



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PERANCANGAN MESIN PENDINGIN BEKU VAKUM ALOE  
VERA DENGAN PEMANFAATAN PANAS BUANG  
KONDENSER**

**SKRIPSI**

**ROHMAN HIDAYAH  
07 06 19 88 14**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM PENDIDIKAN SARJANA EKSTENSI  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN**

**DEPOK  
DESEMBER 2009**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PERANCANGAN MESIN PENDINGIN BEKU VAKUM ALOE  
VERA DENGAN PEMANFAATAN PANAS BUANG  
KONDENSER**

**SKRIPSI**

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana

**ROHMAN HIDAYAH  
07 06 19 88 14**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM PENDIDIKAN SARJANA EKSTENSI  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN**

**DEPOK  
DESEMBER 2009**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tugas akhir dengan judul :

### **PERANCANGAN MESIN PENDINGIN BEKU VAKUM ALOE VERA DENGAN PEMANFAATAN PANAS BUANG KONDENSER**

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari tugas akhir yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya. Penulisan tugas akhir ini dibuat bersama **Victorio Fernando L.** dengan judul tugas akhir ” **Analisa Proses Pendinginan Beku Vakum Aloe Vera Dengan Pemanfaatan Panas Buang Kondenser.**” sehingga tidak terdapat kata-kata atau kalimat yang sama pada judul skripsi.

Nama : Rohman Hidayah  
NPM : 0706198814  
Tanda Tangan :  
Tanggal : 30 Desember 2009

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Rohman Hidayah  
NPM : 0706198814  
Program studi : Teknik Mesin  
Judul skripsi : Perancangan Mesin Pengereng Beku Vakum Aloe  
vera Dengan Pemanfaatan Panas Buang Kondenser

**Telah berhasil dipertahankan dihadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia**

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr.-Ing.Ir. Nasruddin, M.Eng ( )  
Penguji : Dr.Ir. M.Idrus Alhamid ( )  
Penguji : Dr. Belyamin, Msc ( )  
Penguji : Dr. Agus Pamitran, M.Eng ( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Desember 2009

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rohman Hidayah  
NPM : 0706198814  
Program Studi : Teknik Mesin  
Departemen : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**PERANCANGAN MESIN PENGERING BEKU VAKUM  
ALOE VERA DENGAN PEMANFAATAN PANAS BUANG KONDENSER**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 30 Desember 2009

Yang menyatakan

( Rohman Hidayah )

## KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena karunia rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Penulisan Tugas Akhir ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan Tugas Akhir ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr.-Ing.Ir. Nasruddin, M.Eng , selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) orang tua dan keluarga tercinta saya yang telah memberikan bantuan dukungan moral dan material; dan
- (3) sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Allah S.W.T. berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 30 Desember 2009

Penulis

## ABSTRAK

Nama : Rohman Hidayah  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul : Perancangan Mesin Pengering Beku Vakum Aloe Vera Dengan Pemanfaatan Panas Buang Kondenser.

Pengeringan beku diakui sebagai metode pengeringan terbaik tetapi sangat intensif energi yang disebabkan dua hal yaitu proses pembekuan pada tekanan yang berbeda dengan pengeringan dan perambatan panas yang lambat selama sublimasi. Untuk mengatasi hal ini maka diusulkan penyelesaian dengan pemanfaatan pembekuan vakum dan pemanasan dari bawah dengan memanfaatkan panas terbuang dari kondenser. Dengan demikian diharapkan pemakaian energi pada proses pengeringan beku berkurang.

Proses pembekuan dalam hal ini dihasilkan dari perubahan tekanan dalam suatu tabung vakum yang mengacu pada diagram fase air dimana seiring dengan penurunan tekanan maka akan terjadi penurunan temperatur dalam suatu ruang sehingga jika suatu produk yang dijadikan sebagai eksperimen diletakkan didalamnya maka akan terjadi proses pembekuan. Seiring dengan pembekuan produk kemudian dilanjutkan dengan proses pemanasan dengan temperatur ruang (sekitar 27°C) untuk mencapai titik sublimasi sehingga terjadi proses pengeringan. Perancangan kali akan terdiri dari dua hal yang diharapkan saling mendukung yakni sistem mekanikal yang akan mengkondisikan sistem dalam keadaan vakum dengan tekanan yang direncanakan sebesar 0,1 mbar sehingga diperlukan perhitungan kekuatan material serta sistem refrigerasi yang berfungsi untuk memanaskan produk dan menyediakan permukaan yang bertemperatur rendah agar terjadi penangkapan uap air yang dihasilkan proses sublimasi selama pengeringan produk. Untuk itu diperlukan refrigeran yang mampu menghasilkan temperatur cukup rendah sekaligus panas buang kondenser yang cukup untuk dimanfaatkan sebagai pemanas sehingga diharapkan akan mencapai sistem pengering beku yang optimal.

Perancangan alat pengering beku menggunakan tabung silinder sebagai ruang vakum untuk mengeringkan produk dan ruang silinder sebagai tempat evaporator yang akan menangkap uap. Komponen tersebut dirancang dengan perletakan yang disesuaikan dengan penggunaannya dilaboratorium sebagai alat dalam proses pengujian yang menggunakan spesimen aloe vera sehingga menghasilkan data awal proses pengeringan beku yang akan dijadikan sebagai masukan dalam penelitian.

Kata kunci : Mesin pengering beku vakum, aloe vera, panas buang, kondenser

## ABSTRACT

Name : Rohman Hidayah  
Study Program : Mechanical Engineering  
Tittle : Vacuum Freeze Drying Machine Design For Aloe Vera Using Waste Heat of Condenser

Freeze drying is recognized as the best drying methods but is very energy intensive due to two things namely the freezing process at different pressure with heat drying and slow propagation during sublimation. To overcome this problem, the proposed settlement with the use of vacuum freezing and heating from below by utilizing waste heat from the condenser. Thus the energy consumption is expected to decrease among freeze drying process.

The freezing process in this case resulting from change in pressure in vacuum chamber, which refer to the water phase diagram, which along with the decrease in pressure will decrease the temperature in the room so that is a product is used as axperiment placed therein will be frozen. Along with the freezing of the product followed by the heating process (at room temperature around 27°C) to reach the point that there is a process of sublimation drying. The design will consist of two things which are expected to support each other, mechanical systems that will condition the system in a vacuum with a pressure of 0,1 mbar planned so that the necessary to calculate material strength needed and refrigeration system that serves to heat the surface of the product and also provides a low temperature to an arrest resulting water vapor during the drying process of sublimation product. This requires the refrigerant is able to produce sufficiently low temperature in evaporator to trap vapor resulted and sufficient temperature in condenser to be used as heater which is expected to reach the freeze dryer system optimum.

The design of freeze dryers is use a cylindrical tube as a vacuum to dry the product which is plected that will grasp evaporator steam. Components are designed appropriate in abolatory which adapted to use as tool in testing process that uses aloe vera specimen to result initial data freeze drying process that serve as input in research.

