

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi pada bidang refrigerasi sangat berkembang pesat baik pada sistem maupun aplikasinya dan menjadi salah satu bidang yang dibutuhkan pada berbagai industri saat ini. Salah satu sektor industri saat ini yang semakin modern dan membutuhkan inovasi di dalamnya yaitu *food and beverage*. Tentunya sektor ini membutuhkan sistem refrigerasi dalam perkembangannya, yaitu sebagai media pengawetan dan penyimpanan produk yang membutuhkan temperatur yang tepat dan konstan (Apriliano dkk., 2022).

Banyak metode yang dapat digunakan untuk melakukan pendinginan antara lain dengan memanfaatkan: (a) panas untuk penguapan, contoh: refrigerator kompresi uap, refrigerator absorpsi, refrigerator nitrogen; (b) panas untuk peleburan dengan menggunakan es sebagai media; (c) panas untuk sublimasi dengan memanfaatkan es kering (*dry ice*) sebagai media; (d) ekspansi adiabatik uap dengan mengaplikasikan fungsi pipa semprot (*nozzle*); (e) efek Peltier pada material semi konduktor. Dari berbagai metode tersebut, refrigerasi kompresi uap merupakan metode yang paling banyak digunakan. Menurut Patel 1987, banyak keuntungan yang diperoleh dengan sistem kompresi uap antara lain kebutuhan daya yang rendah, desain dan operasinya sederhana, dan koefisien unjuk kerja/*coefficient of performance* (COP) yang tinggi (Suprayitno dkk., 2001).

Teknologi pengeringan beku vakum adalah cara terbaik untuk mengawetkan kualitas buah dan sayur, yang dapat mempertahankan nutrisi dengan baik, dan strukturnya tidak mudah berubah bentuk. Teknologi pengeringan beku vakum juga telah menjadi teknologi pengolahan makanan yang sangat penting. Dalam beberapa tahun terakhir, teknologi ini telah mendapat perhatian dan berkembang (Li dkk., 2023). Pengering beku vakum merupakan salah satu metode terbaik untuk menghilangkan air, dengan produk akhir berkualitas tinggi (Bhatta dkk., 2020).

Penggunaan alat pengering beku vakum (*vacuum freeze dryer*) memerlukan sistem pendinginan yang mampu mencapai suhu rendah dan tekanan rendah untuk mendukung proses sublimasi. Sistem refrigerasi kompresi uap merupakan teknologi yang paling umum digunakan dalam peralatan pengering beku vakum karena efisiensi dan keandalannya dalam menghasilkan suhu rendah (Buana & Kosasih, 2024).

Sistem refrigerasi kompresi uap adalah sistem refrigerasi yang bekerja dengan metode bersiklus. Sistem ini memiliki keunggulan yaitu mudah dioperasikan, kinerja yang baik, dan dapat memenuhi kebutuhan beban pendingin yang relatif besar dengan ukuran yang kecil (Jafri & Gusnawati, 2017). Komponen sistem kompresi uap terdiri dari kompresor, kondensor, katup ekspansi dan evaporator. Semua komponen ini sangat berpengaruh terhadap kapasitas pendinginan yang dihasilkan. Selain kondisi komponen sistem, bagian yang paling penting yang ada pada sistem pendingin siklus kompresi uap adalah refrigeran yang digunakan dalam siklus. Hal

ini disebabkan karena refrigeran merupakan fluida yang digunakan untuk menyerap panas yang ada dalam ruang yang didinginkan (Jafri & Gusnawati, 2017).

Sistem refrigerasi membutuhkan fluida yang mudah menyerap dan melepas kalor. Refrigeran atau bahan pendingin adalah fluida kerja yang digunakan untuk menyerap panas melalui perubahan fase dari cair menjadi gas (evaporasi) dan membuang panas melalui perubahan fase dari gas ke cair (kondensasi) sehingga secara umum dapat dikatakan sebagai pemindah panas dalam sistem pendingin. Setiap refrigerant memiliki sifat karakteristik termodinamika yang berbeda, yang akan mempengaruhi efek refrigerasi dan *coefficient of performance* (COP) dari refrigeran itu sendiri (Wilis, 2018).

Refrigeran hidrokarbon adalah refrigeran yang saat ini banyak diteliti karena ramah lingkungan, tidak beracun, lebih murah, tidak menyebabkan penipisan ozon dengan nilai ODP (*Ozone Depletion potensial*) sebesar 0, dan tidak menyebabkan pemanasan GWP (*Global Warming Potential*). Refrigeran hidrokarbon yang saat ini menunjukkan performa terbaik adalah R600a (Rozaq dkk., 2014). Selain itu refrigeran untuk siklus kompresi uap yang paling umum digunakan adalah freon, namun freon dianggap memiliki kelemahan. Kelemahan dari freon adalah dianggap telah merusak lapisan ozon di atmosfer bumi. Untuk mengatasi kelemahan tersebut, telah dikembangkan refrigeran baru yang mempunyai efek terhadap perusakan ozon yang rendah yaitu kelompok refrigeran HFC, salah satunya refrigeran R134a. Tetapi refrigeran ini kurang diminati karena harganya relatif lebih mahal dibandingkan dengan refrigeran hidrokarbon R600a (Suprayitno dkk., 2001).

Refrigeran R134a merupakan refrigeran hidrofluorokarbon (Hfc) yang sering digunakan dalam sistem pendingin modern, sementara itu refrigeran R600a (isobutana) adalah refrigeran hidrokarbon (HC) yang lebih ramah lingkungan karena memiliki potensi pemanasan global (*Global Warming Potential*) yang lebih rendah dibandingkan refrigeran R134a, meskipun R600a dianggap lebih ramah lingkungan, terdapat kekhawatiran tentang aspek keamanan karena sifat yang mudah terbakar (Sumeru dkk., 2024).

Dalam konteks alat pengering beku vakum, efisiensi dan performa refrigeran dalam mencapai kondisi suhu dan tekanan rendah sangat penting untuk memastikan kelancaran proses pengeringan. Pemilihan refrigeran yang tepat akan mempengaruhi efisiensi energi, kecepatan proses pembekuan dan pengering serta kualitas akhir dari produk yang akan dikeringkan. Berdasarkan uraian di atas penulis tertarik untuk mengkaji **“Perbandingan Sistem Refrigerasi Kompresi Uap menggunakan Refrigeran R134a dan R600a pada Alat Pengering Beku-Vakum (*Vacum Freeze Dryer*)”**

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka dapat dirumuskan suatu permasalahan yaitu :

1. Bagaimana karakteristik mesin pendingin (kerja kompresor, temperatur evaporator dan kondensor, kalor pendinginan, kalor kondensor, COP) dengan menggunakan refrigeran R134a dan R600a pada alat pengering beku vakum (*Vacuum Freeze Drying*)?
2. Bagaimana perbandingan kinerja (kalor pendinginan) dna efisiensi antara refrigeran R134a dengan R600a pada alat pengering beku vakum (*Vacuum Freeze Drying*)?

