

**RANCANG BANGUN ALAT PENGERING BIJI KOPI DENGAN SISTEM  
PENGERING BEKU VAKUM (VACUUM FREEZE DRYING)  
MENGUNAKAN REFRIGERAN R-134a**



**MUH. AHSAN RIDWAN  
D021 20 1029**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2024**

**RANCANG BANGUN ALAT PENGERING BIJI KOPI DENGAN SISTEM  
PENGERING BEKU VAKUM (*VACUUM FREEZE DRYING*)  
MENGUNAKAN REFRIGERAN R-134a**

**MUH. AHSAN RIDWAN  
D021 20 1029**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2024**

**RANCANG BANGUN ALAT PENGERING BIJI KOPI DENGAN SISTEM  
PENGERING BEKU VAKUM (*VACUUM FREEZE DRYING*)  
MENGUNAKAN REFRIGERAN R-134a**

MUH. AHSAN RIDWAN  
D021 20 1029

Skripsi

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana

Program Studi Teknik Mesin

pada

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2024**

**SKRIPSI****RANCANG BANGUN ALAT PENERING BIJI KOPI DENGAN SISTEM  
PENERING BEKU VAKUM (*VACUUM FREEZE DRYING*)  
MENGUNAKAN REFRIGERAN R-134a****MUH. AHSAN RIDWAN**  
**D021 20 1029**

Skripsi,

telah dipertahankan di depan Panitia Ujian pada 26 November 2024  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan  
pada



Program Studi Teknik Mesin  
Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin  
Makassar

Mengesahkan:

Pembimbing Utama,



Prof. Dr-Ing. Ir. Wahyu H. Piarah, MSME  
NIP 19600302 198609 1 001

Pembimbing Pendamping,



Prof. Dr. Ir. Zuryati Djafar, MT  
NIP 19680301 199702 2 001

Mengetahui:

Ketua Program Studi,



Dr. Ir. Muhammad Syahid, ST., MT  
NIP. 19770707 200511 1 001

## PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi berjudul “Rancang Bangun Alat Pengering Biji Kopi Dengan Sistem Pengering Beku Vakum (*Vacuum Freeze Drying*) Menggunakan Refrigeran R-134a” adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing Prof. Dr-Ing. Ir. Wahyu H. Piarah, MSME sebagai Pembimbing Utama dan Prof. Dr. Ir. Zuryati Djafar, MT sebagai pembimbing pendamping. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks yang dicantumkan dalam Daftar Pustaka skripsi ini. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa skripsi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 26 November 2024



MUH. AHSAN RIDWAN.

D021201029

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah *Azza Wa Jalla* atas berkat rahmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul “**Rancang Bangun Alat Pengering Biji Kopi Dengan Sistem Pengering Beku Vakum (*Vacuum Freeze Drying*) Menggunakan Refrigeran R-134a**”. Penyusunan skripsi ini merupakan syarat kelulusan dalam menyelesaikan studi untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.

Penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu selama proses penelitian dilaksanakan hingga penyusunan skripsi ini selesai. Ucapan terima kasih terkhusus yang sedalam-dalamnya penulis persembahkan kepada doa kedua orang tua yakni **Bapak Ridwan** dan **Ibu Hamsinar**. tidak ada henti-hentinya mendoakan, menyemangati dan menasehati penulis sampai bisa berada di tahap ini. Dengan segala keikhlasan dan kerendahan hati penulis ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya terutama kepada:

1. Bapak **Prof. Dr-Ing. Ir. Wahyu H. Piarah, MSME** dan Ibu **Prof. Dr. Ir. Zuryati Djafar, MT** selaku dosen pembimbing satu dan dosen pembimbing dua atas segala bimbingan selama penelitian hingga dapat menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak **Prof. Dr. Eng. Andi Erwin Eka Putra, ST., MT** dan Bapak **Ir. Andi Mangkau, MT** selaku dosen penguji atas masukan yang bermanfaat dalam penyusunan skripsi ini.
3. Seluruh staf dan dosen departemen Teknik Mesin atas ilmu dan bantuan selama Kuliah di Teknik Mesin Universitas Hasanuddin.
4. Bapak Akhmad Nurdin dan Ibu Halimah yang terus mendoakan, dan menyemangati penulis, serta rekan-rekan kerja di PT. Bukaka Teknik Utama Balikpapan yang telah membantu dalam proses pembuatan alat penelitian penulis.
5. Teman-teman dan kakak-kakak seperjuangan Laboratorium Mesin Pendingin dan Pemanas yang telah membantu selama masa penelitian dan penyusunan skripsi.
6. Kedua partner penelitian penulis, Muhammad Agung Junaid dan Nurul Wahdania yang berjasa besar dari perancangan penelitian hingga penyusunan skripsi penulis, yang selalu setia dan memberikan bantuan kepada penulis.
7. Saudara–saudara seperjuangan ZTATOR'2020 yang setia menemani, membantu, dan mendukung penulis dari awal kuliah dan seterusnya.
8. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu, yang telah memberi dukungan dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna walaupun telah menerima bantuan dari berbagai pihak. Apabila terdapat kesalahan-kesalahan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis dan bukan para pemberi bantuan. Kritik dan saran yang membangun akan lebih menyempurnakan skripsi ini.

Penulis,

MUH. AHSAN RIDWAN.

## ABSTRAK

**MUH. AHSAN RIDWAN.** Rancang Bangun Alat Pengereng Biji Kopi Dengan Sistem Pengereng Beku Vakum (Vacuum Freeze Drying) Menggunakan Refrigeran R-134a. (dibimbing oleh Wahyu H. Piarah dan Zuryati Djafar).

**Latar Belakang.** Pengerengan biji kopi merupakan salah satu tahapan kritis dalam proses pengelolaan biji kopi. Proses ini memiliki tujuan utama untuk mencegah pertumbuhan mikroorganisme dan mengurangi risiko kontaminasi senyawa kimia yang dapat merusak kualitas biji kopi. Metode pengerengan umumnya menggunakan cara konvensional atau pengerengan alami, seperti panas matahari, yang memakan waktu 1-2 minggu, dengan risiko perpanjangan waktu selama musim hujan. Namun proses pengerengan menggunakan panas matahari dan udara panas, dapat memengaruhi kualitas biji kopi, terutama dalam hal profil volatil, komponen bioaktif, komposisi asam lemak, dan rasa pada biji kopi. Solusi dari permasalahan tersebut ialah penggunaan pengering beku pada biji kopi. **Tujuan.** Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis temperatur, tekanan, dan penurunan kadar air selama 3 jam, 5 jam, 7 jam, dan 14 jam untuk 4 jenis metode pengerengan. **Metode.** Dalam studi ini, eksperimen dilakukan dengan empat metode pengerengan yang berbeda yaitu pengerengan beku lalu vakum (B-5LV), pengerengan beku vakum hingga  $-5^{\circ}\text{C}$  (B-5V), pengerengan beku vakum 20 jam (BV), dan pengerengan vakum (V). **Hasil.** Hasil eksperimen menunjukkan bahwa metode pengerengan yang paling efisien dalam menurunkan kadar air adalah metode pengerengan beku vakum hingga  $-5^{\circ}\text{C}$  (B-5V). Secara persentase, metode pengerengan ini dapat menurunkan kadar air berturut-turut yaitu sebesar 27,5%, 21,8%, 16,8%, dan 12,3%. **Kesimpulan.** metode pengerengan beku vakum hingga  $-5^{\circ}\text{C}$  (B-5V) lebih baik dari ketiga metode pengerengan lainnya.

**Kata Kunci:** Pengerengan Biji Kopi, Kualitas Biji Kopi, Pengereng Beku

## ABSTRACT

**MUH. AHSAN RIDWAN.** *Design and Development of a Coffee Bean Drying Device Using a Vacuum Freeze Drying System with R-134a Refrigerant.* (supervised by Wahyu H. Piarah and Zuryati Djafar).

**Background.** Coffee bean drying is one of the critical stages in the coffee bean processing chain. The main objective of this process is to prevent microbial growth and reduce the risk of chemical contamination that could harm the quality of the coffee beans. Conventional or natural drying methods, such as sun drying, usually take 1-2 weeks, with potential delays during the rainy season. However, the use of sunlight and hot air for drying can affect the quality of coffee beans, especially regarding volatile profiles, bioactive components, fatty acid composition, and taste. A solution to these challenges is the application of freeze-drying for coffee beans. **Objective.** This research aims to analyze temperature, pressure, and moisture reduction over 3 hours, 5 hours, 7 hours, and 14 hours for four drying methods. **Methods.** In this study, experiments were conducted using four different drying methods: freeze drying followed by vacuum (B-5LV), vacuum freeze drying to  $-5^{\circ}\text{C}$  (B-5V), vacuum freeze drying for 20 hours (BV), and vacuum drying (V). **Results.** The experimental results show that the most efficient method for reducing moisture content is vacuum freeze drying to  $-5^{\circ}\text{C}$  (B-5V). This method achieved moisture reductions of 27.5%, 21.8%, 16.8%, and 12.3%, respectively. **Conclusion.** The vacuum freeze drying method to  $-5^{\circ}\text{C}$  (B-5V) is superior to the other three drying methods.