Keyword: Vacuum freeze drying machine, aloe vera, waste heat, condencer



## DAFTAR ISI

JUDUL .....	i
PERNYATAAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN .....	iv
UCAPAN TERIMAKASIH .....	v
ABSTRAK .....	vi
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR GRAFIK .....	xv
BAB I. PENDAHULUAN .....	1
I.1. Latar Belakang .....	1
I.2. Tujuan Penulisan .....	2
I.3. Batasan Masalah .....	3
I.4. Metode Penulisan .....	3
I.5. Sistematika Penulisan .....	4
BAB II. LANDASAN TEORI .....	6
II.1. Pengerinan Beku Vakum .....	6
II.1.1. Proses Pembekuan .....	7
II.1.1.1. Jumlah Panas, Konduktivitas Panas, Perpindahan Kalor dan Laju Pendinginan .....	8
II.1.2. Proses Pengerinan .....	10
II.1.2.1. Pengerinan Dengan Sublimasi .....	11
II.1.2.2. Pengerinan Dengan Desorpsi .....	13
II.1.2.3. Pengukuran Temperatur dan Tekanan .....	15
II.1.2.4. Transportasi Uap Air Selama Pengerinan .....	16
II.1.3. Komponen Sistem Pengerinan .....	18
II.1.3.1. Ruang Pengerin .....	18
II.1.3.2. Kondensor .....	19
II.1.3.3. Saluran Penghubung .....	21
II.2. Perancangan Mesin Pengerin .....	22

II.2.1. Karakteristik Material	23
II.2.2. Bejana Vakum	23
II.2.3. Tegangan Kompresi	26
II.2.4. Tegangan Tarik	26
II.2.5. Tegangan Geser	27
II.2.6. Tegangan Bending	28
II.3. Sistem Refrigerasi	30
II.3.1. SikLus Ideal Sistem Refrigerasi	30
II.3.2. Perhitungan Sistem Refrigerasi	32
II.3.3. Komponen Sistem Refrigerasi	33
II.3.4. Sistem Refrigerasi Serbaguna	46
II.4. Proses Perpindahan kalor	47
II.4.1. Radiasi Dalam Ruang Kurung	47
II.4.2. Perpindahan Kalor Dalam Sistem Radial	48
II.5. Aloe Vera	48
II.5.1. Kandungan Mineral	49
II.5.2. Manfaat	49
<b>BAB III. PERANCANGAN ALAT</b>	<b>50</b>
III.1. Parameter perancangan	50
III.1.1. Proses pengeringan beku	50
III.1.2. Produk spesimen	52
III.2. Proses Perancangan sistem mekanikal	52
III.2.1. Diagram alir proses perancangan	52
III.2.2. Skematik rangkaian mekanikal sistem pengering	53
III.2.3. Perhitungan Kekuatan	53
III.2.3.1. Gambar rancangan mesin pengering	54
III.2.3.2. Perhitungan tabung vakum	55
III.2.3.3. Perancangan rangkaian penumpu	58
III.3. Perancangan Sistem Refrigerasi	78
III.3.1. Diagram Skematik Proses Refrigerasi	78
III.3.2 Perhitungan Sistem Refrigerasi	79
III.3.2.1. Sistem Pendingin	79

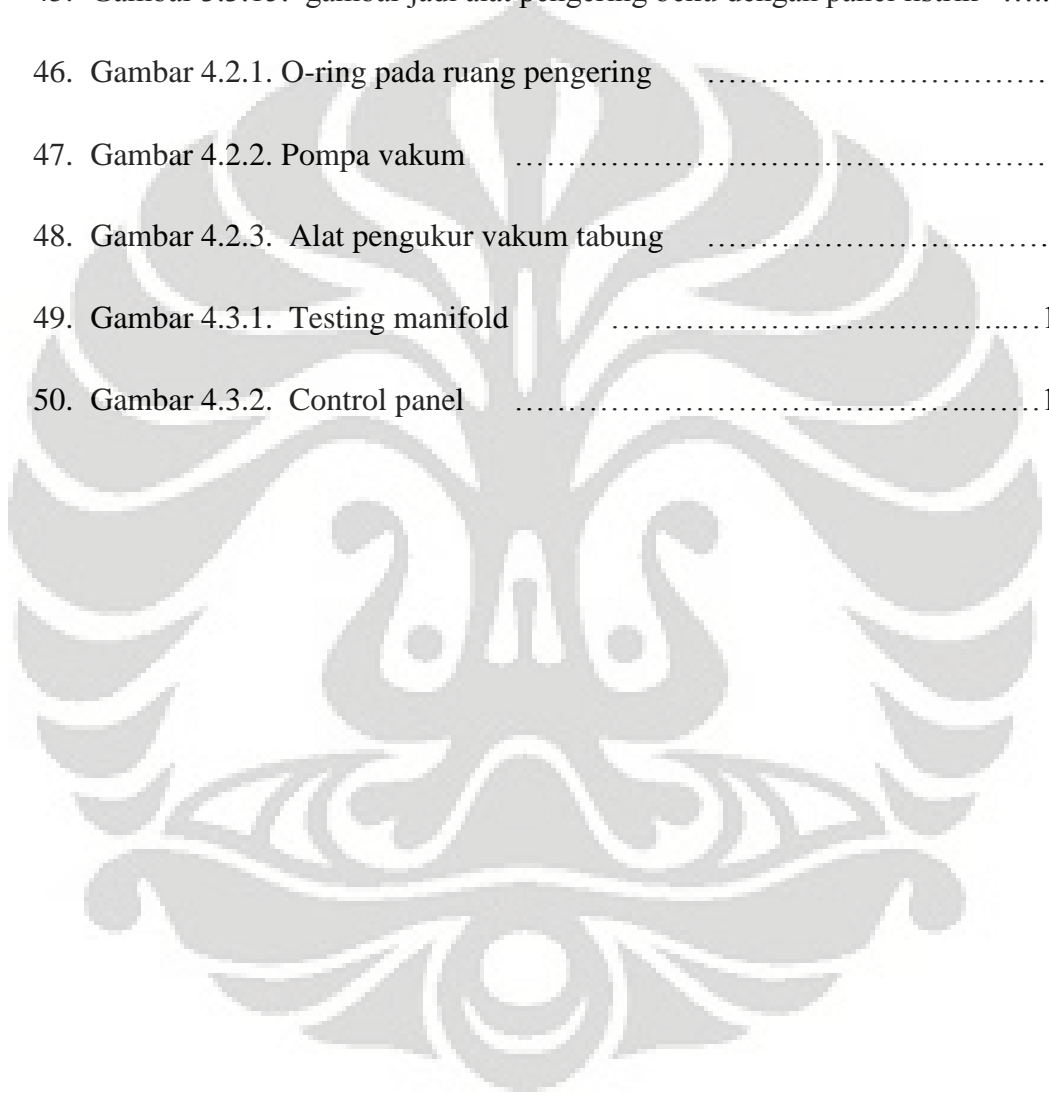
III.3.2.2. Sistem Pemanas	82
III.3.3. Sistem Refrigerasi Aktual	84
III.3.4. Proses pembuatan	88
III.3.4.1. Tabung vakum	88
III.3.4.2. Rancangan penumpu	91
III.3.4.3. Perakitan sistem refrigerasi	92
BAB IV. PENGUJIAN ALAT	94
IV.1. Prosedur Pengujian	94
IV.2. Pengujian Vakum	95
IV.3. Pengujian Sistem Pendingin	99
IV.4. Unjuk Kerja Sistem Pengering Beku	101
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	105
V.1. KESIMPULAN	105
V.1.1. Konstruksi Pengering	105
V.1.2. Sistem Refrigerasi	105
V.2. SARAN	105
DAFTAR REFERENSI	108
LAMPIRAN 1	109
LAMPIRAN 2	110
LAMPIRAN 3	111
LAMPIRAN 4	112
LAMPIRAN 5	113
LAMPIRAN 6	114
LAMPIRAN 7	115