1.3 Tujuan dan Manfaat

1.3.1 Tujuan

Tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk menganalisa karakteristik mesin pendingin (kerja kompresor, temperatur evaporator dan kondensor, kalor pendinginan, kalor kondensor, COP) dengan menggunakan refrigeran R134a dan R600a pada alat pengering beku vakum (*Vacuum Freeze Drying*)
2. Untuk menganalisa perbandingan kinerja (kalor pendinginan) dna efisiensi antara refrigeran R134a dengan R600a pada alat pengering beku vakum (*Vacuum Freeze Drying*)

1.3.2 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain:

1. Sebagai syarat untuk menyelesaikan studi dari Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Univeritas Hasanuddin.
2. Dapat memberikan informasi serta pengetahuan kepada kita mengenai parameter-parameter apa saja yang digunakan dalam merancang sistem pendinginan pada mesin pengering beku (*freeze dryer*).
3. Sebagai pengembangan penelitian di Laboratorium Mesin Pendingin dan pemanas Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

1.4 Batasan Masalah

Untuk memudahkan pelaksanaan penelitian sehingga tujuan dari penelitian dapat dicapai, perlu adanya batasan masalah, yaitu:

1. Spesifikasi Kompresor (1/6 pk).
2. Ukuran evaporator 1/4 inch dan kondensor 1/4 inch berbentuk spiral.
3. Menggunakan pipa kapiler dengan panjang 0,17 m, diameter luar 0,028 inch.
4. Fluida kerja yang digunakan yaitu Refrigeran R134a dan R600a

1.5 Landasan Teori

1.5.1 Pengering Beku (*Freeze Drying*)

Pengeringan merupakan salah satu metode pengawetan makanan yang penting dan banyak digunakan saat ini, banyak teknologi pengeringan yang sudah ada salah satunya adalah pengering beku. Penggunaan pengering beku untuk industri dikembangkan sebagai hasil dari inovasi dan perbaikan proses yang terus-menerus. Metode ini tampaknya layak untuk mengeringkan produk yang sensitif terhadap panas, salah satu contohnya adalah buah-buahan (Jude dkk., 2023). *Freeze drying* atau pengeringan beku merupakan teknologi pengeringan non-termal dengan menggunakan suhu yang rendah (Gaidhani dkk., 2015). Alat yang digunakan dalam teknologi pengolahan ini disebut *freeze dryer* (Shukla, 2011). Teknologi ini menggabungkan pembekuan dan vakum yang diterapkan pada pengolahan produk untuk membentuk produk kering beku (Li dkk., 2023). Pengeringan beku vakum telah terbukti menjadi metode pengeringan yang mampu menjaga kualitas bahan baik dari segi fisik maupun kimia (Buana & Kosasih, 2024).

Perbedaan pengering beku dengan teknologi pengeringan lain adalah mekanisme dalam menghilangkan kandungan air didalam bahan pangan. Penghilang kandungan air dalam teknologi ini terjadi pada suhu yang rendah, melalui mekanisme sublimasi, langsung dari bentuk fase padat air (es) ke bentuk gas (Gaidhani dkk., 2015). Prinsip *freeze drying* yaitu mengeringkan bahan pangan dengan menghilangkan kandungan air didalamnya melalui proses sublimasi kandungan air didalam bahan pangan yang sudah menjadi beku kemudian diubah menjadi gas. Sublimasi dapat terjadi ketika tekanan dan suhu permukaan es dibawah *triple point*. Terdapat 4 tahap dalam freeze drying salah satunya itu sistem pembekuan (Purnamasari dkk., 2020).

Pengeringan beku vakum adalah sebuah metode pengeringan yang mempunyai kelebihan dibandingkan dengan metode pengeringan yang lain, terutama pada metode ini pengeringan dilakukan pada suhu rendah sehingga mengurangi adanya kerusakan produk akibat suhu tinggi, dan produk kering memiliki bentuk fisik yang menarik. Pada metode ini kandungan uap air dari produk dapat dikontrol selama proses, bahkan produk dapat dikembalikan seperti keadaan sebelum dikeringkan (Maswan, 2012). Proses pemisahan pada pengeringan beku meliputi tiga tahap: (a) tahap pembekuan, (b) tahap pengeringan beku primer, dan (c) tahap pengeringan beku sekunder. Pada tahap pembekuan, bahan makanan atau larutan didinginkan pada temperatur dimana semua material dalam keadaan beku. Pada tahap pengeringan beku primer, pelarut yang telah mengalami pembekuan dihilangkan melalui proses sublimasi. Pada tahap pengeringan beku sekunder melibatkan penghilangan pelarut (air) yang tidak membeku (Mujumdar, 2006).

Beberapa penelitian telah mencoba melakukan kajian tentang pembekuan vakum, di antaranya adalah Marques dan Freire (2004) telah melakukan pengeringan beku nanas dengan kadar air sebesar 85,30%; Siregar (2004) telah melakukan kajian pengeringan beku vakum terhadap daging buah durian dengan kadar air sebesar 60,82%; Arlisdianto (2012) melakukan pengeringan beku lidah buaya dengan kadar

air sebesar 98,70%; Januari dan Martin (2014) telah melakukan pengeringan beku vakum terhadap bengkuang hingga mengurangi kadar airnya sebesar 62%, dan Agustina dkk (2020) yang memanfaatkan panas buang kondenser pada pengering beku vakum untuk pengeringan bengkuang. (Purnamasari dkk., 2020)

1.5.2 Refrigerasi

Pendinginan merupakan teknologi lama yang sudah ada sejak lama. Pendinginan adalah proses pembuangan panas dari ruang tertutup atau dari suatu zat untuk mempertahankan suhu yang lebih rendah daripada suhu di sekitarnya. Pendinginan evaporatif dipraktikkan di India dan Mesir. Ditemukan bahwa menambahkan bahan kimia seperti natrium nitrat atau kalium nitrat ke dalam air menyebabkan suhu turun. Sebelum sistem pendinginan mekanis diperkenalkan, orang mendinginkan makanan mereka dengan es yang diangkut dari pegunungan, dan es disimpan dengan menggunakan gudang salju, lubang yang digali ke dalam tanah dan diisolasi. Sebelum tahun 1830, sudah ada metode pengawetan makanan seperti penggaraman, pembumbuan, pengasapan, pembuatan acar, dan pengeringan (Sruthi Emani dkk., 2017).

Refrigerasi merupakan proses penyerapan panas dari ruangan yang bertemperatur tinggi, dan memindahkan panas tersebut ke suatu medium tertentu yang memiliki temperatur lebih rendah serta menjaga kondisitersebut sesuai dengan kebutuhan. Pada sistem ini, sebuah kompresor akan mengkompres refrigeran sehingga tekanan dan temperaturnya meningkat. Refrigeran yang telah terkompres kemudian dikondesasikan dengan kondensor menjadi cairan dengan melapaskan kalor latennya. Memasuki alat ekspansi, cairan tersebut diturunkan tekanannya sehingga temperaturnya menurun dan kemudian dilanjutkan ke dalam evaporator menghasilkan efek refrigerasi dengan menyerap kalor dari suatu ruangan (Rusyada., 2009).

Pengembangan refrigeran sepanjang sejarah, terjadi karena berbagai alasan, seperti keamanan, stabilitas, daya tahan, masalah ekonomi atau lingkungan, sehingga memunculkan penelitian baru dan peningkatan peralatan dalam hal keamanan dan efisiensi. (Sruthi Emani dkk., 2017).