**Keywords:** Coffee Bean Drying, Coffee Bean Quality, Freeze Dryer.

## DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	iv
LEMBAR PENGESAHAN.....	iv
PERNYATAAN KEASLIAN .....	v
UCAPAN TERIMA KASIH.....	vi
ABSTRAK.....	viii
<i>ABSTRACT</i> .....	ix
DAFTAR ISI .....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xv
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1    Latar Belakang.....	1
1.2    Rumusan Masalah.....	2
1.3    Tujuan dan Manfaat.....	2
1.3.1    Tujuan .....	2
1.3.2    Manfaat.....	3
1.4    Batasan Masalah .....	3
1.5    Landasan Teori .....	3
1.5.1    Proses pengelolaan biji Kopi.....	3
1.5.2    Teknologi Pengering Beku.....	5
1.5.3    Mekanisme Pengering Beku .....	6
1.5.4    Sistem Refrigerasi .....	10
1.5.5    Laju Pengeringan.....	12
1.5.6    Efisiensi Pengeringan.....	13
BAB II METODE PENELITIAN.....	14
2.1    Waktu dan Tempat Penelitian .....	14
2.2    Metode Penelitian .....	14

2.3	Variabel Penelitian .....	14
2.4	Alat dan Bahan .....	15
2.5	Desain Prototipe Simulasi <i>Data Center</i> .....	22
2.6	Skema Rancangan Instalasi Alat Pengering Beku Vakum .....	23
2.7	Karakteristik Alat .....	23
2.8	Data yang dikumpulkan .....	25
2.9	Prosedur Penelitian .....	27
2.10	Alur Penelitian.....	28
BAB III HASIL DAN PEMBAHASAN .....		29
3.1	Analisis Data dan Perhitungan .....	29
3.1.1	Hasil Perancangan Ruang Pengering .....	29
3.1.2	Hasil Pengujian Sistem Refrigerasi .....	30
3.2	Grafik dan Pembahasan.....	35
3.2.3	Diagram Perbandingan Nilai Laju Aliran Massa Refrigeran dan COP Sistem Pendingin pada Proses Pendinginan yang berbeda .....	43
3.2.4	Grafik Temperatur dan Tekanan <i>Chamber</i> Pada Setiap Proses Pengeringan.....	44
3.2.5	Grafik Kadar Air Pada Setiap Proses Pengeringan.....	48
BAB IV KESIMPULAN.....		52
4.1	Simpulan .....	52
4.2	Saran.....	53
DAFTAR PUSTAKA.....		54
LAMPIRAN.....		57

**DAFTAR TABEL**

Nomor Urut	Halaman
<b>Table 1</b> Spesifikasi Alat .....	29
<b>Table 2.</b> Data temperatur pendinginan tanpa menggunakan pompa vakum .....	58
<b>Table 3.</b> Data temperatur pendinginan tanpa menggunakan pompa vakum .....	60
<b>Table 4.</b> Data Temperatur dan Tekanan Chamber Pada Proses Pengeringan Beku lalu Vakum (B-5LV) .....	62
<b>Table 5.</b> Data Temperatur dan Tekanan Chamber Pada Proses Pengeringan Beku Vakum Hingga -5 °C (B-5V).....	63
<b>Table 6.</b> Data Temperatur dan Tekanan Chamber Pada Proses Pengeringan Beku vakum 20 jam (BV).....	64
<b>Table 7.</b> Data Temperatur dan Tekanan Chamber Pada Proses Pengeringan Vakum (V) .....	65
<b>Table 8.</b> Data kadar air pada setiap metode pengeringan .....	66

## DAFTAR GAMBAR

Nomor Urut	Halaman
<b>Gambar 1</b> Pengering Beku .....	5
<b>Gambar 2</b> Mekanisme pengeringan biasa (A) dan pengeringan beku (b) ...	6
<b>Gambar 3</b> Mekanisme terjadinya freeze drying .....	7
<b>Gambar 4</b> Diagram Fasa Air .....	8
<b>Gambar 5</b> Skema Rangkaian Siklus Kompresi Uap .....	10
<b>Gambar 6</b> Diagram P-h Pada Siklus Kompresi Uap .....	10
<b>Gambar 7</b> Peta lokasi penelitian.....	14
<b>Gambar 8</b> Biji Kopi Arabika .....	15
<b>Gambar 9</b> Refrigerant R134a .....	15
<b>Gambar 10</b> Kompresor .....	16
<b>Gambar 11</b> Pipa Tembaga .....	16
<b>Gambar 12</b> Insulasi .....	17
<b>Gambar 13</b> Katup Ekspansi.....	17
<b>Gambar 14</b> Temperature Input Module.....	17
<b>Gambar 15</b> Termokopel .....	18
<b>Gambar 16</b> Manifold Gauge .....	18
<b>Gambar 17</b> Pressure Vessel.....	18
<b>Gambar 18</b> Digital Moisture Meter.....	19
<b>Gambar 19</b> Timbangan Digital .....	19
<b>Gambar 20</b> Toggle Switch On/Off .....	19
<b>Gambar 21</b> Manometer/Pressure Gauge .....	20
<b>Gambar 22</b> Vacuum Pump.....	20
<b>Gambar 23</b> Pipa PVC dan Cap.....	20
<b>Gambar 24</b> Reservoir.....	21
<b>Gambar 25</b> Pompa Aquarium .....	21
<b>Gambar 26</b> Selang .....	21
<b>Gambar 27</b> Rangkaian alat pengering beku vakum (Vacuum Freeze Drying) .....	22
<b>Gambar 28</b> Skema rancangan instalasi alat pengering biji kopi.....	23
<b>Gambar 29</b> Evaporator .....	23
<b>Gambar 30</b> Kondensor.....	24
<b>Gambar 31</b> Ruang Pengeringan.....	24
<b>Gambar 32</b> Rak.....	24
<b>Gambar 33</b> Area pengambilan data temperatur dan tekanan.....	26
<b>Gambar 34</b> Diagram alir penelitian .....	28

<b>Gambar 35</b>	Grafik Proses Sublimasi pada Pengeringan Beku lalu Vakum (B-5LV) .....	35
<b>Gambar 36</b>	Grafik Proses Sublimasi Pada Pengeringan Beku Vakum .....	36
<b>Gambar 37</b>	Grafik Proses Sublimasi Pada Pengeringan Beku Vakum .....	37
<b>Gambar 38</b>	Grafik Proses Sublimasi Pada Pengeringan Vakum (V).....	38
<b>Gambar 39</b>	Grafik Temperatur rata-rata inlet dan outlet kompresor.....	39
<b>Gambar 40</b>	Grafik Temperatur rata-rata inlet dan outlet kondensor .....	40
<b>Gambar 41</b>	Grafik Temperatur rata-rata inlet dan outlet katup ekspansi..	41
<b>Gambar 42</b>	Grafik Temperatur rata-rata inlet dan outlet evaporator.....	42
<b>Gambar 43</b>	Grafik temperatur rata-rata inlet dan outlet pada sistem pendinginan menggunakan pompa vakum.....	43
<b>Gambar 44</b>	Grafik perbandingan nilai Laju Aliran Massa Refrigeran dan COP sistem pendingin pada proses pendinginan yang berbeda.....	43
<b>Gambar 45</b>	Temperatur dan tekanan chamber pada pengeringan beku lalu vakum (B-5LV) .....	44
<b>Gambar 46</b>	Temperatur dan tekanan chamber pada pengeringan beku vakum Hingga -5 °C (B-5V).....	45
<b>Gambar 47</b>	Temperatur dan tekanan chamber pada pengeringan beku vakum 20 Jam (BV).....	46
<b>Gambar 48</b>	Temperatur dan tekanan chamber pada pengeringan vakum (V) .....	47
<b>Gambar 49</b>	Grafik Perbandingan Kadar Air pada variasi proses pengeringan (B-5LV dan B-5V).....	48
<b>Gambar 50</b>	Grafik Perbandingan Kadar Air pada variasi proses pengeringan (B-5V dan BV).....	49
<b>Gambar 51</b>	Grafik Perbandingan Kadar Air pada variasi proses pengeringan (B-5V dan V) .....	50
<b>Gambar 52</b>	Diagram batang perbandingan kadar air pada variasi proses pengeringan (B-5LV, B-5V, BV dan V).....	51

**DAFTAR LAMPIRAN**

Nomor Urut	Halaman
<b>Lampiran 1</b> <i>Cupping test</i> .....	57
<b>Lampiran 2</b> Hasil pengambilan data.....	58
<b>Lampiran 3</b> Referensi perhitungan .....	67
<b>Lampiran 4</b> Dokumentasi penelitian .....	71

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara ketiga penghasil kopi terbesar di dunia dengan menghasilkan sebanyak 774,60 ribu ton atau 11,95 juta karung kopi pada tahun 2020. Diperkirakan angka tersebut meningkat tiap tahunnya sebesar 5,31% (Bella Gesteliana, 2023). Kopi menjadi salah satu komoditas unggulan perkebunan yang mempunyai kontribusi yang cukup nyata dalam perekonomian Indonesia sebagai penghasil devisa, sumber pendapatan petani, penghasil bahan baku industri, dan pengembangan wilayah (Bella Gesteliana, 2023).

Kelurahan Banyorang yang berlokasi di Kecamatan Tompobulu, Kabupaten Bantaeng, Provinsi Sulawesi Selatan memiliki UMKM yang bergerak di bidang pertanian biji kopi sekaligus sebagai mitra pengolahan biji kopi. Mitra tersebut dapat menghasilkan setidaknya 40 ton biji kopi/tahun, hal tersebut menggambarkan betapa potensialnya pertanian biji kopi di Indonesia serta menggambarkan penyebaran kebun kopi yang sangat luas.

Biji kopi masih mengalami proses yang cukup panjang untuk menghasilkan kopi bubuk siap konsumsi. Proses tersebut mulai dari pengupasan, pengeringan, penyangraian dan penggilingan yang kebanyakan masih menggunakan metode konvensional. Upaya dan inovasi terus dilakukan tidak hanya terbatas pada meningkatnya jumlah produksi namun mengubah proses produksinya agar bisa lebih efisien. Pengeringan pada biji kopi bertujuan untuk mencegah mikroorganisme maupun senyawa kimia yang dapat merusak kualitas biji kopi (Fauzi, dkk, 2021). Biji kopi harus dikeringkan sampai memiliki kadar air 10-12.5% sehingga dinyatakan layak oleh Standar Nasional Indonesia (Fauzi, dkk, 2021). Pengurangan kadar air ini sangat penting untuk pengawetan produk, karena dapat menurunkan aktivitas metabolisme biji kopi dan menghambat aksi mikroorganisme. Selain itu, pengurangan kadar air juga mempertahankan integritas fisik dan komponen kimia biji kopi, yang merupakan faktor penting dalam pengembangan sifat sensorik produk akhir (Camila, et al, 2022). Proses pengeringan konvensional dilakukan dengan menjemur biji kopi dibawah sinar matahari dengan durasi 10-14 hari. Namun proses pengeringan ini tidak sepenuhnya bisa berjalan jika kondisi cuaca yang tidak memungkinkan untuk melakukan proses pengeringan (Fauzi, dkk, 2021). Efek radiasi, dan optimalisasi pengeringan kopi menggunakan matahari, dan pengeringan udara panas berlebih berdampak pada profil volatil, komponen bioaktif, komposisi asam lemak, dan kualitas rasa pada biji kopi (Wenjiang dong, et al, 2019). Oleh karena itu diperlukan suatu teknologi alat pengering yang dapat meminimalisir kadar air tanpa menyebabkan kerusakan termal dan berkurangnya kandungan nutrisi pada biji kopi.