## DAFTAR GAMBAR

1. Gambar 2.1.1. Diagram fase air .....	6
2. Gambar 2.1.2. Proses <i>Main Drying (MD)</i> .....	13
3. Gambar 2.1.3. Laju pengeringan desorpsi terhadap waktu .....	15
4. Gambar 2.1.4. Skematik aliran uap air dalam proses pengeringan beku ....	17
5. Gambar 2.1.5. Jenis ruang pengering beku .....	19
6. Gambar 2.1.6. Jenis es dalam kondensor .....	20
7. Gambar 2.1.7. Jenis saluran penghubung antara ruang pengering dengan kondensor .....	21
8. Gambar 2.1.8. Densitas aliran uap air terhadap rasio $l/d$ .....	22
9. Gambar 2.2.1. Diagram tegangan-regangan material .....	23
10. Gambar 2.2.2. gaya kompresi pada dinding tabung .....	25
11. Gambar 2.2.3. Tegangan kompresi .....	26
12. Gambar 2.2.4. Tegangan tarik .....	27
13. Gambar 2.2.5. Tegangan geser .....	27
14. Gambar 2.2.6. Bending .....	28
15. Gambar 2.3.1. Siklus sistem pendingin .....	31
16. Gambar 2.3.2.1. Skematik AEV .....	38
17. Gambar 2.3.2.2. Skematik <i>TEVi</i> .....	39
18. Gambar 2.3.2.3. Skematik AEV dengan <i>external equalizer</i> .....	40
19. Gambar 2.3.2.4. Skematik <i>EEV</i> .....	41
20. Gambar 2.3.3.1. Contoh sistem refrigerasi sebagauna .....	47

21. Gambar 2.4.1. aliran kalor satu dimensi melalui silinder bolong dengan analogi listrik .....	48
22. Gambar 3.1.1. Diagram proses pengeringan beku aloe vera .....	51
23. Gambar 3.1.2. Kondisi produk beku dalam ruang pengering .....	51
24. Gambar 3.2.1. Diagram alir perancangan alat .....	52
25. Gambar 3.2.2. Skematik komponen utama pengering beku (gambar simetris) .....	53
26. Gambar 3.2.3. Desain alat .....	54
27. Gambar 3.2.4. Reaksi gaya-gaya pada support atas .....	59
28. Gambar 3.2.5. Grafik gaya dan momen dalam batang I-J .....	66
29. Gambar 3.2.6. Grafik gaya dan momen dalam batang A-D .....	69
30. Gambar 3.2.7. Skematik dan letak titik <i>centroid</i> batang .....	71
31. Gambar 3.2.8. Baut pada kaki penumpu .....	76
32. Gambar 3.3.1. Skematik diagram dan P-h diagram sistem pendingin .....	78
33. Gambar 3.3.2. Siklus refrigerasi ideal dengan superheat Coolpack .....	80
34. Gambar 3.3.3. Kompresor sistem pendingin .....	84
35. Gambar 3.3.5. Pipa pemanas .....	85
36. Gambar 3.3.6. Tabung ruang perangkat uap .....	86
37. Gambar 3.3.7. Bahan tabung vakum 24” .....	88
38. Gambar 3.3.8. Tabung pengering vakum dan perangkat uap dengan <i>flange</i> yang siap dirakit .....	89
39. Gambar 3.3.9. Proses pemasangan pemanas .....	89
40. Gambar 3.3.10. Rancangan tempat produk specimen .....	90

41. Gambar 3.3.11. Evaporator perangkat uap	.....91
42. Gambar 3.3.12. Penampang evaporator dalam ruang perangkat uap	.....91
43. Gambar 3.3.13. Pemasangan tabung vakum pada penumpu	.....92
44. Gambar 3.3.14. <i>Layout</i> komponen utama sistem pendingin	.....92
45. Gambar 3.3.15. gambar jadi alat pengering beku dengan panel listrik	.....93
46. Gambar 4.2.1. O-ring pada ruang pengering	.....96
47. Gambar 4.2.2. Pompa vakum	.....96
48. Gambar 4.2.3. Alat pengukur vakum tabung	.....98
49. Gambar 4.3.1. Testing manifold	.....100
50. Gambar 4.3.2. Control panel	.....101



## DAFTAR GRAFIK

1. Grafik 4.4.1. Temperatur ruang pengering dan evaporator .....103
2. Grafik 4.4.2. Tekanan tabung vakum .....103
3. Grafik 4.4.3. Tekanan ruang pengering setelah 1 jam penvakuman .....104



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### I.1. Latar Belakang

Lidah buaya merupakan tanaman yang banyak mengandung manfaat bagi kesehatan manusia jika dilakukan pengolahan yang tidak menghilangkan kandungan mineral yang terkandung, hanya saja masih terdapat kendala dalam pengolahan tersebut dalam menghasilkan produk berupa serbuk aloe vera melalui proses yang belum bisa dilakukan di Indonesia sehingga Kalimantan Barat sebagai penghasil lidah buaya harus mengekspornya ke luar negeri untuk kemudian mengimpor serbuk lidah buaya yang dihasilkan dengan proses pengeringan beku. Untuk itu diperlukan suatu penelitian yang dapat menghasilkan alat pengering beku yang dapat bekerja secara optimal dan efisien sehingga potensi pemanfaatan lidah buaya didalam negeri dapat dimaksimalkan tanpa perlu melakukan impor serbuk lidah buaya dengan harga yang mahal.

Pengeringan beku yang merupakan proses pengeringan terbaik, mempunyai kelemahan berupa laju pengeringan yang lambat (Liapis dan Bruttini,1995; Martinez *et al.*,2001; Horadczek dan Viernstein,2004). Keunggulan produk hasil pengeringan beku antara lain adalah struktur yang tidak mengkerut sehingga memungkinkan rehidrasi yang sangat cepat, retensi flavor yang tinggi karena pengeringan berlangsung pada suhu rendah, serta daya hidup dan rekonstitusi sel-sel hidup pada produk kering-beku tetap yang tinggi.

Pengeringan beku merupakan metode yang tepat untuk mendapatkan serbuk aloe vera tetapi sangat intensif energi yang disebabkan dua hal yaitu proses pemvakuman dan perambatan panas yang lambat selama sublimasi. Untuk mengatasi hal ini maka diusulkan penyelesaian dengan pemanfaatan pembekuan vakum dan pemanasan dari bawah dengan memanfaatkan panas terbuang dari kondenser sehingga pemakaian energi menjadi efisien.

Tahapan yang dilakukan dalam pengeringan beku adalah pembekuan, penurunan tekanan dan pengeringan/sublimasi. Pembekuan dapat dilakukan



dengan metode pembekuan menggunakan refrigeran, bahan cryogenic, atau cara lain seperti pembekuan vakum. Dengan metode pembekuan vakum, pembekuan dan penurunan tekanan dilakukan secara bersamaan. Penurunan tekanan dilakukan terus sampai sampel membeku (tekanan 65 Pa). Dengan demikian jika sebelumnya digunakan energi pembekuan dan energi pemvakuman secara terpisah, ketika diterapkan pembekuan vakum pemakaian energinya hanyalah energi pemvakuman. Dengan cara ini diharapkan pemakaian energi dapat dikurangi.

Perambatan panas selama sublimasi terjadi secara lambat disebabkan panas dirambatkan melalui lapisan kering yang koefisien konduktivitasnya rendah. Dengan pemanasan dari bawah, perambatan panas dilakukan melalui lapisan beku yang nilai konduktivitasnya jauh lebih tinggi. Selain itu, panas untuk sublimasi yang sebelumnya diberikan dari pemanas, pada penelitian ini akan diberikan dari panas terbuang kondenser.

Kedua hal ini menjadi subyek penelitian dengan sasaran khusus merancang bangun prototipe mesin pengering beku dengan sistem pembekuan vakum dan pemanasan dari bawah dengan pemanfaatan panas terbuang kondenser.

## **I.2. Tujuan Penulisan**

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah:

1. Merancang bangun prototipe mesin pengering beku dengan penerapan pembekuan lempeng sentuh, pembekuan vakum, dan pemanfaatan panas buang kondenser untuk meningkatkan efisiensi.
2. Melakukan uji coba alat pengering beku yang telah dirancang sebagai masukan awal dalam penelitian proses pengeringan beku.
3. Memenuhi kebutuhan dalam negeri dalam mengolah lidah buaya untuk menghasilkan produk kering yang bermanfaat.