1.5.3 Sistem Refrigerasi

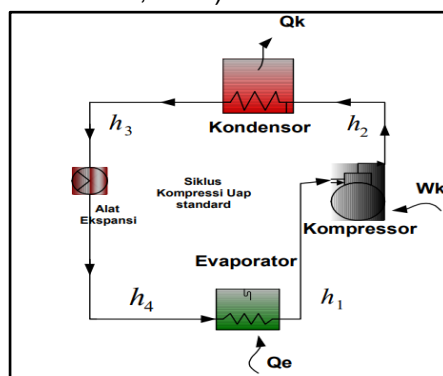
Sistem refrigerasi kompresi uap sudah ada sejak lama, sekitar 200 tahun lalu dan kini menjadi salah satu yang penting. Sistem refrigerasi kompresi uap telah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri seperti penyimpanan makanan, bangunan, manufaktur dan obat-obatan. Sistem refrigerasi kompresi uap terdiri dari empat komponen utama yaitu: kompresor, kondensor, perangkat ekspansi, dan evaporator. Komponen-komponen ini terhubung untuk menghasilkan efek pendinginan melalui proses termodinamika: kompresi, kondensasi, ekspansi, dan penguapan (Sachin Mohite dkk., 2020).

Sistem refrigerasi adalah kombinasi komponen, peralatan, dan perpipaan yang dihubungkan dalam suatu urutan tertentu untuk menghasilkan efek pendinginan sehingga dapat menjadikan kondisi temperatur suatu ruangan berada di bawah temperatur semula (menjadikan temperatur di bawah temperatur siklus). Pada prinsipnya kondisi temperatur rendah yang dihasilkan oleh suatu sistem refrigerasi diakibatkan oleh penyerapan panas pada reservoir dingin (*low temperatur source*) yang merupakan salah satu bagian sistem refrigerasi tersebut. Panas yang diserap bersama-sama energi (kerja) yang diberikan kerja luar dibuang pada bagian sistem refrigerasi yang disebut reservoir panas (Shukla, 2011).

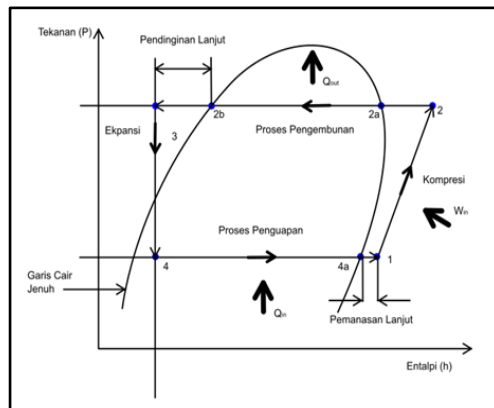
Sistem refrigerasi secara garis besar dapat diklasifikasikan menjadi beberapa sistem refrigerasi, diantaranya yaitu sistem refrigerasi kompresi uap, sistem refrigerasi absorpsi, sistem refrigerasi ekspansi gas, sistem refrigerasi termoelektrik, dan sistem refrigerasi *magnetic*. Pada penelitian ini akan digunakan sistem refrigerasi kompresi uap, sehingga bahasan selanjutnya akan terfokus pada sistem refrigerasi kompresi uap (Shukla, 2011).

1.5.3.1 Sistem Refrigerasi Kompresi Uap

Mesin pendingin yang paling banyak digunakan saat ini adalah mesin pendingin siklus kompresi uap (Siregar dkk., 2016). Sistem refrigerasi kompresi uap adalah sistem yang menggunakan kompresor sebagai alat kompresi media pendingin (refrigeran). Proses kerjanya adalah pada kompresor refrigeran dikompresi kemudian dikeluarkan pada sisi keluaran (*discharge*) dan masuk ke kondensor di kondensor terjadi proses pembuangan kalor refrigeran sehingga refrigeran berubah fasa menjadi cair dan selanjutnya mengalir ke alat ekspansi, pada alat ekspansi ini refrigeran mengalami penurunan tekanan dan temperatur kemudian masuk ke evaporator, di evaporator refrigeran menyerap kalor dari produk atau dari lingkungan yang didinginkan sehingga refrigeran berubah fasa menjadi uap, kemudian masuk pada sisi penghisap (*suction*) menuju kompresor. Berdasarkan siklus refrigerasi kompresi uap pada gambar 2.1. diagram P-h siklus kompresi uap pada gambar 2.2 (Suryatman Margana & Oktaviana, 2017).



Gambar 1 Proses sistem refrigerasi kompresi uap



Gambar 2 Diagram P-h pada siklus kompresi uap

Di dalam siklus kompresi, refrigeran mengalami empat proses (mengacu pada Gambar 2.2) yaitu proses 1-2, 2-3, 3-4, dan 4-1. Pada proses:

- 1-2 refrigeran meninggalkan evaporator dalam bentuk uap jenuh bersuhu rendah dan bertekanan rendah, kemudian dipompa oleh kompresor menjadi uap bertekanan tinggi (tekanan kondensor). Kompresi ini diperlukan untuk menaikkan suhu refrigeran sehingga suhu refrigeran di kondensor lebih tinggi dari suhu lingkungan. Oleh karena itu, perpindahan panas dari refrigeran ke lingkungan dapat terjadi. Proses kompresi ini terjadi secara isentropis (adiabatic dan reversibel). Pada proses 2-3, setelah proses kompresi, refrigeran berada pada tahap superheating bertekanan tinggi dan temperatur tinggi. Untuk mengubah wujudnya menjadi cair, panas harus dilepaskan ke lingkungan. Hal ini dilakukan dalam penukar panas yang disebut kondensor. Refrigeran mengalir melalui kondensor, dan di sisi lain mengalir fluida pendingin (udara atau air) yang temperaturnya lebih rendah dari temperatur refrigeran. Oleh karena itu, panas akan berpindah dari refrigerant ke fluida pendingin, sehingga suhu refrigeran menurun dari uap super panas menjadi uap jenuh, yang kemudian berubah menjadi cair. Kemudian keluar dari kondensor sebagai cairan jenuh. Proses ini berlangsung secara reversibel; dibawah tekanan konstan.
- pada proses 3-4, zat pendingin dalam bentuk cairan jenuh mengalir melalui pipa kapiler. Refrigeran mengalami pemuaian pada entalpi konstan dan terjadi secara ireversibel. Selanjutnya, refrigeran keluar dari pipa kapiler dalam bentuk cair dengan tekanan dan suhu yang sama di evaporator.
- proses 4-1, refrigerant berada dalam fase campuran yaitu uap-cair dan mengalir melalui penukar panas yang disebut evaporator. Titik didih refrigeran harus lebih rendah dari suhu lingkungan (objek yang didinginkan) pada tekanan evaporator agar panas dapat berpindah dari media kerja ke refrigerant. Refrigeran yang masih dalam bentuk cair kemudian menguap di evaporator, dan refrigeran meninggalkan evaporator dalam fase uap jenuh. Proses penguapan terjadi secara reversibel pada tekanan konstan (Apriyanto, 2023).

1.5.4 Komponen – komponen utama sistem refrigerasi

Komponen - komponen utama sistem refrigerasi siklus kompresi uap terdiri dari:

1. Kompresor

Kompresor berfungsi untuk menghisap uap refrigeran bertekanan rendah dari evaporator dan mengkompresinya menjadi uap bertekanan tinggi sehingga uap akan tersirkulasi. Dengan adanya proses kompresi maka terjadi perbedaan tekanan antara sisi hisap (*suction*) dan sisi keluar (*discharge*) yang menyebabkan refrigeran dapat mengalir dalam sistem.