Menurut Roji, et al (2021). *Freeze drying* mempunyai keunggulan dalam mempertahankan mutu hasil pengeringan, khususnya untuk produk-produk yang sensitif terhadap panas. Saat ini penggunaan *freeze drying* banyak digunakan untuk

mengawetkan, dan menjaga kualitas buah maupun sayuran. Fadarima (2020) telah melakukan pengeringan beku cabai yang mengandung kadar air sebesar 82,52% menjadi 6,36%. Hamid dan Nour (2018) menerapkan 3 jenis pengeringan pada potongan beetroot (pengeringan matahari, pengeringan panas, dan pengeringan beku). Parameter yang diukur adalah komposisi kimia, nitrat dan betaine dari beetroot segar dan beetroot kering. Hasil menunjukkan bahwa komposisi kimia dari proses *freeze drying* beetroot lebih tinggi dibandingkan di beetroot yang dikeringkan dengan pengeringan konvensional. Mbondo et al. (2018) meneliti efek dari 4 metode pengeringan pada terong terhadap kadar total fenolik, karoten, kapasitas antioksidan dan likopen pada terong Afrika. *Freeze drying* memiliki keunggulan tingkat retensi total fenol (95,05%), hasil ini jauh lebih baik dibanding pengeringan sinar matahari, pengeringan vakum dan pengeringan oven.

Pengeringan biji kopi menggunakan metode pengeringan beku belum pernah dilakukan, walaupun metode ini memiliki prospektif yang baik untuk diterapkan karena dapat mempertahankan mutu hasil pengeringan, mempertahankan stabilitas produk (menghindari perubahan aroma, dan warna), mempertahankan stabilitas struktur bahan (pengkerutan, dan perubahan bentuk setelah pengeringan) serta mencegah terjadinya reaksi-reaksi kimia, dan aktivitas enzim yang dapat merusak kandungan gizi bahan pangan (Arto Merivaara, 2021).

Berdasarkan uraian di atas penulis tertarik untuk **merancang bangun alat pengering biji kopi dengan sistem pengering beku-vakum (*vacuum freeze drying*) menggunakan refrigeran R-134a.**

## 1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik dan prestasi (COP, temperatur kondensor, temperatur evaporator, dan kerja kompresor) pengering biji kopi sistem pengering beku-vakum dengan refrigeran R-134a pada temperatur pendinginan  $-5^{\circ}\text{C}$ ?
2. Bagaimana karakteristik kadar air yang hilang pada pemvakuman selama 3 jam, 5 jam, 7 jam, dan 14 jam untuk 4 jenis proses:
  - a) Beku lalu vakum
  - b) Beku vakum hingga  $-5^{\circ}\text{C}$
  - c) Beku vakum 20 jam
  - d) Vakum

## 1.3 Tujuan dan Manfaat

### 1.3.1 Tujuan

Tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui karakteristik dan prestasi (COP, temperatur kondensor, temperatur evaporator, dan kerja kompresor) pengering biji kopi sistem pengering beku-vakum dengan refrigeran R-134a pada temperatur pendinginan  $-5^{\circ}\text{C}$ ?

2. Untuk menganalisis karakteristik kadar air yang hilang pada pemvakuman selama 3 jam, 5 jam, 7 jam, dan 14 jam untuk 4 jenis proses:
  - a) Beku lalu vakum
  - b) Beku vakum hingga  $-5^{\circ}\text{C}$
  - c) Beku vakum 20 jam
  - d) Vakum

### 1.3.2 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain:

1. Sebagai bentuk inovasi dalam proses pengeringan biji kopi tanpa menyebabkan kerusakan termal, dan berkurangnya kandungan nutrisi pada biji kopi.
2. Sebagai dasar pengembangan sistem *freeze drying* untuk penulis dan peneliti lain.

### 1.4 Batasan Masalah

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

1. Dimensi *Container prototype* :  
Diameter 215 mm dan panjang 510 mm.
2. Menggunakan refrigeran R134a.
3. Massa biji kopi yang akan diuji sebesar 500 gram
4. Bahan yang diteliti adalah biji kopi arabika yang sudah dikupas (*pulper*).

### 1.5 Landasan Teori

#### 1.5.1 Proses pengelolaan biji Kopi

Kopi ditanam di lebih dari 70 negara dan merupakan komoditas andalan bagi sebagian besar negara tersebut, dan menyumbang persentase yang signifikan terhadap keseluruhan keuntungan ekspor mereka. Namun, 45 negara penghasil kopi menyumbang lebih dari 97 persen output global. Bagi sebagian besar negara-negara penghasil kopi, kopi menjadi sumber utama pendapatan mata uang asing serta persentase besar pendapatan pajak dan GMP (Beaula Girma Adugna, 2021). Kopi merupakan salah satu minuman yang berasal dari bubuk kopi yang diseduh, melalui proses sangrai, dihaluskan hingga menjadi bubuk. Terdapat beberapa spesies kopi yang sering dikenal dan dibudidayakan oleh masyarakat seperti kopi arabika (*arabica coffea*), dan kopi robusta (*canephora coffea*) (Arshila, A.D., 2017). Pengolahan kopi sangat mempengaruhi kualitas biji kopi. Menurut Girma, dkk (2022), 40% kualitas kopi ditentukan di lapangan, 40% pada proses pascapanen primer, dan 20% pada proses ekspor dan penanganan termasuk penyimpanan. Hal ini menekankan pentingnya pengolahan primer dalam meningkatkan kualitas dari biji kopi (Bealu G. & Abrar S. 2022). Pengolahan buah kopi dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu cara basah dan cara kering.

### 1. Sortasi Gelondong

Sortasi gelondong (ceri kopi) yaitu proses di mana biji kopi yang bermutu baik (berwarna merah) dipisahkan dari biji kopi yang belum matang atau memiliki kualitas yang rendah (berwarna hijau, hampa, dan terserang bubuk). Buah kopi dimasukkan terlebih dahulu ke dalam wadah berisi air, buah kopi yang sudah matang dan tenggelam ke dasar dipisahkan dengan buah kopi yang belum matang mengapung (Neil M. Rotta, et al, 2021).

### 2. Pengupasan Kulit Buah Kopi (*pulping*)

Pengupasan kulit buah kopi bertujuan untuk memisahkan biji kopi dari kulit terluar dan *mesocarp* (bagian daging). Pengupasan kulit buah kopi dapat dilakukan baik secara manual maupun menggunakan mesin. Proses pengupasan kulit yang dilakukan dengan menggunakan mesin *pulper*, sehingga diperoleh biji kopi yang telah terpisah dari kulit buahnya (Arshila, A.D., 2017).

### 3. Fermentasi

Proses Fermentasi bertujuan untuk mengurangi rasa pahit dan mendorong terbentuknya kesan *mild* pada cita rasa seduhannya. Prinsip dari fermentasi adalah penguraian senyawa-senyawa yang terkandung di dalam lapisan lendir oleh mikroba alami dan dibantu dengan oksigen dari udara. Proses fermentasi dilakukan secara basah dengan merendam biji kopi dalam bak air dengan waktu fermentasi berkisar antara 12 sampai 36 jam tergantung permintaan konsumen (Arshila, A.D., 2017).

### 4. Pengeringan Biji Kopi

Pengeringan kopi yang sudah dipetik dan disortasi harus segera dikeringkan agar tidak mengalami proses kimia yang dapat menurunkan mutu. Pengeringan bisa memengaruhi parameter kualitas utama yang terkait dengan produk makanan kering, seperti warna, rasa, aroma, tekstur, dan sifat nutrisi (Wenjiang dong, et al, 2019). Pada umumnya petani dalam proses pengeringan biji kopi menggunakan metode konvensional atau pengeringan secara alami (panas matahari), proses pengeringan secara alami dapat mencapai 1 - 2 minggu, dengan perubahan cuaca atau pada musim hujan proses penjemuran kopi dapat memakan waktu lebih lama lagi sekitar 2-3 minggu, untuk menghasilkan biji kopi yang memiliki kadar air yang sesuai standart yaitu 11-12,5%, Bila kadar air kopi beras lebih dari 12,5%, biasanya akan mudah terserang cendawan, sedangkan bila kurang dari 11% akan mudah pecah (Robert Silaban, 2020).

Beberapa penelitian sebelumnya telah meneliti pengaruh prosedur pengeringan yang memanfaatkan pengeringan matahari, dan pengeringan udara panas terhadap kualitas biji kopi. Perpindahan panas pada proses pengeringan kopi, seiring dengan sifat dan kualitas biji kopi menunjukkan bahwa efek radiasi, dan optimalisasi pengeringan kopi menggunakan matahari, dan pengeringan udara panas berlebih berdampak pada profil volatil, komponen bioaktif, komposisi asam lemak, dan kualitas rasa pada biji kopi (Wenjiang dong, et al, 2019). Oleh karena itu penulis tertarik untuk mengkaji penggunaan *freeze drying* pada pengeringan biji kopi.