### I.3. Batasan Masalah

Pembahasan mengenai perancangan mesin pengering beku vakum dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Membahas mengenai perancangan alat pengering beku dari langkah awal dalam segi desain dan *manufacturing* komponen tersebut.
2. Membahas tentang kondisi komponen mesin pengering beku dari segi visual dan data hasil pengujian.

### I.4. Metode Penulisan

Metode yang dilakukan dalam penulisan tugas akhir ini adalah dengan melakukan studi literatur, perancangan alat dan melakukan percobaan.

1. Studi literatur

Literatur yang digunakan sebagai acuan dalam tugas akhir ini adalah buku, jurnal, disertasi dan melalui *internet*. Literatur-literatur tersebut menjadi acuan dalam proses perancangan dan pengujian alat serta dasar dalam melakukan analisa dan perhitungan data yang akan dilakukan.

2. Desain sistem baru

Langkah yang dilakukan berupa rancang bangun mesin pengering beku untuk proses pengeringan aloe vera yang efisien. Langkah yang dilakukan adalah merancang *vacuum chamber* sebagai tempat proses pengeringan, *evaporator* untuk menyerap uap air, sistem pendingin dan rangkaian *thermocouple* serta *pressure transmitter*.

3. Pengujian alat

Pengujian dilakukan untuk mendapatkan data berupa tekanan, temperatur dan hubungannya dengan proses pengeringan pada aloe vera. Hasil pendataan yang didapat kemudian dianalisa sedemikian rupa sehingga dapat ditarik suatu kesimpulan.

## **I.5. Sistematika Penulisan**

Adapun sistematika penulisan yang dibuat pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

### **BAB 1 PENDAHULUAN**

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang dan tujuan penulisan, pembatasan masalah, metode penulisan dan sistematika penulisan.

### **BAB 2 LANDASAN TEORI**

Pada bab ini disampaikan teori-teori yang menjelaskan tentang proses pengeringan beku vakum, perancangan bejana vakum, evaporator dan sistem pendingin yang menjadi dasar dalam perancangan dan pengujian alat, serta dasar dalam melakukan analisa dan perhitungan data.

### **BAB 3 PERANCANGAN ALAT**

Bab ini membahas mengenai perancangan bejana pengering, sistem refrigerasi dan pemipanya beserta proses pembuatannya hingga bisa bekerja untuk proses pengeringan beku vakum aloe vera sehingga menghasilkan data sebagai bahan penelitian awal.

### **BAB 4 DATA DAN ANALISA**

Bab ini membahas mengenai kondisi alat pada saat melakukan proses pengeringan beku sebagai masukan awal hasil perancangan.

### **BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN**

Pada bab ini mengutarakan kesimpulan dan saran yang didapat setelah melakukan perancangan dan uji coba mesin.

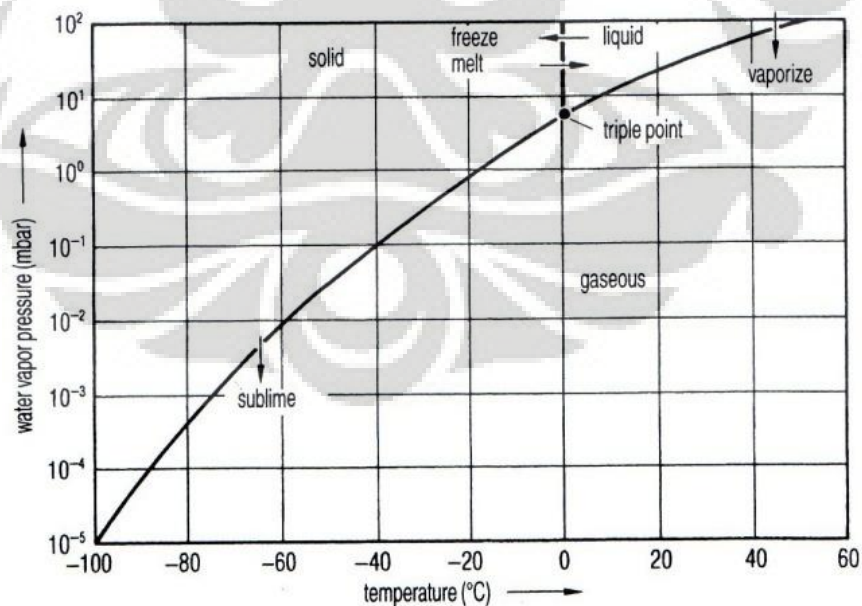
## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### II.1. Pengerinan Beku Vakum

Pengerinan beku atau *lyophilization* merupakan proses dimana suatu larutan dibekukan terlebih dahulu pada temperatur rendah untuk kemudian temperatur dinaikkan hingga mengalami proses sublimasi secara langsung dari padat menjadi uap pada lapisan permukaan produk.

Proses pengerinan beku kebanyakan mengacu pada diagram fase air seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1.1. dimana diagram air dan lokasi dimana kemungkinan terjadi perubahan fase dari padat ke uap. Proses ini relatif jelas terjadi pada air murni. Jika larutan terdiri dari beberapa komponen pelarut murni maka diperlukan penyederhanaan grafik sehingga proses menjadi lebih mudah dipahami. Kompleksitas diatas umumnya terjadi pada bahan-bahan *biological*.



Gambar 2.1.1. Diagram fase air [1]

Tujuan dari pengeringan beku adalah untuk menghasilkan produk kering yang mempunyai stabilitas yang baik dan tidak berubah setelah dicampur dengan air kembali. Hal ini juga sangat dipengaruhi oleh perlakuan akhir setelah proses yakni pengemasan serta kondisi penyimpanan. Adapun kelebihan proses pengeringan beku adalah sebagai berikut:

- Dengan proses pada temperatur rendah dapat mengurangi degradasi kandungan mineral pada bahan yang mempunyai sensitifitas panas tinggi.
- Dapat dilakukan penakaran yang akurat pada produk yang akan dikeringkan.
- Kandungan air dari produk akhir dapat dikendalikan selama proses berlangsung.
- Mempunyai penampilan yang bagus pada produk kering .
- Produk kering mempunyai *specific area* yang besar sehingga dapat mudah dilarutkan kembali dengan air.

Adapun kekurangan proses pengeringan beku adalah sebagai berikut:

- Biaya yang mahal pada pengadaan alat, pengoperasian serta perawatan.
- Kompleksitas proses serta peralatan membutuhkan tenaga ahli yang dapat saling bekerjasama dengan baik.

#### II.1.1. Proses Pembekuan

Untuk membekukan suatu bahan produk perlu didinginkan sampai temperatur dimana bagian air dan padatan dari bahan terkristalisasi secara keseluruhan atau dengan kata lain pembekuan dimana bagian air yang terkristalisasi dan padatan saling mengikat satu sama lain untuk membentuk satu kesatuan padat. Dalam proses pembekuan, kristal es akan terbentuk untuk pertama kali yang kemudian disusul dengan larutan lain secara berlanjut yang bisa bervariasi tergantung harga pH. Pada sebagian besar bahan dapat ditentukan titik temperatur *eutectic*-nya namun banyak juga yang tidak memiliki titik tersebut. Adapun proses kristalisasi dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain: laju pendinginan, konsentrasi struktur bahan, temperatur akhir pendinginan, waktu yang diperlukan untuk pendinginan hingga terjadi pembekuan. Pada beberapa bahan produk tidak terjadi proses

kristalisasi dan produk tetap dalam keadaan semula atau dalam kondisi *glass-like phase*.

