kJ/kg)

4. Katup Ekspansi

Katup ekspansi berfungsi untuk menurunkan tekanan dan temperatur refrigeran sebelum memasuki evaporator. Penurunan tekanan ini menyebabkan sebagian refrigeran mengalami *flashing*, sehingga kondisi refrigeran sesuai untuk menyerap panas pada evaporator. Katup ekspansi menjadi komponen penting dalam mengatur kestabilan siklus kompresi uap.

Pada katup ekspansi terjadi proses penurunan tekanan refrigeran tanpa adanya perpindahan kalor dan kerja, sehingga:

$$\dot{Q} = 0$$

$$\dot{W} = 0$$

Berdasarkan persamaan kesetimbangan energi pada persamaan (3.2) dan Gambar 2.2:

$$\dot{m}_{ref}(h_4 - h_3) = 0$$

Maka diperoleh:

$$h_3 = h_4 \quad (3.6)$$

Dengan:

h_3 = entalpi refrigeran di titik 3 (kJ/kg)

h_4 = entalpi refrigeran di titik 4 (kJ/kg)

Hal ini menunjukkan bahwa proses pada katup ekspansi berlangsung secara isentalpik, yaitu nilai entalpi refrigeran sebelum dan sesudah ekspansi dianggap tetap.

Dikarenakan komponen utama sistem refrigerasi sudah terstandarkan maka proses *embodiment design* dilakukan dengan cara mencari dan memilih sistem pengkondisian udara (*air conditioning* – AC) standar (0,5 PK atau 1 PK atau 1,5 PK atau 2 PK) yang mendekati hasil kalkulasi. Kemudian spesifikasi AC standar yang telah dipilih dimodifikasi untuk memenuhi kebutuhan sistem pompa kalor.

3.2.6 *Detailed Design* atau Rancangan Detail

Detailed design merupakan proses pengintegrasian komponen pompa kalor hasil *emdbodiment* menjadi satu rangkaian yang dilengkapi dengan instrumentasi. Rangkaian dan instrumentasi digambarkan secara 3-dimensi menggunakan *software* SolidWorks. Kemudian gambar 3-dimensi diturunkan menjadi gambar kerja untuk proses fabrikasi dan perakitan.

3.2.7 Penentuan alternatif desain

Penentuan alternatif desain dilakukan dengan tujuan untuk mencari sistem yang dapat digunakan dalam rancangan desain proyek akhir ini dan langkah selanjutnya dari proses eliminasi sehingga dapat dihasilkan kombinasi desain yang

tepat guna. Berdasarkan proses eliminasi yang telah dilakukan maka dapat ditentukan alternatif desain.

3.2.8 Penentuan kriteria dan bobot nilai

Penentuan kriteria dan bobot nilai bertujuan untuk memberikan penilaian terhadap setiap alternatif desain sehingga dapat digunakan sebagai dasar penentuan desain yang akan digunakan. Proses ini didasarkan pada data dari hasil proses pengumpulan informasi yang disusun berdasarkan *guideline* VDI 2225 tentang “*points awarded in use-value analysis and guideline*” sesuai dengan Tabel 3.5 di bawah ini:

Tabel 3.5 *Guideline VDI 2225*

<i>Value scale</i>			
<i>Use-value analysis</i>		<i>Guideline VDI 2225</i>	
Pts.	<i>Meaning</i>	Pts.	<i>Meaning</i>
0	<i>Absolutiely useless solution</i>	0	<i>Unsatisfactory</i>
1	<i>Very inadequate solution</i>		
2	<i>Weak solution</i>	1	<i>Just tolerable</i>
3	<i>Tolerable solution</i>		
4	<i>Adequate solution</i>	2	<i>Adequate</i>
5	<i>Satisfactory solution</i>		
6	<i>Good solution with few drawbacks</i>	3	<i>Good</i>
7	<i>Good solution</i>		
8	<i>Very good solution</i>	4	<i>Very good (ideal)</i>
9	<i>Solution exceding the requirement</i>		
10	<i>Ideal solution</i>		

(Kroes, 2009)

3.3 Proses Fabrikasi dan Perakitan

Proses fabrikasi dan perakitan dilakukan untuk mengintegrasikan komponen-komponen pompa kalor dengan sistem perpipaan dan instrumentasinya, dan berbasis pada rancangan detail. Proses fabrikasi meliputi pemotongan pipa

tembaga, *flaring*, *swaging*, dan *brazing* untuk proses penyambungan pipa. Instrumentasi yang dipasang pada pipa atau *inline* meliputi: *thermocouple*, *pressure gauge*, dan *sight glass*. Sedangkan instrumen tambahan yang tidak *inline* meliputi *anemometer*, *thermohygrometer*, dan *electric power meter*. Proses fabrikasi dan perakitan dilakukan di *Teaching Factory* (tefa) *Manufacture* Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro.