### 1.5.2 Teknologi Pengering Beku

Pengeringan beku, atau dikenal juga sebagai *liofilisasi*, adalah proses pengeringan yang banyak digunakan dalam pengawetan makanan terbaik. Metode ini melibatkan pembekuan produk dan kemudian menurunkan tekanan di sekitarnya untuk memungkinkan air beku dalam produk menyublim langsung dari fase padat ke fase gas [(Darisz Dziki. 2020). Saat ini, teknologi pengeringan beku telah diaplikasikan pula pada produk pangan untuk konsumen umum. Metode pengeringan beku digunakan untuk mengeringkan makanan yang mengandung senyawa yang sensitif secara termal dan rentan terhadap oksidasi karena beroperasi pada temperatur rendah dan di bawah vakum tinggi, penerapan pengeringan beku untuk berbagai makanan nabati, seperti apel, jambu biji, stroberi, blackberry, labu, tomat, asparagus, kopi, teh, bawang putih, jahe dan lain-lain (Carlos Vilas, et al. 2020).



a. Pengering Beku di  
Laboratorium Farmasi



b. Pengering Beku di Industri

**Gambar 1** Pengering Beku

*Freeze Dryer* merupakan suatu alat pengeringan yang termasuk kedalam *Conduction Dryer / Indirect Dryer* karena proses perpindahan terjadi secara tidak langsung yaitu antara bahan yang akan dikeringkan (bahan basah) dan media pemanas terdapat dinding pembatas sehingga air dalam bahan basah / lembab yang menguap tidak terbawa bersama media pemanas. Hal ini menunjukkan bahwa perpindahan panas terjadi secara hantaran (konduksi), sehingga disebut juga *Conduction Dryer/ Indirect Dryer*. pengeringan beku memiliki keunggulan mempertahankan mutu hasil pengeringan, khususnya produk yang sensitif terhadap panas. menguap tidak terbawa bersama media pemanas (Sagar Bhatta, et al. 2020).

Menurut Radojčin dkk. (2021), metode pengeringan menggunakan *freeze drying* mampu mengurangi kandungan air buah tanpa mengurangi nutrisinya sehingga membuat pangan menjadi lebih awet.

Menurut Farahmandfar, dkk (2020). Pengeringan beku (FD) juga dikenal sebagai liofilisasi mampu menghasilkan bahan makanan yang bersih, utuh dan bergizi yang disebabkan oleh suhu rendah yang berlaku ( $-2$  hingga  $-50$  °C) dalam

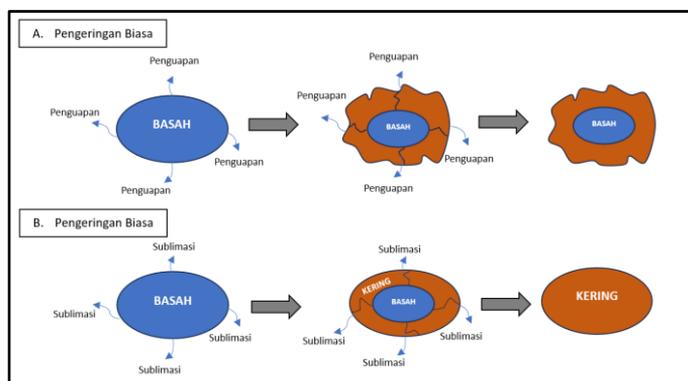
kondisi vakum. Dalam proses ini, air dikristalkan dan dihilangkan dengan sublimasi air dari keadaan padat ke fase uap.

Menurut Silva, dkk (2019). Pengeringan beku adalah teknik pengeringan yang didasarkan pada sublimasi air yang ada dalam suatu produk, sehingga menyebabkan berkurangnya kadar air pada produk. Proses ini melibatkan pembekuan produk untuk kemudian diberi tekanan vakum yang mengakibatkan sublimasi dan desorpsi air, pengeringan beku beroperasi pada temperatur rendah, menjaga karakteristik seperti rasa, warna atau tekstur serta meminimalkan hilangnya senyawa termolabil yang berperan penting dalam aroma dan nilai gizi buah, sehingga menghasilkan produk akhir beku-kering yang memiliki kualitas tinggi dibandingkan dengan teknik pengeringan lainnya.

Menurut Dorota Nowak, Ewa Jakubczyk (2020). Pengeringan beku adalah proses di mana air disublimasikan melalui transisi langsung air dari padat (es) menjadi uap, sehingga menghilangkan wujud cair, dan kemudian menyerap air dari lapisan kering. Proses ini digunakan untuk stabilisasi makanan berkualitas tinggi, bahan biologis dan obat-obatan, seperti protein, vaksin, bakteri dan sel mamalia. Selama pengeringan beku, kualitas produk kering termasuk sifat biologis, nutrisi, dan organoleptik tetap terjaga. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa pembekuan air dalam bahan sebelum *liofilisasi* menghambat proses kimia, biokimia, dan mikrobiologi. Oleh karena itu, rasa, bau, dan kandungan berbagai nutrisinya tidak berubah.

### 1.5.3 Mekanisme Pengering Beku

Mekanisme pengeringan beku berbeda dengan proses pengeringan biasa, di mana pengeringan biasa terjadi melalui mekanisme penguapan (kondensasi) yang biasanya terjadi pada temperatur tinggi (Hariyadi. 2013). Perbedaan antara proses pengeringan beku dengan pengeringan biasa dapat diilustrasikan pada gambar berikut:

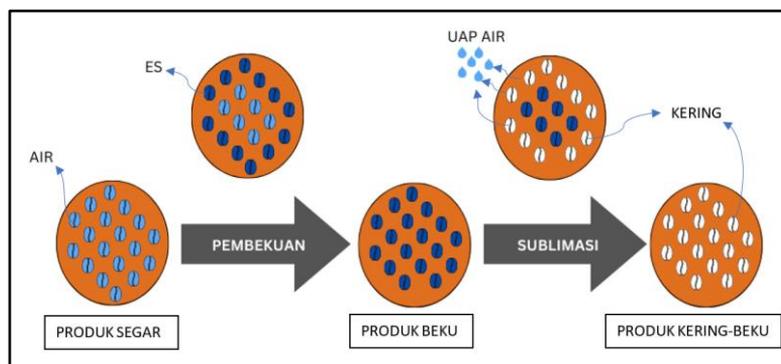


**Gambar 2** Mekanisme pengeringan biasa (A) dan pengeringan beku (b)

Pada gambar A, proses pengeringan biasa terjadi melalui mekanisme penguapan pada temperatur panas, sehingga bagian pangan yang kering akan terjadi perubahan kimia (gelatinisasi pati, karamelisasi gula, atau denaturasi protein) yang menyebabkan terbentuknya kerak di permukaan yang akan memberikan hambatan

bagi difusi uap dari bagian basah ke udara lingkungan. Akibatnya, proses pengeringan akan terhambat dan terhenti, menghasilkan produk yang bagian luar sudah kering -bahkan terlalu kering dan menjadi kerak- tetapi bagian tengahnya masih basah. Kasus demikian sering disebut sebagai case-hardening (Hariyadi. 2013). Pada gambar B, proses pengeringan beku terjadi melalui mekanisme sublimasi yang terjadi pada temperatur dingin. Karena itu, proses gelatinisasi, karamelisasi, dan denaturasi tidak terjadi, sehingga pada bagian pangan yang kering tidak terjadi perubahan pembentukan kerak, dengan demikian uap air bisa berdifusi dengan baik dari bagian basah ke udara lingkungan, sehingga bisa dihasilkan produk yang kering dengan baik (Hariyadi. 2013).

Prinsip teknologi pengeringan beku ini dimulai dengan pembekuan kemudian dilanjutkan dengan pengeringan, yaitu mengeluarkan atau memisahkan hampir sebagian besar air dalam bahan yang terjadi melalui mekanisme sublimasi (Hariyadi. 2013). Secara ilustrasi pengeringan beku dijelaskan seperti pada gambar berikut:



**Gambar 3** Mekanisme terjadinya freeze drying

Gambar diatas menjelaskan bahwa dengan mengendalikan kondisi tekanan (P) dan temperatur (T), air dapat berbentuk gas (uap), cair (air) atau padatan (es). Proses pengeringan beku terdiri dari dua tahap, yaitu pembekuan (*freezing*), dan pengeringan (Hariyadi. 2013). Proses pengeringan beku bergantung pada penghilangan pelarut dari formulasi cair, proses pertama pertama dibekukan, diberi tekanan rendah untuk sublimasi pelarut, dan kemudian dilakukan proses desorpsi akhir untuk menghilangkan ventilasi pelarut yang tidak membeku [(Getachew A. et al. 2020).

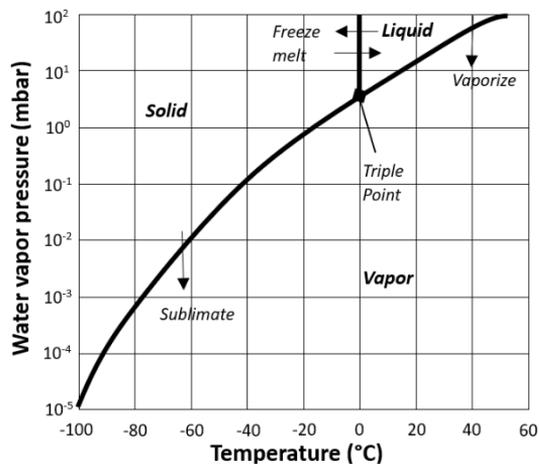
### 1. Pembekuan

Tahap fase pembekuan adalah yang paling kritis dalam seluruh proses pengeringan beku. Bahan padat (buah dan sayuran) maupun bahan cair (kopi dan jus) harus dibekukan sebelum dikeringkan dengan pengering beku. Pertama kandungan air bebas dalam bahan pangan dibekukan dalam temperatur lingkungan yang sangat rendah, Pembekuan bertujuan menjaga nutrisi dari produk dan dapat membunuh bakteri penyebab pembusukan makanan (Getachew A. et al. 2020).

Selama fase pembekuan, formulasi cair dibekukan untuk menghasilkan bentuk padat, di mana terjadi pemisahan fase antara pelarut (biasanya air) dan zat terlarut yang merupakan fenomena utama dalam *lyofilisasi*. Jika pemisahan ini tidak terjadi, formulasi beku yang terbentuk akan menjadi sepenuhnya padat dengan tekanan uap yang sangat rendah, sehingga tidak dapat *lyofilisasi*. Sebagian besar air (80–95%, tergantung pada objek yang dibekukan) mengkristal menjadi kristal es heksagonal, sementara sisanya (5–20%) tetap dalam keadaan cair dan terperangkap dalam matriks zat terlarut. Selama proses pembekuan, saat air dihilangkan melalui kristalisasi, konsentrasi zat terlarut meningkat hingga mencapai tingkat maksimal, di mana peningkatan lebih lanjut tidak mungkin terjadi. Dalam kondisi ini, zat terlarut disebut sebagai zat terlarut dengan konsentrasi beku maksimal (Getachew A. et al. 2020).