### II.1.2. Jumlah Panas, Konduktivitas Panas, Perpindahan Kalor dan Laju Pendinginan

Untuk air murni, jika temperatur awal dan akhir diketahui panas lebur yang harus dibuang untuk proses pembekuan ( $Q_{tot}$ ) dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Q_{tot} = c_w (T_1 - T_0) + Q_e + c_e (T_0 - T_2) \text{ (kJ/Kg)} \dots\dots\dots 2.1.1$$

(ref. [1] hal 3)

Dimana:

$c_w$  = kapasitas panas spesifik air

$Q_e$  = panas lebur es

$c_e$  = kapasitas panas spesifik es

$T_0$  = temperatur beku es

$T_1$  = temperatur awal air

$T_2$  = temperatur akhir es

Sebagai referensi, temperatur  $c_w$  terletak diantara +20 sampai 0 °C dan untuk  $c_e$  antara 0 sampai -50 °C digunakan sebagai temperatur rata-rata acuan.

Untuk larutan maupun campuran maka kandungan bahan harus diketahui terlebih dahulu. Dalam hal ini panas lebur yang harus dibuang selama proses pembekuan dapat didekati dengan persamaan sebagai berikut:

$$Q_{tot} = [(c_w x_w + c_f x_f) + (T_1 - T_0)] + x_w Q_e + [(c_e x_w + c_f x_w) (T_0 - T_2)] \dots\dots\dots 2.1.2$$

(ref.[1] hal 3)

Dimana:

$x_w$  = Bagian air pada saat temperatur diatas 0 °C

$c_f$  = Panas spesifik padatan bahan, contoh:

untuk produk daging binatang  $\approx 1,47 \text{ kJ/Kg } ^\circ\text{C}$

untuk produk tumbu-tumbuhan  $\approx 1,34 \text{ kJ/Kg } ^\circ\text{C}$

untuk beberapa bahan padatan:

karbohidrat  $\approx 1,42 \text{ kJ/Kg } ^\circ\text{C}$

protein  $\approx 1,55 \text{ kJ/Kg } ^\circ\text{C}$

lemak  $\approx 1,70 \text{ kJ/Kg } ^\circ\text{C}$

garam  $\approx 0,80 \text{ kJ/Kg } ^\circ\text{C}$

$x_f$  = Bagian padatan

$x_w$  = Bagian es yaitu bagian yang membeku saat temperatur mencapai  $T_2$

Jika terdapat *unfreezable water* (UFW) yakni tidak semua air dapat membeku pada temperatur  $T_2$  maka harus ditambahkan suatu formula yang merefleksikan proses pendinginan pada bagian yang belum membeku.

Adapun dalam perhitungan, perpindahan energi dari produk beku ke media pendingin sekitar dapat dihitung melalui beberapa tahapan penyederhanaan (asumsi) sebagaimana berikut:

1. Dimensi produk berbentuk lapisan tipis dengan perbandingan luas terhadap ketebalan yang besar
2. Produk didinginkan dari satu sisi permukaan
3. Aliran energi tegak lurus terhadap luasan permukaan yang mengalami ekspansi akibat proses pengeringan

Waktu proses pembekuan ( $t_e$ ) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$t_e = \Delta J / \Delta T \rho_g (d^2 / 2\lambda_g + d / K_{su}) \dots\dots\dots 2.1.3$$

(ref. [1] hal 4)

$$t_e = \Delta J / \Delta T \rho_g (w + u) \dots\dots\dots 2.1.4$$

(ref. [1] hal 4)

dimana:

$t_e$  = waktu pembekuan

$\Delta J$  = perbedaan enthalpi antara proses pembekuan awal dengan temperatur akhir

$\Delta T$  = perbedaan temperatur antara titik beku dengan media pendingin



- d = ketebalan produk diukur sejajar dengan arah laju perpindahan kalor
- $\rho_g$  = berat jenis produk yang telah membeku
- $\lambda_g$  = konduktivitas termal produk yang telah membeku
- $K_{su}$  = koefisien perpindahan kalor permukaan antara media pendingin dengan daerah pembekuan

### II.1.2. Proses Pengeringan

Proses pengeringan pada umumnya merupakan proses yang meliputi dua mekanisme: (i) energi dialirkan untuk mengubah es menjadi uap air (dengan temperatur diantara -21 sampai -30 °C dibutuhkan energi sekitar 2805 kJ/Kg) dan (ii) proses perpindahan uap air dari permukaan sublimasi melalui bagian produk yang telah mengalami proses pengeringan menuju ke ruang pengering untuk kemudian mengalir kedalam ruang kondensasi atau sistem penyerapan uap air. Gambar 2.1.2 menunjukkan proses pengeringan utama (*MD = Main Drying*) yang diamati dengan *cryomicroscope* dimana 10% cairan encer dari *hydroxyethyl starch* (HES) secara terarah dibekukan. *dendrite* es dikelilingi konsentrasi padatan yang digambarkan dengan garis lebih tebal setelah es mengalami proses sublimasi. Dengan tidak adanya proses pembekuan yang optimal, maka kecepatan laju proses sublimasi menjadi tidak merata.

Setelah es mengalami proses sublimasi, maka langkah selanjutnya adalah penyerapan air dari bagian padat produk yang disebut pengeringan lanjutan (*Secondary Drying*). Siklus dalam proses ini berbeda dengan yang terjadi pada pengeringan utama (*Main Drying*). Dalam proses pengeringan lanjutan ini transport energi tidak memegang peranan yang penting karena kandungan air kurang dari 10% dari padatan. Kendatipun demikian hal itu membutuhkan perhatian tersendiri karena proses ini berhubungan dengan konsumsi waktu dari proses yang bisa memakan waktu seperti pada proses pengeringan utama. Laju pengeringan (berdasarkan proposal RUUI) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Q_{sb} = m_{sb} H_s + m_a C_p (T_a - T_{sb}) \dots\dots\dots 2.1.5$$

(ref .[9] hal 6)



Dimana:

$m_{sb}$  = massa sublimasi

$m_a$  = massa akhir

$H_s$  = enthalpy sublimasi

$T_{sb}$  = temperatur sublimasi

$T_a$  = temperatur ruangan

#### II.1.2.1. Pengeringan Dengan Sublimasi (*Main Drying*)

Jumlah energi yang diperlukan dalam proses sublimasi tergantung pada temperatur sublimasi itu sendiri, tetapi pada temperatur antara -10 hingga -40°C variasi energi kurang dari 2%. Lebih dari itu, sebagian besar energi dipergunakan untuk memanaskan uap air ketika melewati bagian produk yang telah kering terlebih dahulu ataupun bagian produk yang bersentuhan dengan wadah penampung produk. Panas spesifik uap air berkisar 1,67 kJ/Kg dan pertambahan temperatur maksimum mencapai +20 atau +40°C. Namun energi panas tersebut dapat diabaikan jika dibandingkan dengan energi sublimasi yang diperlukan yaitu untuk memanaskan uap dari -30 ke +30°C yang memerlukan ~100 kJ/Kg atau mencapai ~3,5% dari proses sublimasi secara keseluruhan.

Energi sublimasi dapat disalurkan ke padatan es produk dengan beberapa cara antara lain:

1. Dengan proses radiasi dari suatu permukaan yang dipanaskan dimana flux panas pada permukaan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$q = \delta(K_{Str1}^4 - K_{Str2}^4) \times 1 / \left[ \left( \frac{1}{\varepsilon_1} \right) + \left( \frac{1}{\varepsilon_2} \right) - 1 \right] \quad \dots\dots\dots 2.1.6$$

(ref. [1] hal 78)

Dimana:

$$\delta = 2,05 \times 10^{-7} \frac{kJ}{m^2 \cdot h \cdot K^4}$$

$K_{str1}$  = Temperatur pada lapisan permukaan produk (K)

$K_{str2}$  = Temperatur pada lapisan produk beku (K)

$\varepsilon_1$  = Efisiensi radiasi pada lapisan permukaan produk

$\varepsilon_2$  = Efisiensi radiasi pada lapisan beku produk

2. Dengan proses konduksi dari suatu plat atau gas yang dipanaskan.
3. Dengan konveksi gas
4. Dengan proses *dielectric* dalam frekwensi tinggi yang dimasukkan kedalam es.