2. Kondensor

Kondensor merupakan alat penukar kalor yang berada pada daerah tekanan tinggi dari sistem refrigerasi. Kondensor berfungsi sebagai pembuang panas (*heat rejection*) dari dalam sistem ke luar sistem. Pada saat refrigeran memasuki kondensor, maka refrigeran akan mengalami perubahan fase dari gas menjadi cair (terkondensasi). Kondensor yang digunakan adalah kondensor tipe spiral.

3. Pipa Kapiler (*Capillary Tube*)

Pipa kapiler merupakan pipa berdiameter kecil, yang ditempatkan antara bagian sistem bertekanan tinggi, dan bagian sistem bertekanan rendah. Fungsinya adalah untuk menurunkan tekanan refrigeran sehingga terjadi penurunan temperatur di evaporator. Pipa kapiler biasanya digunakan pada sistem yang kecil, dimana beban pendinginannya tidak banyak berubah, seperti kulkas rumah tangga.

4. Evaporator

Komponen ini berfungsi untuk menyerap panas dari ruangan. Panas tersebut diserap dan dialirkan melalui *heat exchanger* kemudian dipindahkan ke refrigeran. Pada saat refrigeran menyerap panas, maka entalpi refrigeran akan meningkat. Semakin banyak kenaikan entalpi pada refrigeran selama di evaporator maka semakin baik pula kinerja perangkat pendinginan udara yang terpasang. Jenis evaporator berdasarkan fluida yang didinginkan (Panjaitan dkk., 2018).

1.5.5 Perhitungan Sistem Refrigerasi

Berdasarkan diagram tekanan-entalpi (ph), entalpi (h) dalam siklus kompresi dapat diketahui, sehingga dapat diketahui kerja kompresor, energi kalor yang diserap evaporator, energi kalor yang dikeluarkan kompresor, *coefficient of performance* (COP) dari mesin kompresi uap.

1. Daya Kompresor (W_k)

Kerja kompresor persatuan massa refrigeran merupakan entalpi titik 1 ke 2 pada gambar 6, persamaan yang digunakan :

$$W_k = V \times I \quad (1)$$

Keterangan :

I = Arus yang digunakan kompresor (ampere)

V = Tegangan yang digunakan kompresor (volt)

2. Laju Aliran Massa Refrigeran ($\dot{m}$)

Laju aliran massa refrigeran dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Stoecker,2005) :

$$\dot{m} = \frac{wk}{(h_1 - h_2)} \quad (2)$$

Keterangan:

h_2 = Nilai entalpi refrigeran saat keluar kompresor (kJ/kg)

h_1 = Nilai entalpi refrigeran saat masuk kompresor (kJ/kg)

$\dot{m}$ = Laju Aliran Massa Refrigeran (kJ/kg)

3. Kerja Kompresor (W_{in})

Kerja kompresi/kebutuhan daya kompresor pada siklus ideal merupakan hasil kali laju aliran massa refrigeran dengan kenaikan entalpi selama proses kompresi isentropik (Stoecker,2005). Kerja kompresor persatuan massa refrigeran merupakan entalpi dititik 1 ke pada gambar 2.4, persamaan yang digunakan:

$$W_{in} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (3)$$

Keterangan :

W_{in} = Kerja kompresor (kJ/s/)

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

h_2 = Nilai entalpi refrigeran saat keluar kompresor (kJ/kg)

h_1 = Nilai entalpi refrigeran saat masuk kompresor (kJ/kg)

4. Energi Kalor yang dilepaskan oleh Kondensor (Q_{out})

Pada saat refrigeran melewati kondensor, terjadi perpindahan kalor dari refrigeran ke lingkungan yang lebih dingin sehingga menghasilkan pengembunan refrigeran (Stoecker,2005). Energi kalor yang dilepaskan oleh kondensor merupakan perubahan entalpi dititik 2 ke 3 pada gambar 2.4 persamaan yang digunakan:

$$Q_{out} = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (4)$$

Keterangan :

Q_{out} = Energi kalor yang dilepaskan kondensor (kJ/kg)

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

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

5. Energi kalor yang diserap oleh evaporator (Q_{in})

Pada saat refrigeran melewati evaporator, terjadi penyerapan kalor dari ruangan yang diinginkan sehingga menghasilkan penguapan refrigeran. Energi yang diserap evaporator merupakan entalpi dititik 4 ke 1 pada gambar 2.2, persamaan yang digunakan:

$$Q_{in} = h_1 - h_4 \quad (5)$$

Keterangan :

Q_{in} = Energi kalor yang diserap evaporator (kJ/jg)

h_1 = Nilai entalpi refrigeran saat masuk kompresor (kJ/kg)

h_4 = Nilai entalpi refrigeran saat keluar kondensor, (kJ/kg)

6. Coefficient of Performance aktual (COP_{aktual})

Coefficient of performance *aktual* siklus kompresi uap standar dapat dihitung dengan persamaan

$$COP_{aktual} = \frac{Q_{in}}{W_{in}} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} \quad (6)$$

7. Coefficient of Performance ideal (COP_{ideal})

Coefficient of Performance *ideal* pada siklus kompresi uap standar dapat dihitung dengan persamaan :

$$COP_{ideal} = \frac{T_e}{T_c - T_e} \quad (7)$$

Keterangan:

Te = Temperatur Evaporator

Tc = Temperatur Kondensor

. Efisiensi siklus kompresi uap

Efisiensi siklus kompresi uap dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$\text{Efisiensi} = \frac{COP_{aktual}}{COP_{ideal}} \quad (8)$$

9. Balance Energy

Keseimbangan energi mengacu pada hubungan antara energi yang masuk ke sistem dan energi yang keluar, dapat dihitung dengan persamaan berikut (Ahamed dkk., 2011) :

$$Q_{out} = W_k + Q_{in} \quad (9)$$

1.5.6 Refrigeran

Refrigeran atau bahan pendingin adalah suatu zat yang mudah dirubah bentuknya dari gas menjadi cair atau sebaliknya, dan juga sebagai media pemindah panas dari evaporator kemudian di pindah ke kondensor. Bahan pendingin banyak sekali macamnya, tetapi tidak satupun yang dapat dipakai untuk semua keperluan. Kita perlu mendinginkan dalam beberapa tingkat temperatur yang berbeda-beda, maka bahan pendingin hanya dapat dikatakan tepat atau sesuai untuk satu keperluan saja. Untuk unit refrigerasi hendaknya dapat dipilih jenis refrigeran yang sesuai dengan jenis kompresor yang dipakai, dan karakteristik termodinamika antara lain meliputi temperatur penguapan dan tekanan penguapan serta temperatur pengembunan dan tekanan pengembunan. Penggunaan refrigeran alami untuk sistem pendinginam lebih terbaik untuk pemanfaatan yang efekti bagi atmosfer yang ramah lingkungan (Buana & Kosasih, 2024).

Refrigeran dapat dikelompokan ke dalam jenis senyawa seperti senyawa hidrokarbon, senyawa anorganik, dan senyawa halokarbon. Senyawa halokarbon merupakan senyawa sintetik yang diturunkan dari senyawa hidrokarbon. Senyawa ini biasa juga disebut sebagai senyawa hidrokarbo-fluorinated (fluorinated hydrocarbons). Oleh sebab itu pembagian kelompok refrigeran tidak dilakukan menurut kelompok senyawa tetapi menurut ANSI/ASHRAE Standard 34 –1992 dan 34a–1993 dilakukan berdasarkan nomor refrigeran. Seperti telah disebutkan sebelumnya refrigeran halokarbon diturunkan dari refirgeran hidrokarbon. Senyawa dasar hidrokarbon yang biasa digunakan adalah metana, etana dan propana.