## 2. Pengeringan Vakum

Pengeringan vakum merupakan metode pengeringan untuk mengeluarkan air dalam bahan yang dikeringkan dengan cara menurunkan tekanan parsial uap air dari udara di dalam ruang pengering. Tekanan parsial uap air di dalam ruang pengering yang lebih rendah dari tekanan atmosfer dapat berpengaruh terhadap kecepatan pengeringan, sehingga prosesnya lebih singkat walaupun temperatur yang digunakan lebih rendah daripada temperatur yang digunakan pada saat pengeringan di dalam ruang pengering dengan tekanan atmosfer, proses ini disebut dengan proses sublimasi (Getachew A. et al. 2020).



**Gambar 4** Diagram Fasa Air

Sublimasi adalah perubahan wujud dari padat ke gas tanpa mencair terlebih dahulu dengan menggunakan diagram fase air pada Gambar 2.2 bisa diketahui bahwa dengan mengendalikan kondisi tekanan (P) dan temperatur (T), air dapat berbentuk gas (uap), cair (air) atau padatan (es). Pada kondisi tertentu yaitu pada kondisi tekanan 4,58 torr (610,5 Pa) dan temperatur 0°C, air akan berada pada kondisi kesetimbangan antara uap, air, dan es. Titik di mana terjadi kesetimbangan

antar ketiga fase tersebut disebut sebagai titik tripel. Titik triple untuk air terjadi pada pada tekanan (P) 4.58 torr dan temperatur (T) = 0°C. Untuk bahan dalam kondisi beku pada tekanan yang dipertahankan tetap dibawah tekanan triple ( $P_t = 4,58$  torr), dan kemudian temperatur produk dinaikkan maka yang terjadi adalah peristiwa sublimasi, yaitu perubahan fase dari padat (es) ke uap (Hariyadi. 2013).

#### **a) Pengeringan dengan Sublimasi (*Primary Drying*)**

Pada fase pengeringan sublimasi, pelarut yang membeku dihilangkan dari formulasi melalui proses sublimasi, yaitu transisi langsung dari fase padat ke fase gas tanpa melewati fase cair. Untuk memulai sublimasi, tekanan di dalam ruang pengering harus dikurangi hingga jauh di bawah tekanan uap es pada temperatur produk target. Hal ini diperlukan agar sublimasi dapat terjadi, karena es hanya dapat berubah langsung menjadi uap pada tekanan yang cukup rendah, sehingga memungkinkan penghilangan air tanpa melewati fase cair. Proses ini penting untuk menjaga struktur dan kualitas produk selama pengeringan beku (Getachew A. et al. 2020).

Selama tahap ini, temperatur produk ( $T_p$ ) harus dijaga di bawah temperatur maksimum yang diizinkan ( $T_{max}$ ). Jika temperatur produk lebih tinggi dari nilai kritis, produk beku mengalami aliran viskos, yang dikenal sebagai kolaps (Anna Matejčiková. et al. 2022). Temperatur maksimum yang diizinkan biasanya 2-3°C di bawah temperatur kolaps ( $T_c$ ) dan bergantung pada formulasi. Untuk formulasi amorf,  $T_{max}$  dikaitkan dengan temperatur transisi gelas ( $T_g$ ), dan untuk formulasi kristalin,  $T_{max}$  dikaitkan dengan temperatur eutektik ( $T_{eu}$ ). Namun, temperatur produk tidak dikontrol langsung dan bervariasi di seluruh *batch*. Biasanya, produk yang terletak di pinggir memiliki temperatur yang lebih tinggi daripada produk di tengah (Anna Matejčiková. et al. 2022).

#### **b) Pengeringan dengan Desorpsi (*Secondary Drying*)**

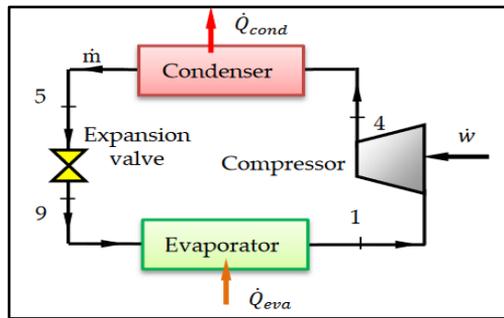
Selama proses pengeringan lanjutan (*secondary drying*), pelarut yang tidak membeku dihilangkan dari formulasi melalui proses desorpsi, yaitu penghilangan fase cair menjadi fase gas melalui penguapan (Timilehin, M.O. & Won, B.Y. 2020). Dalam pengeringan beku, desorpsi didorong oleh perbedaan antara temperatur produk dan temperatur penguapan air pada tekanan tertentu, untuk memfasilitasi penguapan air pada temperatur rendah, tekanan dalam ruang pengering biasanya dijaga sangat rendah, mirip dengan tekanan yang digunakan selama pengeringan primer. Pada saat yang sama, untuk mempercepat desorpsi, temperatur selama pengeringan sekunder dinaikkan hingga setinggi 40°C, tergantung pada sensitivitas panas formulasi. Meningkatkan temperatur membantu mempercepat proses penguapan dengan menyediakan energi yang cukup untuk mengatasi gaya ikat antara molekul air dan material, sehingga mempercepat penghilangan sisa air yang terikat dalam formulasi. Proses ini penting untuk memastikan bahwa produk akhir memiliki kadar air yang sangat rendah, yang dapat meningkatkan stabilitas dan umur simpan produk (Timilehin, M.O. & Won, B.Y. 2020).

### 1.5.4 Sistem Refrigerasi

Refrigerasi dapat didefinisikan sebagai suatu proses untuk mencapai dan menjaga temperatur dibawah temperatur sekitarnya dengan tujuan mendinginkan ruang ataupun produk tertentu sesuai dengan kebutuhan (Ali Alahmer, et al. 2021).

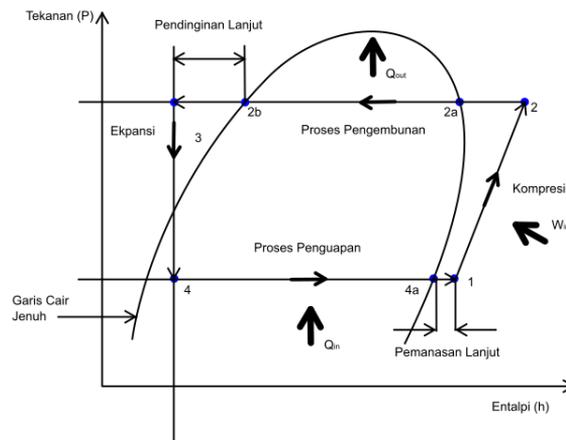
#### 1) Siklus Refrigerasi Kompresi Uap

Pengeringan beku bekerja menggunakan siklus kompresi uap, dengan fluida kerja yang disebut dengan refrigeran. Komponen komponen dari siklus kompresi uap adalah kompresor, evaporator, kondensor dan pipa kapiler. Skematik rangkaian siklus kompresi uap seperti pada gambar 5. diagram P-h siklus kompresi uap ditampilkan pada gambar 6 (Jailani, A.T. 2023).



**Gambar 5** Skema Rangkaian Siklus Kompresi Uap

Proses dari skema kompresi uap adalah :



**Gambar 6** Diagram P-h Pada Siklus Kompresi Uap

#### a. Proses kompresi (proses 1 - 2)

Tahap 1 - 2 pada gambar 6 proses yang terjadi adalah kompresi dilakukan oleh kompresor. Kondisi awal refrigeran pada saat masuk ke kompresor adalah gas panas lanjut bertekanan rendah, setelah mengalami kompresi refrigeran akan

- menjadi gas panas lanjut bertekanan tinggi. Proses kompresi berlangsung secara isentropik (Jailani, A.T. 2023).
- b. Proses penurunan temperatur gas panas lanjut menjadi gas jenuh (proses 2 - 2a)  
Tahap 2 - 2a pada gambar 6 proses penurunan temperatur dari gas panas lanjut menjadi gas jenuh terjadi. refrigeran mengalami penurunan temperatur pada tekanan tetap. Hal ini terjadi akibat adanya kalor yang berpindah ke lingkungan, karena temperatur refrigeran lebih tinggi dari temperatur lingkungan (Jailani, A.T. 2023).
  - c. Proses kondensasi (proses 2a - 2b)  
Tahap 2a - 2b pada gambar 6 proses ini terjadi pada kondensor yang di mana gas jenuh mengalami perubahan fase dari gas jenuh menjadi cair jenuh pada tekanan tetap. Proses ini disebabkan akibat adanya perpindahan panas dari kondensor ke lingkungan karena temperatur kondensor lebih tinggi dari temperatur udara lingkungan (Jailani, A.T. 2023).
  - d. Proses pendinginan lanjut (proses 2b - 3)  
Tahap 2b - 3 pada gambar 6 proses yang terjadi penurunan temperatur refrigeran dan berlangsung pada tekanan konstan dalam fasa cair. Proses pendinginan lanjut dibutuhkan agar kondisi refrigeran keluar kondensor benar benar dalam fasa cair sebelum masuk ke pipa kapiler.
  - e. Proses penurunan tekanan (proses 3 - 4)  
Tahap 3 - 4 pada gambar 6 proses yang terjadi refrigeran dalam fasa cair mengalir menuju pipa kapiler dan mengalami penurunan tekanan dan temperatur. Sehingga temperatur dari refrigeran lebih rendah dari temperatur lingkungan. Pada tahap ini refrigeran berubah fasa dari cair ke fasa campuran cair dan gas (Jailani, A.T. 2023).
  - f. Proses penguapan (proses 4 - 4a)  
Tahap 4 - 4a pada gambar 6 proses yang terjadi refrigeran mengalir ke evaporator dengan tekanan dan temperatur rendah sehingga akan menerima kalor dari lingkungan yang akan didinginkan sehingga fasa dari refrigeran akan berubah seluruhnya menjadi gas jenuh (Jailani, A.T. 2023).
  - g. Proses pemanasan lanjut (proses 4a - 1)  
Tahap 4a - 1 pada gambar 6 proses yang terjadi uap refrigeran yang mengalir setelah evaporator mengalami pemanasan lanjut sebelum masuk ke kompresor (Jailani, A.T. 2023).