Dengan data-data lengkap sesuai yang diperlukan dan beberapa asumsi serta beberapa penyederhanaan, diantaranya:

- Tebal lapisan es tak terbatas, energi hanya disalurkan melalui rak wadah menuju satu sisi dari lapisan produk
- Uap air hanya dipindahkan dari permukaan es melalui sela-sela (porositas) produk kering
- Produk yang membeku tidak mengalami porositas (dianggap pejal).
- Proses perpindahan panas yang terjadi pada bagian yang kering diabaikan

Maka waktu yang diperlukan dalam proses pengeringan utama (*Main Drying*) dapat dirumuskan dengan:

$$t_{md} = (\rho g \xi_w L S \Delta m d) / T_{tot} [(1/K_{tot}) + (d/2\lambda_g) + (d/2LSb/\mu)] \dots\dots\dots 2.1.7$$

(ref. [1] hal 81)

$\rho g$  = Densitas produk yang membeku (Kg/m<sup>2</sup>)

$\xi_w$  = Bagian air (kg/kg)

$LS$  = Energi Sublimasi (2805 kJ/kg)

$T_{tot}$  = Beda Temperatur ( $T_{tot} = T_{shelf} - T_{ice}$ )

$K_{tot}$  = Koefisien perpindahan panas total dari rak wadah hingga permukaan es yang akan mengalami sublimasi

$\lambda_g$  = Konduktifitas panas dari produk beku

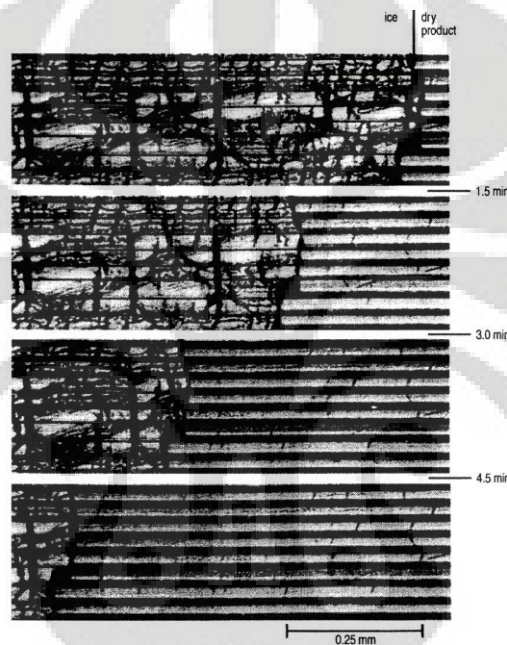
$d$  = Ketebalan produk keseluruhan (m)

$\Delta m$  = Kandungan air yang membeku

$b/\mu$  = Permeabilitas atau koefisien perpindahan massa (kg/m h mbar)  
untuk uap air yang melewati produk yang telah kering (dengan asumsi ini menghasilkan kesalahan ~4% pada  $T_{tot} = 100^\circ\text{C}$  dan ~2% pada  $T_{tot} = 50^\circ\text{C}$ ).

Pada intinya proses pengeringan utama (*Main Drying*) dipengaruhi oleh 2 variabel yaitu:

1. Pengendalian tekanan operasi yang sesuai,  $p_c$
2. Pemilihan temperatur rak wadah,  $T_{sh}$



Gambar 2.1.2. Proses *Main Drying* (MD) hasil pengamatan *cryomicroscope* [1]

#### II.1.2.2. Pengeringan Dengan Desorpsi (*Secondary Drying*)

Selama proses pengeringan lanjutan (*Secondary Drying*), dimana kandungan air yang dibuang merupakan bagian yang melekat pada padatan yang tidak mengalami proses kristalisasi. Kandungan air tersebut dapat terikat pada permukaan kristal produk ataupun pada bagian butir produk yang telah kering.

Tiga kemungkinan untuk mendefinisikan perubahan fase dari proses pengeringan utama menuju pengeringan lanjutan (*Pikal* [1.60]) adalah:

- Pertambahan temperatur produk

- Pengurangan tekanan uap air parsial
- Peningkatan pada pengukuran tekanan  $dp/dt$  (dt waktu)

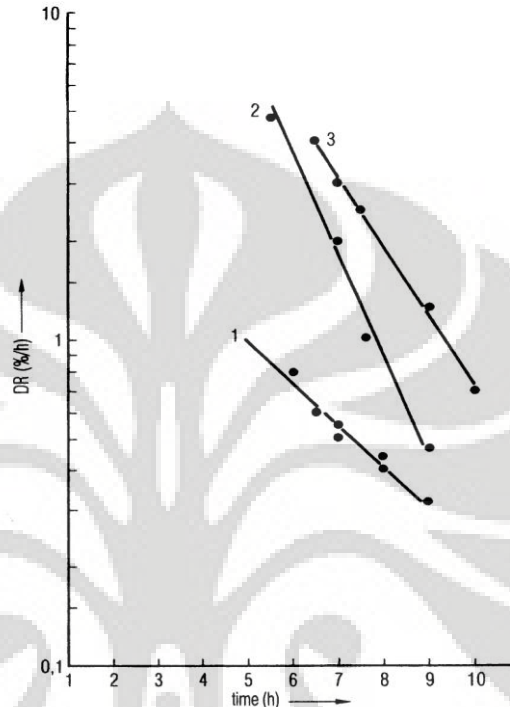
Temperatur produk mengalami peningkatan pada akhir proses pengeringan utama. Pengukuran temperatur yang dilakukan sensor dengan bias yang lebar mengakibatkan ketidakpastian pengukuran pada akhir proses pengeringan utama. Perubahan tekanan uap air parsial selama proses pengalihan dari pengeringan utama menuju pengeringan lanjutan memerlukan waktu beberapa jam tergantung pada kondisi proses yang sedang berlangsung. Pada sebagian praktik pengeringan, salah satu proses bisa memerlukan waktu beberapa jam sebelum temperatur meningkat hingga mencapai proses pengeringan lanjutan, hal ini dilakukan guna menghindari kerusakan sebagian produk (*partial collapse*). Kemungkinan lain untuk mengetahui perpindahan fase proses pengeringan adalah dengan mengukur peningkatan tekanan dalam interval waktu tertentu hingga terjadi perubahan yang bisa digunakan sebagai batasan perpindahan proses. Cara tersebut akan lebih jelas penerapannya jika besarnya laju penyerapan air per satuan waktu dan keterkaitannya dengan bagian padatan dapat diketahui yang biasa disebut dengan laju penyerapan (*DR: Desorption Rate*) yang dapat didefinisikan dengan:

$$DR = \frac{\text{amount of water absorbed} \times 100}{\text{time} \times \text{mass of solid}} \left( \frac{\%}{\text{h}} \right) \dots\dots\dots 2.1.7$$

(ref. [1] hal 99)

Jumlah air yang terserap dapat dihitung dengan mengamati kenaikan tekanan setelah dilakukan penutupan katup antara ruang pengering dengan ruang evaporator, dibagi dengan lamanya waktu penutupan dan volume ruang pengering. Gambar 2.1.3 menunjukkan tiga pengulangan proses pengukuran laju penyerapan air tanpa kontrol tekanan yang bertujuan untuk mendemonstrasikan kemampuan ulang produksi serta dua pengukuran dimana pengeringan utama yang menggunakan tekanan 0.36 dan 0.21 mbar.

Dengan menggunakan barometer, alat pengukur temperatur (*BTM: barometric temperature measurement*) serta pengukuran laju desorpsi (*DR: desorption rate*) didapat bahwa pengaruh variasi kondisi pengeringan dapat dilihat dan dianalisa.