3.4 Pengujian Alat

1. Pengujian Fungsional

Sebelum pengujian fungsional, manual pengoperasian alat dibuat untuk dapat menjalankan pompa kalor. Saat pompa kalor dioperasikan, pengecekan dilakukan pada:

a. Pengoperasian normal sistem

Pengujian fungsional dilakukan melalui proses pengoperasian alat sesuai dengan petunjuk pengoperasian yang telah dibuat. Sistem dijalankan pada kondisi beban nominal untuk memastikan seluruh komponen seperti kompresor, evaporator, kondensor, kipas, dan katup ekspansi bekerja dengan baik. Parameter yang diamati meliputi tekanan sisi rendah dan sisi tinggi, temperatur masuk dan keluar pada evaporator dan kondensor, arus listrik kompresor, serta kestabilan aliran refrigeran. Sistem dinyatakan berfungsi normal apabila tidak terjadi getaran berlebih, suara abnormal, maupun fluktuasi tekanan yang signifikan.

b. Pengujian stabilitas dan keamanan sistem

Pengujian dilakukan untuk memastikan sistem bekerja secara stabil dalam periode waktu tertentu. Pemeriksaan meliputi kestabilan nilai tekanan dan temperatur, tidak adanya kebocoran refrigeran, serta tidak terjadinya *overcurrent* pada kompresor. Selain itu, dilakukan pengecekan fungsi pengaman seperti *overload protector* dan sistem kontrol suhu. Sistem dinyatakan aman apabila seluruh komponen bekerja dalam batas spesifikasi yang telah ditentukan.

c. Pengujian kinerja awal

Pengujian ini dilakukan dengan mencatat data temperatur dan tekanan pada beberapa titik pengukuran untuk menghitung kapasitas pemanasan/ pendinginan serta nilai *coefficient of performance* (COP). Hasil pengujian kemudian

dibandingkan dengan hasil simulasi atau perhitungan teoritis untuk mengetahui kesesuaian performa sistem.

2. Validasi Hasil Simulasi

Validasi hasil simulasi dilakukan melalui tahap eksperimen. Variabel dalam eksperimen adalah sebagai berikut:

Parameter kontrol uji:

- Kecepatan udara keluar pompa kalor, $v_{u,out}$ (m/s), divariasikan pada 1 (m/s).
- Kecepatan putaran kipas, divariasikan 1300 *rpm*.
- Temperatur lingkungan (masuk pompa kalor), $T_{u,in}$ (°C), divariasikan 19 – 22 (°C)
- Kelembapan udara masuk, $RH_{u,in}$ %, divariasikan pada 53 – 69%.

Parameter pengamatan:

- Temperatur udara keluar pompa kalor, $T_{u,out}$ (°C)
- Kelembapan udara keluar, $RH_{u,out}$ %
- Tekanan *discharge* kompresor, P_2 (bar)
- Tekanan *suction* kompresor, P_1 (bar)
- Temperatur keluar kompresor, T_2 (°C)
- Temperatur keluar kondensor, T_3 (°C)
- Temperatur masuk evaporator, T_4 (°C)
- Temperatur keluar evaporator, T_1 (°C)
- Daya listrik kompresor, $P_{el,comp}$ (kW)
- Daya listrik *fan* evaporator, $P_{f,e}$ (kW)
- Daya listrik *fan* kondensor, $P_{f,c}$ (kW)

3.5 Analisis Data

Koleksi variabel pada tahap eksperimen menjadi data yang disajikan dan/atau dikalkulasi. Data disajikan dalam bentuk tabel dan grafik, serta dianalisis. Untuk mencari laju alir udara dapat menggunakan persamaan kontinuitas sebagai berikut:

- Laju aliran massa udara

$$\dot{m}_u = \rho \times A \times v \quad (3.7)$$

(Chouhan & Chandrwansi, 2022)

Di mana:

$\dot{m}_u$ = laju aliran massa udara (kg/s)

v = kecepatan udara (m/s)

A = luas penampang saluran udara (m²)

ρ = massa jenis udara (kg/m³)

b. Laju perpindahan kalor udara pada kondensor

Untuk menghitung laju perpindahan kalor udara pada kondensor dapat dikalkulasikan dengan kondisi udara masuk pada titik B dan keluar pada titik C pada Gambar 2.6, maka berdasarkan persamaan (3.2):

$$\dot{Q}_{u,cond} = \dot{m}_u(h_C - h_B) \quad (3.7)$$

Di mana:

$\dot{Q}_{u,cond}$ = laju perpindahan kalor udara di kondensor (kW)

h_C = Entalpi udara di titik C (kJ/kg)

h_B = Entalpi udara di titik B (kJ/kg)

c. Laju perpindahan kalor udara pada evaporator

Untuk menghitung laju perpindahan kalor udara pada kondensor dapat dikalkulasikan dengan kondisi udara masuk pada titik A dan keluar pada titik B pada Gambar 2.6, maka berdasarkan persamaan (3.2):

$$\dot{Q}_{u,evap} = \dot{m}_u(h_A - h_B) \quad (3.8)$$

Di mana:

$\dot{Q}_{u,evap}$ = laju perpindahan kalor di evaporator (kW)

h_A = Entalpi udara di titik A (kJ/kg)

h_B = Entalpi udara di titik B (kJ/kg)

d. Laju aliran refrigeran ($\dot{m}_{ref}$)

Laju aliran refrigeran dapat dikalkulasikan menggunakan persamaan (3.3) dengan berdasarkan pada Gambar 2.2:

$$W_{comp} = \dot{m}_{ref}(h_2 - h_1) \quad (3.3)$$

Maka:

$$\dot{m}_{ref} = \frac{W_{comp}}{(h_2 - h_1)} \quad (3.7)$$

Di mana:

W_{comp} = Daya kompresor (kW)

$\dot{m}_{ref}$ = laju aliran massa refrigeran (kg/s)

h_2 = entalpi refrigeran di titik 2 (kJ/kg)

h_1 = entalpi refrigeran di titik 1 (kJ/kg)

e. Laju perpindahan kalor di kondensor

Laju perpindahan kalor di kondensor dapat dikalkulasikan menggunakan persamaan (3.4) dengan berdasarkan pada Gambar 2.2:

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{ref}(h_2 - h_3) \quad (3.4)$$

Di mana:

$\dot{m}_{ref}$ = laju alir massa refrigeran

h_2 = entalpi refrigeran di titik 2 (kJ/kg)

h_3 = entalpi refrigeran di titik 3 (kJ/kg)

f. Laju perpindahan kalor di evaporator

Laju perpindahan kalor di evaporator dapat dikalkulasi dengan persamaan (3.5) dengan berdasarkan pada Gambar 2.2:

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{ref}(h_1 - h_4) \quad (3.5)$$

Di mana:

$\dot{m}_{ref}$ = laju alir massa refrigeran

h_1 = entalpi refrigeran di titik 1 (kJ/kg)

h_4 = entalpi refrigeran di titik 4 (kJ/kg)

g. COP *heat pump*

COP pada *heat pump* dapat dihitung melalui perbandingan antara laju perpindahan kalor di kondensor dengan daya pada kompresor, dengan persamaan (2.5):

$$COP = \frac{\dot{Q}_{cond}}{W_{comp}}$$

(Moran & Shapiro, 2016)

Di mana:

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

W_{comp} = Daya pada kompresor (kW)

h. Laju air kondensat tiap detik

$$CW_m = \frac{CW_{total}}{waktu\ penguji\ an}$$

CW_m = *Condensate water* permenit

CW_{total} = *Condensate water* total

3.6 Penyusunan Laporan

Dalam proses ini, hasil dari setiap tahap, mulai dari pembuatan, pengujian hingga analisis alat, akan diuraikan secara detail. Pada tahap pengujian, ditemukan bahwa alat ini mampu bekerja dengan baik dalam berbagai kondisi.