## 2) 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 (Jailani, A.T. 2023).

### 1. Daya Kompresor ( $W_{in}$ )

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

$$W_k = V \cdot I \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

V = Tegangan yang digunakan kompresor (volt)

I = Arus yang digunakan kompresor (ampere)

## 2. Laju Aliran Massa Refrigerant

Laju aliran massa refrigerant dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$\dot{m} = \frac{W_k}{(h_2 - h_1)} \dots \dots \dots (2)$$

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. Energi kalor yang dilepaskan oleh kondensor ( $Q_{out}$ )

Energi kalor yang dilepaskan oleh kondensor merupakan perubahan entalpi dititik 2 ke 3 pada gambar 6, persamaan yang digunakan:

$$Q_{out} = h_2 - h_3 \dots \dots \dots (3)$$

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)

## 4. Energi kalor yang diserap oleh evaporator ( $Q_{in}$ )

Energi yang diserap evaporator merupakan entalpi dititik 4 ke 1 pada gambar 6, persamaan yang digunakan:

$$Q_{in} = h_1 - h_4 \dots \dots \dots (4)$$

Keterangan:

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

$h_1$  = Nilai entalpi refrigeran saat keluar evaporator atau sama dengan nilai entalpi refigeran saat masuk pipa kapiler (kJ/kg)

## 5. Coefficient of Performance (COP)

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

$$COP = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} \dots \dots \dots (5)$$

### 1.5.5 Laju Pengeringan

Pengeringan adalah usaha penurunan kandungan air (kadar air) dalam biji setelah dipanen. Pada proses pengeringan akan terjadi penurunan (kelembaban relative)  $R_h$  dan naiknya temperatur lingkungan mesin pengering. Pada umumnya, pengeringan kopi dilakukan hingga mencapai kadar air 12,5% untuk mencapai standar beras yang berkualitas (Ismail, Sulaiman, dkk. 2022).

Kadar air biji kopi yang telah di proses dari beberapa tahap dari biji kopi yang baru di panen yaitu biji kopi yang masih berwarna merah (gelondong) dengan kondisi kadar air sekitar 60% - 65%, kemudian setelah dikupas kulitnya menjadi kopi gabah dengan kondisi kadar air 50% - 60%, yang kemudian dikeringkan sampai kadar air

50% - 45% kemudian di proses menjadi kopi labu dengan cara pengupasan kulit cangkang dengan nilai kadar air 40% - 45% dan kemudian di keringkan kembali sampai menjadi kopi beras (Bambang, S. et al. 2021).

### 1.5.6 Efisiensi Pengeringan

Efisiensi pengeringan digunakan untuk menentukan tingkat keberhasilan proses pengeringan kopi. Efisiensi pengeringan dapat kita hitung berdasarkan perbandingan antara jumlah energi untuk memanaskan dan menguapkan air yang terdapat dalam suatu bahan dengan menggunakan energi pada saat pengeringan (Edi, S. dkk. 2021).

$$\eta_p = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan:

- $\eta_p$  = Efisiensi pengeringan (%)
- $Q_{out}$  = Energi yang digunakan (kJ)
- $Q_{in}$  = Energi yang masuk (kJ)

#### a) Beban uap air

Beban uap air adalah jumlah uap air yang harus diuapkan hingga mencapai kadar air yang diinginkan. Beban uap air dihitung berdasarkan persamaan berikut (Edi, S. dkk. 2021):

$$E = \frac{(KAb_{wet} - KAb_{dry})100}{(100 - KAb_{wet})(100 - KAb_{dry})} \times W_d \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan :

- $E$  = Beban uap air (kg H<sub>2</sub>O)
- $KAb_{wet}$  = Kadar air sebelum dikeringkan (%)
- $KAb_{dry}$  = Kadar air setelah dikeringkan (%)
- $m$  = Massa bahan awal (kg)

#### b) Energi yang dibutuhkan untuk pengeringan

Selama proses pengeringan energi dibutuhkan untuk menguapkan air pada bahan (Panas Laten) hingga mencapai kadar air yang diinginkan. Persamaan yang digunakan adalah (Edi, S. dkk. 2021):

$$Q_l = E \cdot h_{fg} \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan:

$Q_l$  = Energi untuk menguapkan air/panas laten (kJ)

$E$  = Beban uap air (kg H<sub>2</sub>O)

$h_{fg}$  = Kalor laten air (kJ/kg) (dapat dilihat pada table termodinamika uap air)

c) Energi untuk memanaskan bahan dihitung dengan persamaan:

$$Q_s = m \cdot C_p \cdot (\Delta T) \dots \dots \dots (8)$$

$$C_p = (M_1 \times C_{p_{air}}) + (M_2 \times C_{p_{kopi}}) \dots \dots \dots (9)$$

Keterangan:

$Q_s$  = Energi untuk memanaskan biji kopi (kJ)

$m$  = Massa biji kopi yang dikeringkan (kg)

$C_p$  = Panas jenis (kJ/kg °C)

$\Delta T$  = Perubahan temperatur pada biji kopi (°C)

$M_1$  = Kadar air dalam biji kopi

$M_2$  = Padatan biji kopi

d) Energi yang diuapkan ( $Q_{output}$ ) :

$$Q_{output} = Q_s + Q_l \dots \dots \dots (10)$$

e) Energi konsumsi daya ( $Q_{input}$ ) :

$$Q_{input} = Q_{listrik} \times t \dots \dots \dots (11)$$

Keterangan:

$Q_{input}$  = Energi listrik yang digunakan (kJ)

$Q_{listrik}$  = Konsumsi energi listrik (kW)

$t$  = Lama waktu pemakaian listrik (detik)



### 3. Variabel Tetap

Variabel tetap dalam penelitian ini adalah variasi lama pemvakuman yaitu selama 3 jam, 5 jam, 7 jam, dan 14 jam, katup ekspansi dengan diameter orifice 0,4, daya kompresor sebesar 1/6 PK, evaporator berbentuk spiral dengan diameter 1/4 inch, panjang pipa 17 m, kondensor berbentuk spiral dengan diameter 1/4 inch, panjang pipa 20 m menggunakan media pendingin air, dimensi ruang vakum dengan panjang 510 mm, dan diameter 215 mm menggunakan material *stainless steel* tebal 4 mm, dan rak sebanyak 3 tingkat dengan ukuran panjang 310 mm, lebar 150 mm, dan tinggi 20 mm menggunakan material aluminium.

## 2.4 Alat dan Bahan

### 1. Biji Kopi Arabika

Biji kopi arabika digunakan sebagai objek penelitian pada *freeze drying*



**Gambar 8** Biji Kopi Arabika

### 2. Refrigerant R134a

Refrigerant R134a yang digunakan sebagai fluida kerja dari sistem refrigerasi.



**Gambar 9** Refrigerant R134a

### 3. Kompresor

Kompresor berfungsi untuk meningkatkan tekanan dan memompa *refrigerant* ke kondensor.



**Gambar 10** Kompresor

### 4. 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 11** Pipa Tembaga

### 5. Insulasi

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

Material : *Aluminium Foil, Polyethylene*  
Tebal : 3 mm



**Gambar 12** Insulasi

6. Katup Ekspansi

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

Merk : Castel

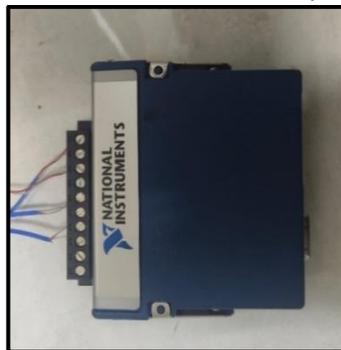
Orifice : 0,4



**Gambar 13** Katup Ekspansi

7. *Temperature Input Module*

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



**Gambar 14** *Temperature Input Module*

#### 8. Termokopel

Termokopel digunakan sebagai sensor yang mengukur temperatur yang ingin ditinjau.



**Gambar 15** Termokopel

#### 9. *Manifold Gauge*

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



**Gambar 16** *Manifold Gauge*

#### 10. *Pressure Vessel*

*Vessel* berfungsi sebagai ruangan pengeringan biji kopi



**Gambar 17** *Pressure Vessel*

### 11. Digital Moisture Meter

*Digital Moisture Meter* digunakan untuk mengukur kadar air biji kopi



**Gambar 18** *Digital Moisture Meter*

### 12. Timbangan Digital

Timbangan digital digunakan untuk mengukur massa biji kopi.



**Gambar 19** Timbangan Digital

### 13. Toggle Switch On/Off

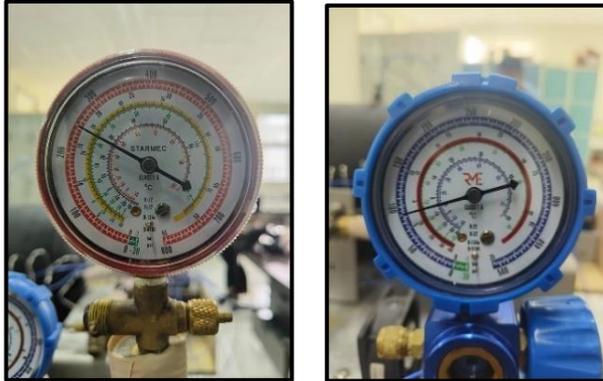
*Toggle Switch On/Off* digunakan untuk menyalakan dan mematikan komponen elektronik pada alat.



**Gambar 20** *Toggle Switch On/Off*

#### 14. Manometer/Pressure gauge

Manometer / pressure gauge digunakan untuk mengukur tekanan.



**Gambar 21** Manometer/Pressure Gauge

#### 15. Pompa Vakum

Pompa vakum berfungsi untuk mengurangi tekanan di dalam ruang pengeringan.



**Gambar 22** Vacuum Pump

#### 16. Pipa PVC dan Cap

Pipa PVC dan Cap berfungsi sebagai wadah kondensor.



**Gambar 23** Pipa PVC dan Cap

### 17. *Reservoir*

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



**Gambar 24** *Reservoir*

### 18. Pompa *Aquarium*

Pompa *Aquarium* berfungsi untuk memompa air dari *reservoir* ke kondesor.