Senyawa hidrokarbon ini terdiri dari atom-atom carbon dan hidrogen. Refrigeran halokarbon adalah senyawa hidrokarbon yang satu atau beberapa atom hidrogennya digantikan oleh elemen halogen yaitu khlorin (Cl) dan atau fluorin (F). dengan demikian dari metana, etana, dan propana dapat diturunkan berbagai jenis refrigeran halokarbon. Refrigeran halokarbon yang diturunkan dari metana disebut sebagai refrigeran halokarbon gugus turunan metana dan demikian pula halnya dengan gugus turunan etana dan gugus turunan propana (Kurniawan Mainil, 2012).

Sifat-sifat yang dipertimbangkan dalam memilih refrigeran, adalah: sifat kimia, sifat fisik dan sifat termodinamik. Berdasarkan sifat-sifat kimianya refrigeran yang baik : tidak beracun, tidak bereaksi dengan komponen refrigerasi, dan tidak mudah terbakar, serta tidak berpotensi menimbulkan pemanasan global (GWP rendah (Global Warming Potential)) dan tidak merusak lapisan ozon (ODP rendah (Ozone Depleting Potential)). Hal ini diperlukan agar kelestarian lingkungan terjaga, karena lapisan ozon di stratosfir berfungsi melindungi bumi dari radiasi sinar ultra violet yang berbahaya (antara lain dapat menimbulkan kanker kulit, dapat membunuh phytoplankton yang merupakan bagian dari rantai kehidupan laut). Berdasarkan sifat fisik dan termodinamiknya refrigeran yang baik mampu menghasilkan kapasitas refrigerasi per satuan daya kompresi yang tinggi. (Kurniawan Mainil, 2012).

Sifat-sifat fisik dan termodinamik refrigeran yang mempengaruhi daya kompresi dan kapasitas refrigerasi, adalah:

1. Tekanan penguapan : refrigeran sebaiknya mempunyai tekanan penguapan yang relatif tinggi, karena temperatur refrigeran juga tinggi, sehingga untuk kompresor yang sama dapat diperoleh kapasitas refrigerasi yang lebih besar.
2. Tekanan pengembunan : refrigeran dengan tekanan pengembunan rendah lebih diinginkan dalam sistem refrigerasi, karena rasio kompresinya menjadi lebih kecil dan daya kompresor yang dibutuhkan untuk kompresi pun menjadi kecil, selain itu mesin refrigerasi bekerja lebih aman, karena kemungkinan terjadinya kebocoran, atau kerusakan pada saluran refrigeran menjadi kecil.
3. Kalor laten penguapan dan volume spesifik : refrigeran, dengan kalor laten penguapan yang besar dan volume spesifik fasa uap yang kecil, lebih diinginkan, karena pada sistem dengan kapasitas refrigerasi yang sama laju massa refrigeran menjadi lebih kecil. Dengan demikian untuk kapasitas refrigerasi yang sama diperlukan ukuran unit refrigerasi yang lebih kecil.
4. Konduktivitas termal: sifat ini mempengaruhi kinerja penukar kalor (evaporator dan kondensor). Refrigeran, dengan konduktivitas termal tinggi, lebih diinginkan dalam suatu sistem refrigerasi. Oleh karena dapat menghasilkan kinerja penukar kalor yang baik (pada beda temperatur yang kecil antara penukar kalor (refrigeran) dan lingkungan, mampu menghasilkan laju perpindahan panas yang besar).
5. Viskositas refrigeran: refrigeran dengan viskositas rendah yang lebih baik dalam sistem refrigerasi, karena dalam alirannya refrigeran akan (Kurniawan Mainil, 2012).

Tabel 1 Sifat-sifat Refrigeran

Refrigerants	Replaces	Molecular wt	Critical temp (°C)	ASHRAE Safety code	ODP	GWP
R12	-	120.93	112	A1	0.82	10600
R22	-	86.47	96.2	A1	0.034	1700
R502	-	111.64	80.7	A1	0.221	4500
R134a	R12	102.03	101.1	A2	0.000	1300
R404A	R502,R22	97.6	72.1	A1	0.000	3800
R407C	R22	86.2	87.3	A1	0.000	1700
R410A	R22	72.58	72.5	A1	0.000	2000
R417A	R22	106.75	89.9	A1	0.000	2200
R152a	R12,R134a	66.05	113.3	A3	0.000	120
R600a	R12,R134a	58.12	134.7	A3	0.000	20

1.5.6.1 Hidrokarbon Sebagai Refrigeran

Menurut Pasek, refrigerant hidrokarbon merupakan salah satu refrigerant alternatif pengganti refrigerant CFC (klorofluorokarbon). Refrigeran hidrokarbon tidak berpotensi merusak ozon karena ODP = 0 dan potensi pemanasan global kecil. Refrigerant hidrokarbon juga tidak mengalami reaksi kimia dan pelumas untuk refrigerant CFC. Refrigeran hidrokarbon adalah zat pendinginan yang ramah lingkungan sehingga diperlukan untuk menjadi kelestarian lingkungan hidup. Sifat termofisika hidrokarbon sangat mirip dengan sifat refrigeran CFC dan juga tidak beracun serta aman terhadap lingkungan. (Ahamed dkk., 2010).

1.5.6.2 Refrigeran Hidrokarbon R600a

Refrigeran R600a, rumus kimianya adalah C_4H_{10} , atau bisa juga disebut isobutana. Berat molekulnya adalah 58,12. Refrigeran ini banyak digunakan saat ini karena kekhawatiran akan penipisan lapisan ozon. Ada juga refrigeran R600a memiliki rasio tekanan yang lebih rendah, sehingga berfungsi Kompresor lebih kecil dan menghemat konsumsi energi. Selain itu, ada R600a Hidrokarbon kurang padat jadi gunakanlah Sedikit berbeda dibandingkan dengan refrigeran sintetis. Jika tidak, viskositasnya adalah R600a lebih kecil, sehingga mengurangi beban pada kompresor dan mempertahankan masa pakai dari sistem pendingin (Kusuma & Siregar, 2014).

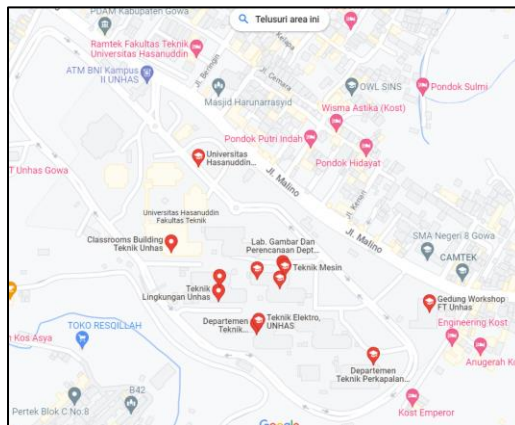
1.5.6.3 Refrigeran R-134

Refrigeran R134a adalah refrigeran alternatif pengganti R12 sejak awal tahun 1990-an karena memiliki *Ozone Depletion Potential* (ODP) yang tinggi sehingga berbahaya bagi lapisan ozon (Sumeru dkk., 2024). Refrigeran R134a merupakan refrigeran yang paling banyak digunakan karena sifat termodinamika dan termofisikanya yang sangat baik, tetapi memiliki potensi pemanasan global (GWP)-nya yang tinggi Refrigeran R-134a memiliki beberapa property yang baik, tidak beracun, tidak mudah terbakar dan relative stabil. Tetapi R134a memiliki kelemahan diantaranya tidak bisa dijadikan pengganti R-12 secara langsung tanpa melakukan modifikasi sistem refrigerasi (drop in substitute), relative mahal, dan masih memiliki potensi sebagai zat yang dapat menyebabkan efek pemanasan global karena memiliki *global warming potential* (GWP) yang signifikan. Selain itu R134a sangat bergantung kepada pelumas sintetis yang sering menyebabkan masalah dengan sifatnya yang higroskopis (Buana & Kosasih, 2024).