Gambar 2.1.3. laju pengeringan desorpsi terhadap waktu [1]

### II.1.2.3. Pengukuran Temperatur dan Tekanan

Pengukuran temperatur dan tekanan selama proses pengeringan beku (*freeze-drying*) merupakan salah satu pekerjaan yang tidak mudah. Elemen thermal (*Th; thermal element*) serta dependensi tahanan elektrik terhadap temperatur (*RTD*) sistem hanya melakukan pengukurannya sendiri dan hanya melakukan temperatur pada daerah yang melakukan kontak ataupun yang paling dekat dengan alat ukur tersebut. Lebih dari itu, alat ukur melakukan pemanasan sendiri dan sekelilingnya dengan adanya arus listrik yang mengalir pada sensor selama proses dan juga mempengaruhi proses kristalisasi produk disekelilingnya dengan cara:

- Dengan energi yang ditimbulkannya

- Dengan induksi *heterogeneous crystallization* yang menimbulkan efek yang berbeda seandainya tanpa sensor.
- Dengan proses *subcooling* yang berbeda dimana dapat menjadi lebih kecil pada daerah sekeliling sensor yang akhirnya dapat menghasilkan kekasaran struktur produk

Struktur produk akan berubah dan masukan panas oleh sensor juga akan mempengaruhi proses pengeringan utama pada botol/wadah produk yang menggunakan sensor. Berkaitan dengan pengukuran itu, permasalahan lain yang muncul dalam prakteknya adalah dimana sensor Th dan RTD harus dimasukkan kedalam produk lalu disambungkan dengan saluran yang melawati dinding vakum menuju rangkaian sistem pengukur. Sementara pengaturan posisi sensor memiliki pengaruh yang terbatas dimana selama proses pembekuan, sensor temperatur menghasilkan gambaran pengukuran yang cukup akurat meskipun sebenarnya produk memberikan reaksi yang berbeda pada saat dimasuki sensor pengukur dan tanpa sensor.

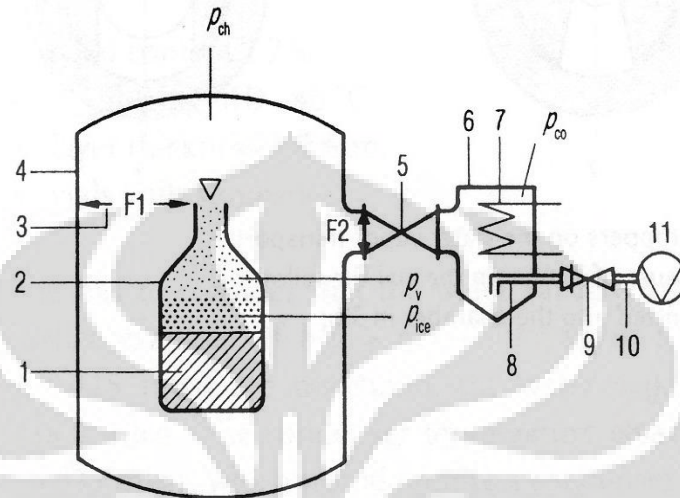
Selama proses pengeringan utama situasinya berbeda dimana kondisi kontak permukaan sensor yang paling dekat dengan produk hanya akurat pada awal proses pengeringan utama untuk kemudian temperatur yang terukur tergantung secara tidak langsung pada kondisi proses dimana sangat sulit untuk dianalisa. Adapun posisi sensor, diatas, di tengah ataupun pada bagian bawah botol / wadah sangat menentukan hasil data yang terukur. Volume isi botol yang lebih kecil (ketebalan sekian millimeter) akan menghasilkan data pengukuran yang tidak cukup menghasilkan data yang bermanfaat sebagai bahan analisa. Parameter utama dalam proses pengeringan utama adalah temperatur pada daerah lapisan dimana terjadi proses sublimasi yang tidak bisa diukur dengan Ths ataupun RTDs.

#### II.1.2.4. Transportasi Uap Air Selama Pengeringan

Perpindahan uap air dalam proses pengeringan beku bisa dijelaskan secara skematik dengan mengacu pada gambar 2.1.4 : es (1) diubah menjadi uap dan harus mengalir keluar dari botol tempat (2) menuju ruang pengering (4). Diantara dinding ruang pengering atau batasan lain diperlukan ruangan sebesar (3, F1). Uap air kemudian mengalir melalui F2 menuju kondensor (7)



yang memiliki luasan  $F_3$  dimana sebagian besar uap air akan mengalami kondensasi. Campuran sisa uap air akan ataupun sisa udara kemudian dipompa melalui (8), (9) dan (10) oleh pompa vakum (11)



Gambar 2.1.4. Skematik aliran uap air dalam proses pengeringan beku [1]

Keterangan gambar:

- 1 = produk yang membeku
- 2 = botol atau ujung rak penumpu
- 3 = permukaan terbuka ( $F_1$ ) sebagai jalan uap air mengalir antara 2 dan 4
- 4 = dinding ruang pengering
- 5 = katup pembuka  $F_2$
- 6 = ruang kondensor
- 7 = permukaan pendinginan atau kondensasi pada ruang kondensor dengan luasan  $F_3$
- 8 = pipa vakum dengan diameter  $d$
- 9 = katup penutup
- 10 = pipa vakkum dengan panjang  $l$  (dari 8 ke 11)
- 11 = pompa vakum

$p_{ice}$  = tekanan uap air pada permukaan terjadinya proses sublimasi dari es

$p_v$  = tekanan dalam botol

$p_{co}$  = tekanan dalam kondensor

Penurunan tekanan pada saat proses perpindahan uap air dari botol (2) menuju ruang pengering tidak terjadi jika permukaan produk sama besar dengan ruang terbuka botol menuju ke ruang pengering. Jika terdapat tutup penghalang pada keluaran botol pada proses pengeringan maka akan menghasilkan situasi yang berbeda dimana berdasarkan jenis-jenis tutup penghalang, maka laju pengeringan bisa berkurang dengan kisaran 66 sampai 77% atau pada umumnya 60-80%. Untuk mencapai laju yang sama maka temperatur harus ditambah dari  $-20$  ke  $-17^{\circ}$  C sehingga akan terjadi kenaikan tekanan sebesar 30%. Jika penambahan temperatur tidak diperkenankan maka tekanan pada ruang pengering harus dikurangi sehingga berakibat proses pengeringan yang lebih lambat.

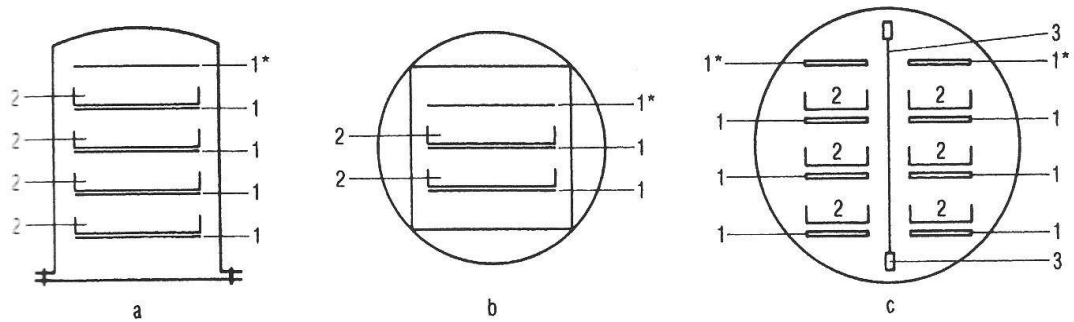
Aliran uap air menuju kondensor sangat tergantung pada perancangan alat dimana dalam kondisi yang baik termasuk katup antara ruang pengering dengan kondensor (jika memakai) maka laju uap air bisa mencapai 60-90 m/s sehingga bisa mengakibatkan faktor penurunan tekanan antara ruang pengering dengan kondensor mencapai 2 selain tergantung pada ketinggian letak antara keduanya.