**Gambar 25** Pompa *Aquarium*

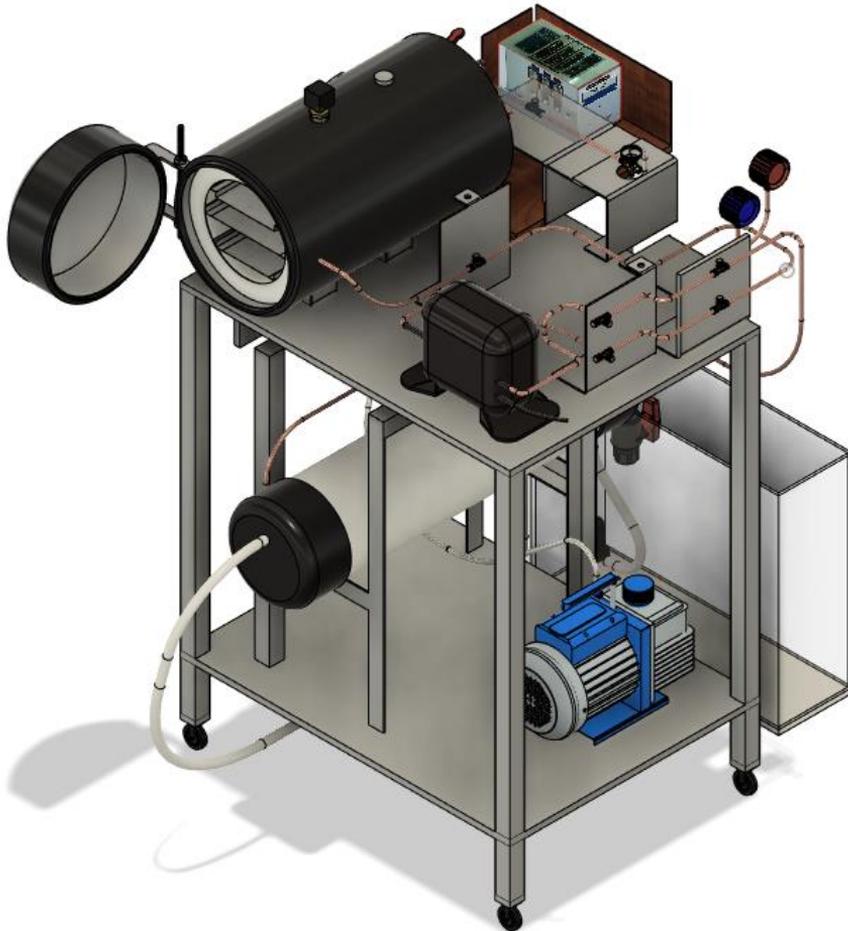
### 19. Selang

Selang digunakan untuk mengalirkan air dari *reservoir* ke kondesor



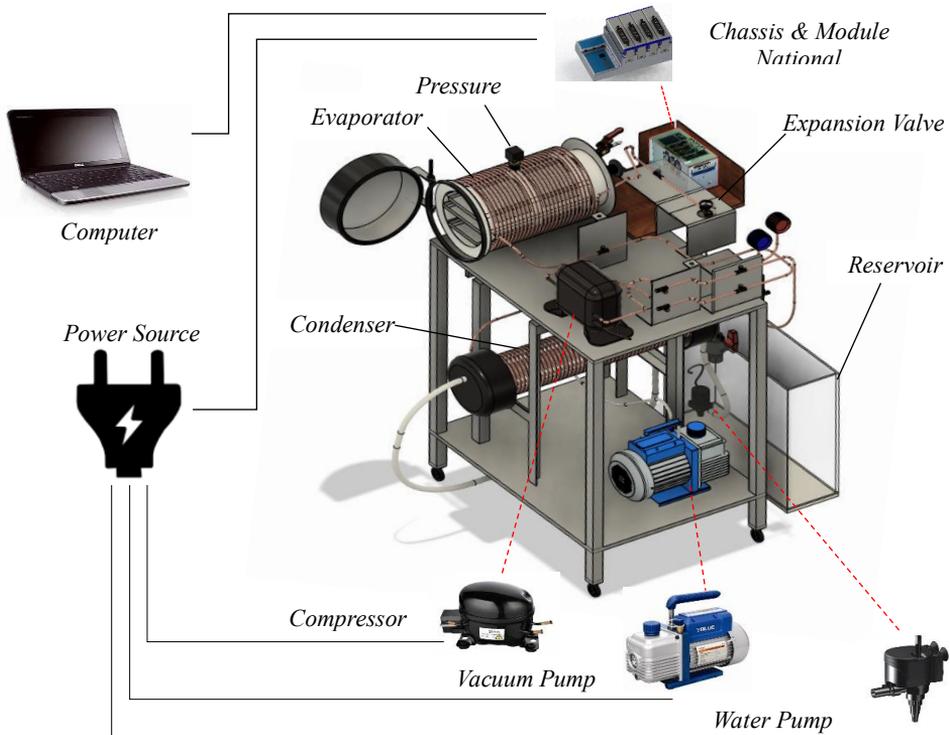
**Gambar 26** Selang

## 2.5 Desain Prototipe Simulasi *Data Center*



**Gambar 27** Rangkaian alat pengering beku vakum (*Vacuum Freeze Drying*)

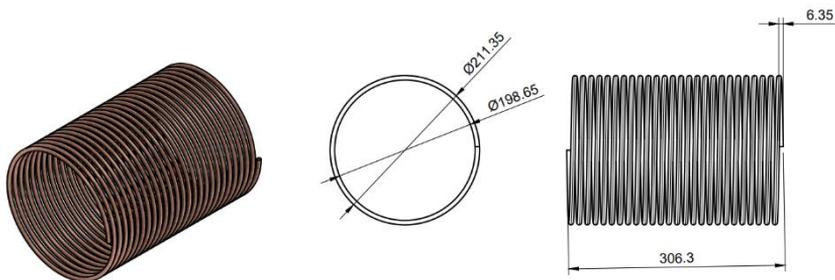
## 2.6 Skema Rancangan Instalasi Alat Pengering Beku Vakum



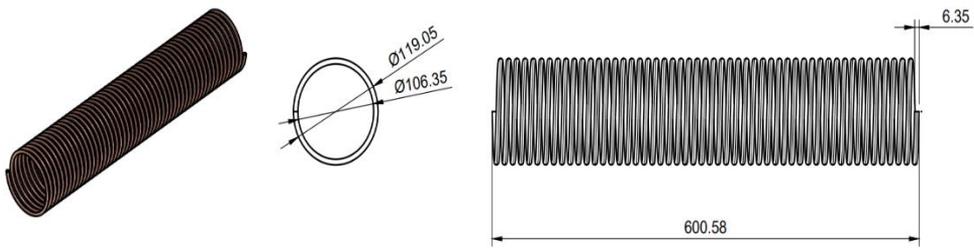
**Gambar 28** Skema rancangan instalasi alat pengering biji kopi

## 2.7 Karakteristik Alat

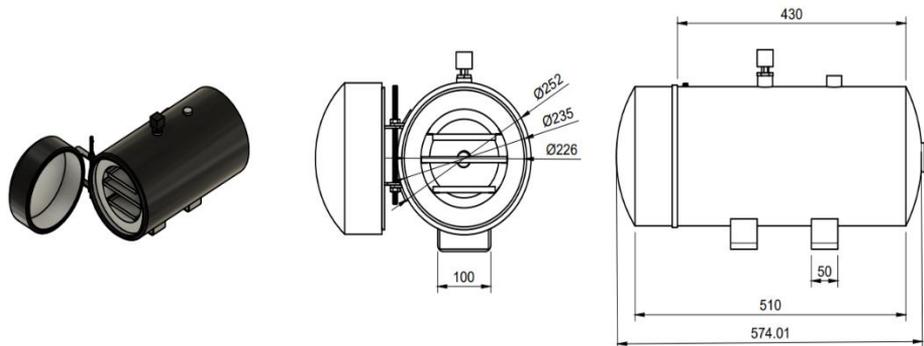
Adapun dimensi dari komponen-komponen dari alat pengering ini adalah sebagai berikut :