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Desember 2023 sampai Oktober 2024 bertempat di Laboratorium Mesin Pendingin dan Pemanas Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin, Gowa, Sulawesi Selatan.



Gambar 3 Peta Lokasi Penelitian

2.2 Alat dan Bahan

2.2.1 Alat

1. Kompresor

Kompresor berfungsi untuk meningkatkan tekanan dan memompa refrigeran ke kondensor.



Gambar 4 Kompresor

2. Pipa Tembaga

Pipa tembaga berfungsi sebagai saluran untuk mengalirkan refrigerant ke komponen-komponen sistem refrigrasi dan sebagai tempat terjadinya perpindahan kalor.

Diameter 1 : 1/4 in
Diameter 2 : 1/4 in
Ketebalan : 0,7 mm



Gambar 5 Timbangan Digital

3. Insulasi

Insulasi berfungsi untuk menjaga temperatur udara agar tidak terbangun kelingkungan atau mengurangi terjadinya *heat loss* yang terbangun kelingkungan.



Gambar 6 Insulasi

4. Katup Ekspansi

Katup ekspansi berfungsi untuk menurunkan tekanan dan temperatur *refrigerant* sebelum masuk evaporator.

Merk : Castel
Orifice : 0,4



Gambar 7 Katup Ekspansi

5. *Temperature Input Module*

Modul berfungsi untuk membaca data temperatur yang diberikan oleh termokopel dan kemudian merekam data ke komputer.



Gambar 8 *Temperature Input Module*

6. Termokopel

Termokopel digunakan sebagai sensor yang mengukur temperatur yang ingin ditinjau.



Gambar 9 Termokopel

7. *Manifold gauge*

Manifold gauge digunakan untuk mengukur tekanan dan alat untuk mengisi refrigerant pada alat pendingin.



Gambar 10 *Manifold Gauge*

8. *Pressure Vessel*

Vessel berfungsi sebagai ruangan pengeringan objek penelitian.



Gambar 11 *Pressure Vessel*

9. *Digital Moisture Meter*

Digital Moisture Meter digunakan untuk mengukur kadar air biji kopi.



Gambar 12 *Digital Moisture Meter*

10. *Timbangan Digital*

Timbangan digital digunakan untuk mengukur massa biji kopi.



Gambar 13 *Timbangan Digital*

11. Toggle Switch On/Off

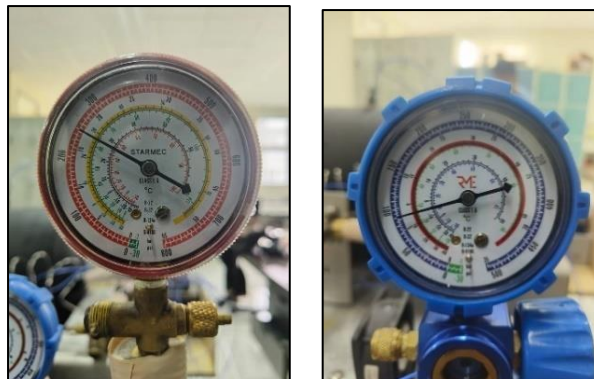
Toggle Switch On/Off digunakan untuk menyalakan dan mematikan komponen elektronik pada alat.



Gambar 14 *Toggle Switch On/Off*

12. Manometer/Pressure gauge

Manometer / pressure gauge digunakan untuk mengukur tekanan.



Gambar 15 *Manometer/Pressure gauge*

13. Pompa Vakum

Pompa vakum berfungsi untuk mengurangi tekanan di dalam ruang pengeringan.



Gambar 16 Pompa Vakum

14. Pipa PVC dan Cap

Pipa PVC dan *Cap* berfungsi sebagai wadah kondensor.



Gambar 17 Pipa PVC dan Cap

15. Reservoir

Reservoir berfungsi sebagai wadah untuk menampung air yang akan digunakan untuk membuang panas dari kondensor.



Gambar 18 Reservoir

16. Pompa Air

Pompa Air berfungsi untuk memompa air dari *reservoir* ke kondensor.



Gambar 19 Pompa Air

17. Selang

Selang digunakan untuk mengalirkan air dari *reservoir* ke kondensor



Gambar 20 Selang

2.2.2 Bahan

1. Biji Kopi Arabika

Biji kopi arabika yang digunakan sebagai objek penelitian pada alat pengering beku-vakum



Gambar 21 Biji Kopi Arabika

2. Refrigeran

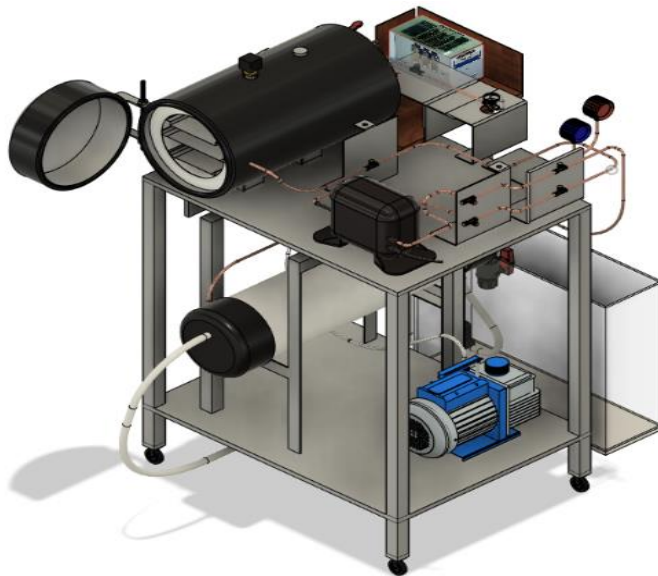
Refrigeran digunakan sebagai fluida kerja dari sistem refrigrasi. Refrigeran yang digunakan yaitu Refrigeran dan Refrigeran R13a dan refrigeran R600a.