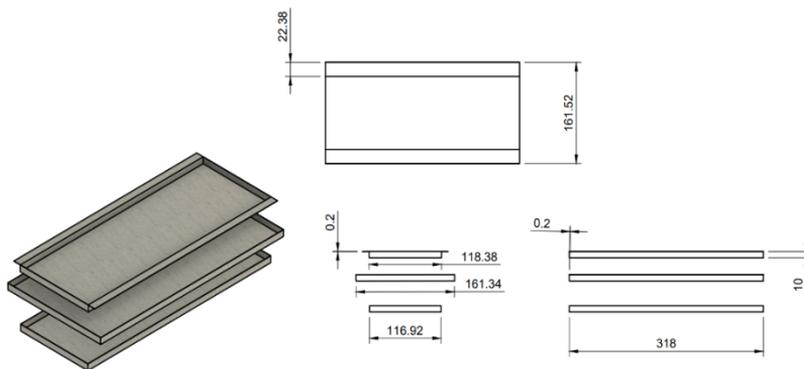
**Gambar 29** Evaporator



**Gambar 30** Kondensor

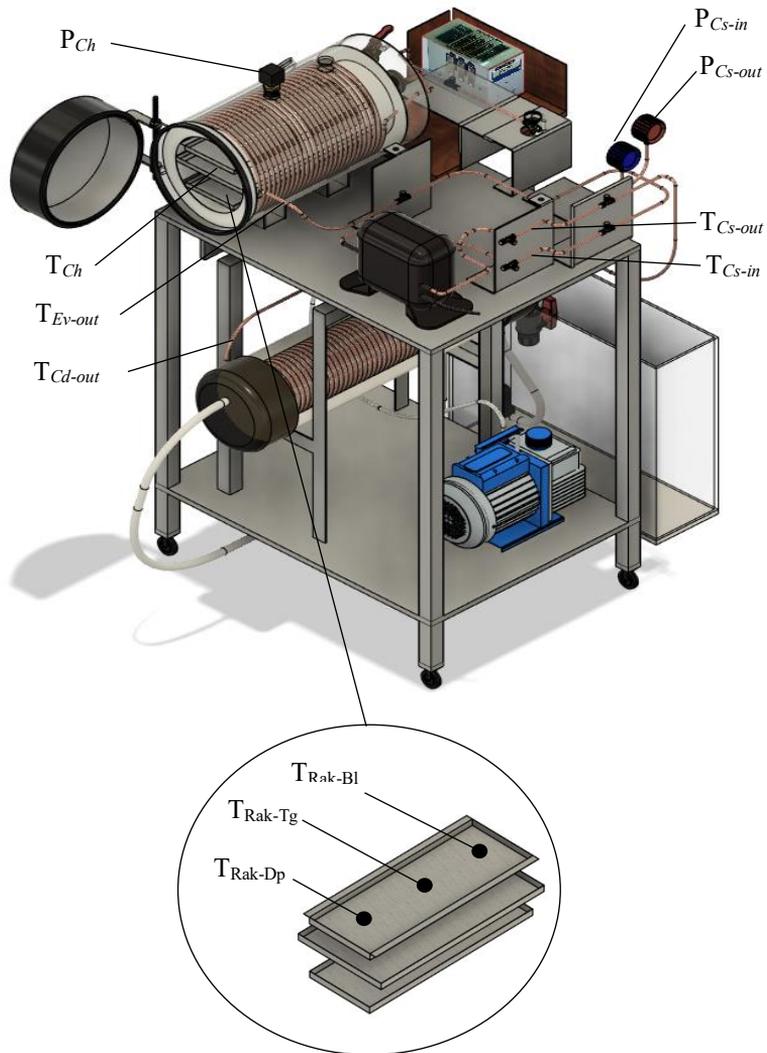


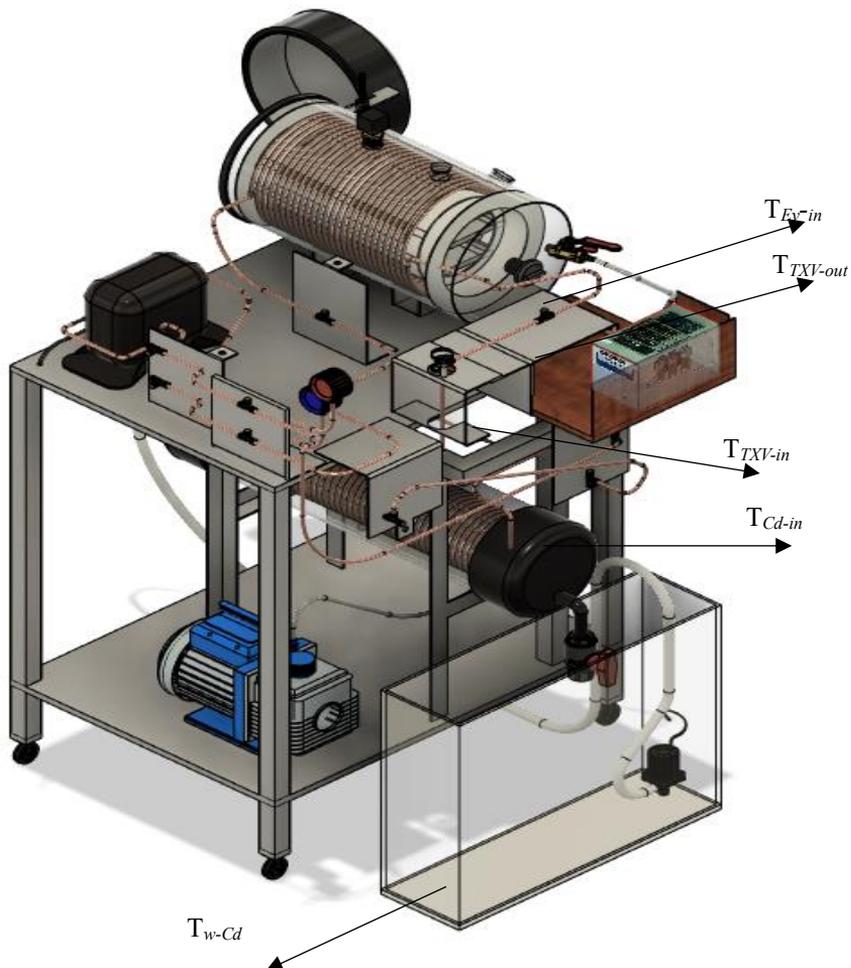
**Gambar 31** Ruang Pengeringan



**Gambar 32** Rak

## 2.8 Data yang dikumpulkan





**Gambar 33** Area pengambilan data temperatur dan tekanan

Data yang dikumpulkan dari penelitian ini ialah sebagai berikut:

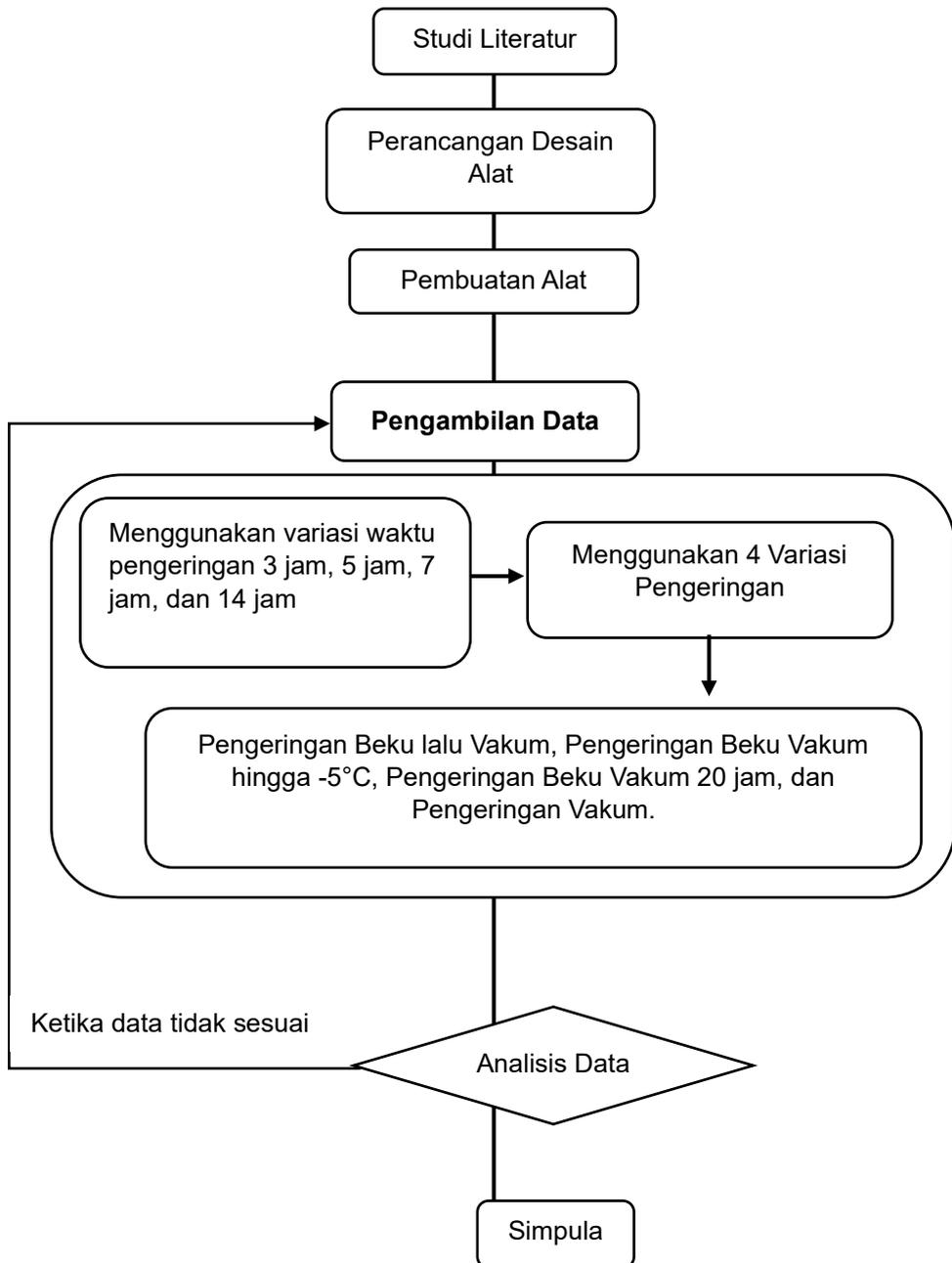
- a.  $T_{in,kompresor} (T_{Cs-in})$
- b.  $T_{out,kompresor} (T_{Cs-out})$
- c.  $T_{in,kondesor} (T_{Cd-in})$
- d.  $T_{out,kondesor} (T_{Cd-out})$
- e.  $T_{in, katup ekspansi} (T_{TXV-in})$
- f.  $T_{out, katup ekspansi} (T_{TXV-out})$
- g.  $T_{in, evaporator} (T_{Ev-in})$
- h.  $T_{out, evaporator} (T_{Ev-out})$
- i.  $T_{Chamber} (T_{Ch})$
- j.  $T_{water, kondesor} (T_{W-Cd})$
- k.  $T_{rak\ depan} (T_{Rak-Dp})$

- l.  $T_{rak}$  tengah ( $T_{Rak-Tg}$ )
- m.  $T_{rak}$  belakang ( $T_{Rak-BI}$ )
- n.  $P_{in}$ , kompresor ( $P_{CS-in}$ )
- o.  $P_{out}$ , kompresor ( $P_{CS-out}$ )
- p.  $P_{Chamber}$  ( $P_{Ch}$ )

## 2.9 Prosedur Penelitian

1. Pompa vakum dan kompresor terhubung dengan sumber listrik.
2. Biji kopi ditimbang sebanyak 500 gram, lalu dimasukkan ke dalam *Chamber* (Ruang Pengeringan).
3. Hidupkan sistem refrigerasi dan tunggu sampai temperatur evaporator kurang dari  $-20^{\circ}\text{C}$ , dan temperatur kondensor  $40^{\circ}\text{C}$  (perancangan).
4. Menunggu proses pembekuan berlangsung sampai temperatur di dalam *Chamber* mencapai  $-5^{\circ}\text{C}$ , lalu matikan kompresor, kemudian hidupkan pompa vakum.
5. Setelah pompa vakum dinyalakan, dilakukan pencatatan kadar air yang hilang pada pemvakuman selama 3 jam, 5 jam, 7 jam, dan 14 jam.

## 2.10 Alur Penelitian



**Gambar 34** Diagram alir penelitian