Gambar 22 Refrigeran R134a & R600a

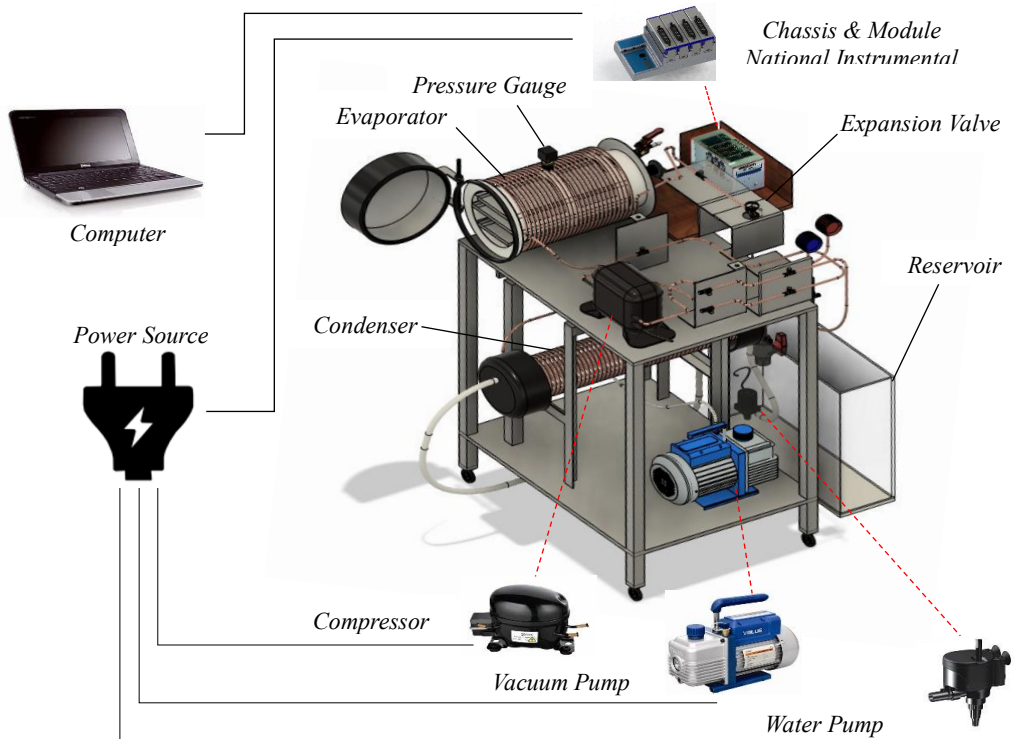
2.3 Desain dan Skema Alat Pengering beku-vakum (Vacuum Freeze Drying)

2.3.1 Desain Alat Pengujian



Gambar 23 Rangkaian Alat Pengering beku-vakum (*vacuum Freeze Drying*)

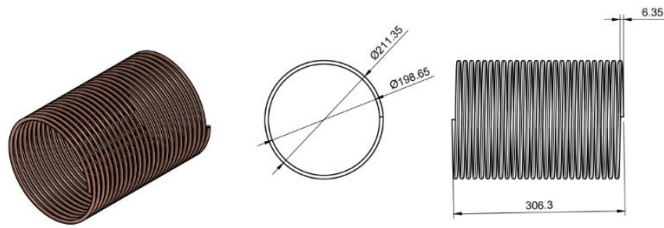
2.3.2 Skema Rancangan Instalasi Alat Pengering Beku Vakum



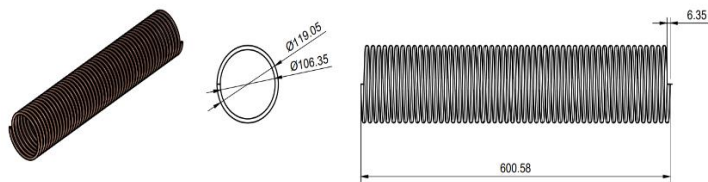
Gambar 24 Skema Rancangan Instalasi Alat Pengering beku-vakum (*Vacuum Freeze Drying*)

2.3.3 Karakteristik Alat

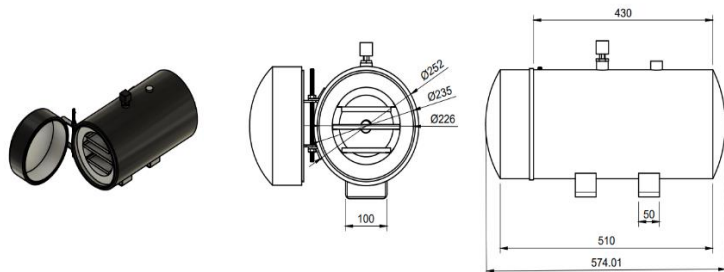
Adapun dimensi dari komponen-komponen dari alat pengering ini adalah sebagai berikut :



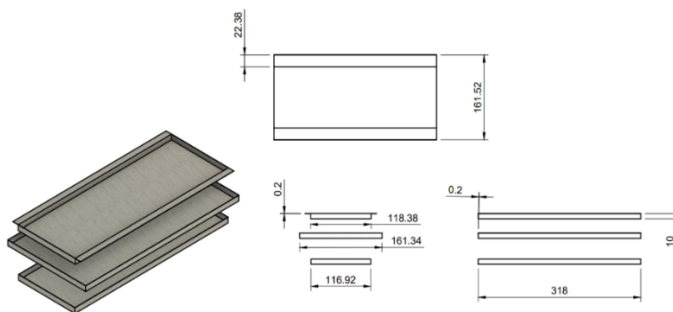
Gambar 25 Evaporator



Gambar 26 Kondensor



Gambar 27 Ruang Pengeringan



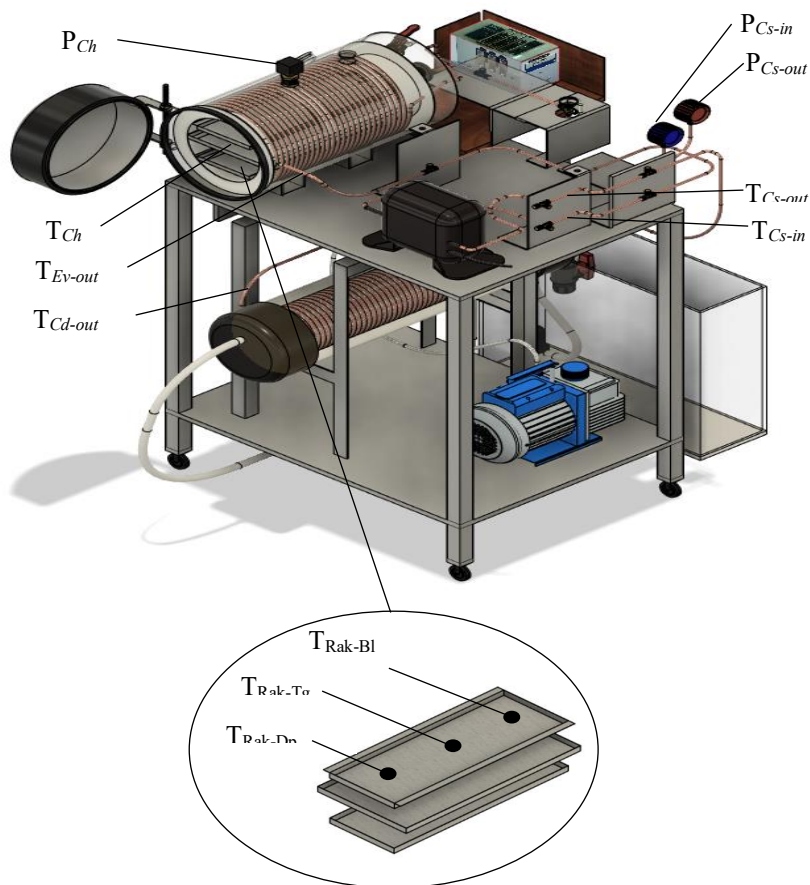
Gambar 28 Rak

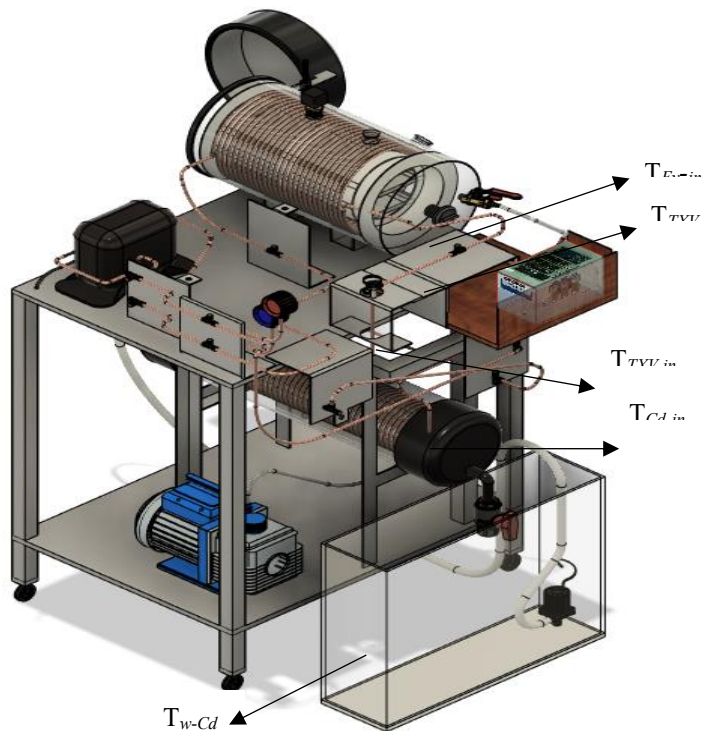
2.4 Metode Pengumpulan Data

2.4.1 Studi Lapangan (*Field Research*)

Studi lapangan merupakan pengambilan data yang diperoleh dengan mengumpulkan data langsung dari analisa yang dilakukan dari tempat penelitian, meliputi setiap hasil penelitian, foto - foto, dan data yang relevan terhadap penelitian. Ini bisa berbentuk tulisan dan gambar sehingga mengelolanya dalam bentuk tabel dan grafik.

Adapun data yang dikumpulkan sebagai berikut :





Gambar 29 Area Pengambilan Data Temperatur dan Tekanan

2.4.2 Studi Pustaka (*Library Research*)

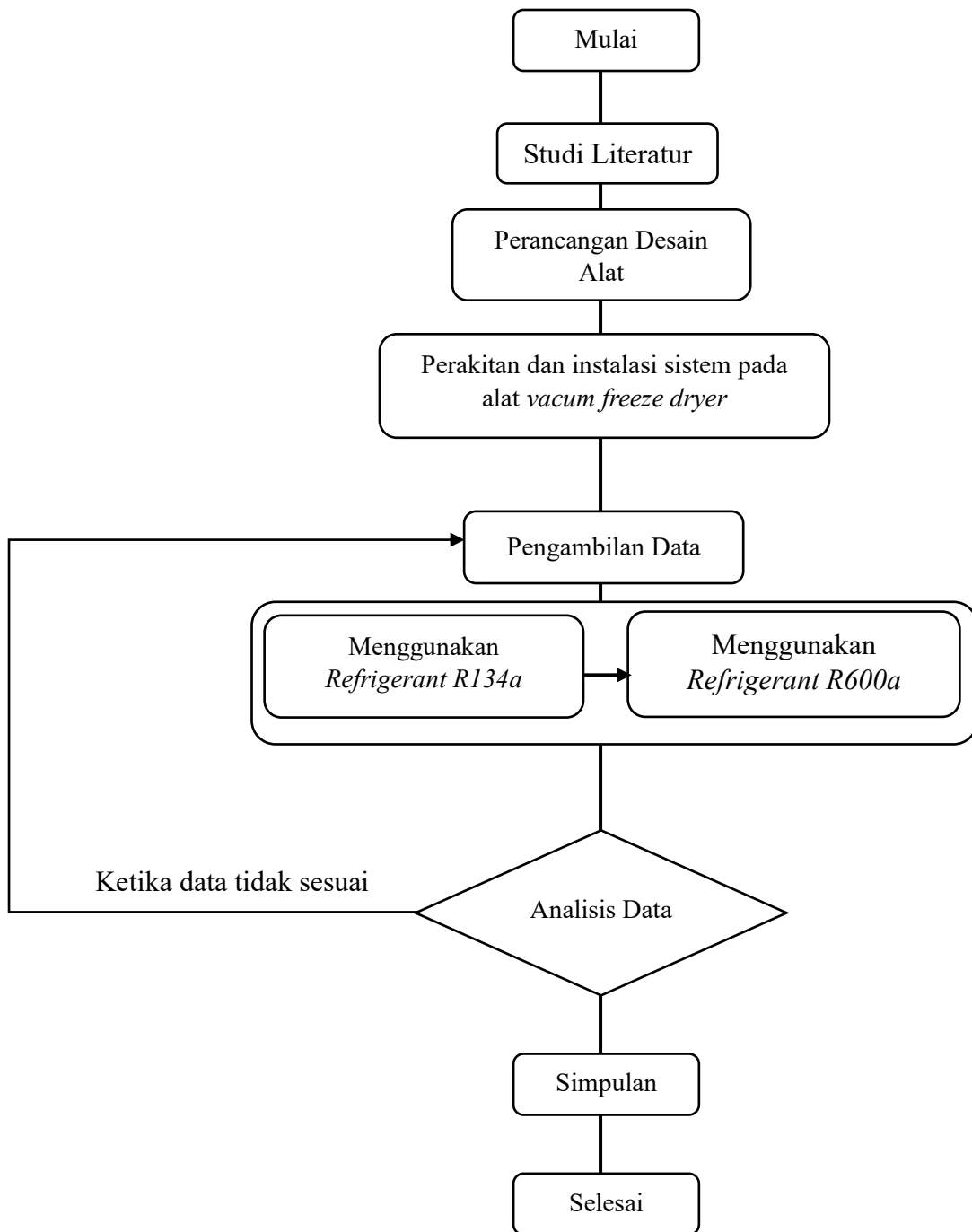
Studi pustaka merupakan pengambilan data yang diperoleh dengan membaca dan mengumpulkan data-data teoritis melalui buku-buku, tulisan ilmiah, literatur serta catatan perkuliahan yang bersangkutan dengan masalah-masalah yang akan dibahas, sehingga diperoleh landasan yang digunakan dalam pemecahan masalah tersebut.

2.5 Prosedur Penelitian

1. Perancangan dan pembuatan alat pengering beku vakum (*vacum freeze dryer*).
2. Instalasi dan pemasangan komponen sistem refrigerasi kompresi uap.
3. Mengatur letak posisi termokopel pada setiap titik dan dihubungkan ke modul *national Instrumenal* (NI).
4. Melakukan pemvakuman sistem alat *vacum freeze dryer* menggunakan *vacuum pump* sebelum pengisian refrigeran.
5. Pengisian refrigeran R134a dengan tekanan yang telah ditentukan sebelumnya.
6. Modul NI, alat *vacum freeze dryer* dalam posisi on dan program Labview berjalan.
7. Pencatatan data pada program LabVIEW diatur setiap detik selama 120 menit pada saat kompresor menyala.
8. Setelah pengambilan data selesai semua data yang dapatkan diolah.
9. Langkah 2 hingga 8 diulang untuk variasi refrigeran R600a dengan waktu pengambilan data selama 180 menit pada saat kompresor menyala.

2.6 Diagram Alir

Sistematika dari penelitian ini dapat kita tinjau pada diagram alir sebagai berikut:



Gambar 30 Alur Penelitian