### II.1.3. Komponen Sistem Pengeringan

#### II.1.3.1. Ruang Pengering

Ruang pengering dalam *freeze vacuum drying* merupakan tempat dimana terjadi proses sublimasi sehingga terjadi akumulasi uap air dari produk. Terdapat beberapa jenis model ruang pengering, sebagai berikut:





Gambar 2.1.5. Jenis ruang pengering beku [1]

Dimana:

- a. *Bell with base plate*
- b. *Rectangular or cylindrical chamber*
- c. *Tunnel with round cross-section*

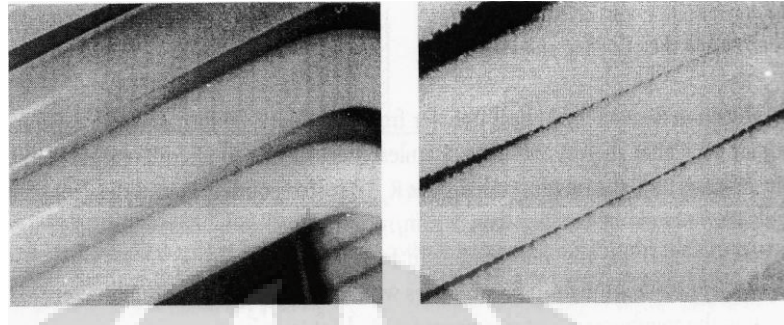
Pemakaian jenis ruang pengering memiliki kelebihan dan kekurangan tersendiri yang disesuaikan dengan penggunaannya seperti jenis *bell with base plate* yang biasa dipakai di *labilatory* serta pemakaian bentuk lain yang disesuaikan dengan jumlah produk yang akan dikeringkan, kemudahan dalam akses produk serta proses pembersihannya.

#### II.1.3.2. Kondensor

Merupakan bagian sistem pengering yang berfungsi untuk menyerap uap air yang dihasilkan oleh proses sublimasi dalam ruang pengering. Dalam hal ini kondensor hendaknya memiliki kemampuan penyerapan uap air yang baik serta daya tampung endapan es yang memadai sehingga tidak terjadi gangguan kinerja selama proses pengeringan berlangsung. Beberapa syarat yang harus untuk mendukung proses pengeringan tersebut antara lain:

1. Luasan permukaan harus cukup untuk mengkondensasikan es yang dihasilkan dengan ketebalan maksimum tanpa mengganggu proses perpindahan panas dari permukaan pipa kondensor ke lapisan terluar es.

Adapun konduktivitas thermal es tergantung struktur es tersebut yang bisa digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.1.6. Jenis es dalam kondensor [1]

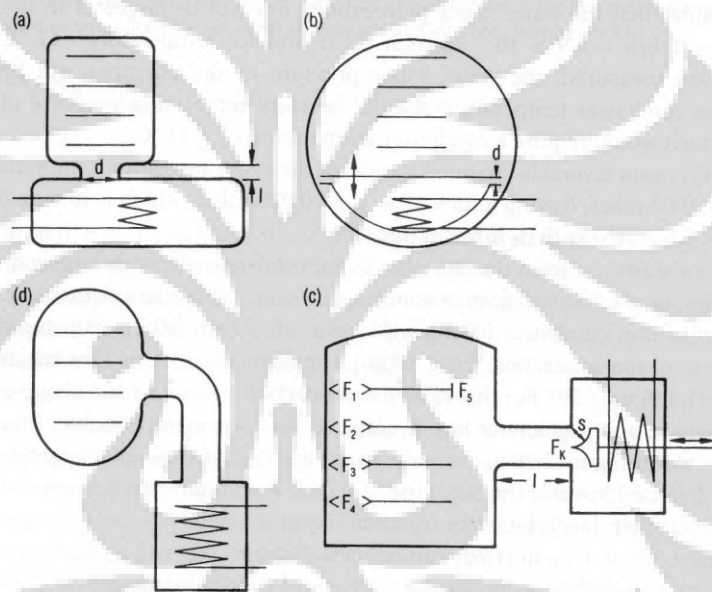
Pada gambar kiri merupakan jenis es yang memiliki struktur padat dan halus yang memiliki konduktivitas thermal  $6.7 \text{ kJ/m h } ^\circ \text{C}$  sementara gambar sebelah kanan jenis es yang memiliki struktur seperti salju yang umumnya terjadi pada tekanan udara terlalu tinggi. Jenis es ini memiliki konduktivitas yang lebih rendah.

2. Geometri penghubung antara ruang pengering dengan kondensor hendaknya dirancang sedemikian rupa sehingga mampu mengalirkan uap dalam jumlah yang besar.
3. Temperatur antara saluran masuk dan keluar pipa pendingin yang memasuki kondensor hendaknya memiliki perbedaan yang kecil guna menjamin keseragaman temperatur pada keseluruhan permukaan pipa kondensor.
4. Fluktusi aliran uap air pada saluran masuk kondensor harus seminimal mungkin sehingga proses pembekuan berlangsung sempurna dari awal pipa kondensor sampai ujung hingga tekanan ruang setimbang pada akhir proses pengeringan.
5. *Permanent gases* hendaknya dikeluarkan dari posisi terendah dari kondensor. Gas ini umumnya lebih padat daripada uap air yang terkonsentrasi pada dasar kondensor dan bisa memenuhi kondensor

sewaktu-waktu. Gas ini juga bisa mengurangi proses transportasi uap menuju permukaan pipa kondensor dalam proses pembekuan es.

### II.1.3.3. Saluran Penghubung

Saluran ini berperan sangat penting dalam transportasi uap air dari ruang pengering menuju kondensor dimana dimensi dan model saluran sangat mempengaruhi laju aliran uap yang akhirnya berpengaruh pada kualitas dan juga waktu proses pengeringan. Beberapa model susunan saluran penghubung dapat dilihat pada gambar sebagai berikut:

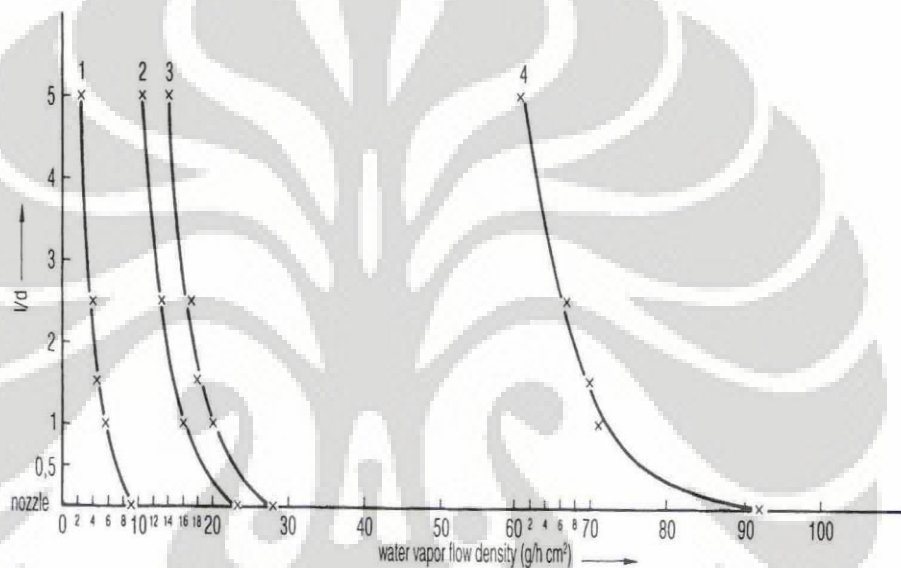


Gambar 2.1.7. Jenis saluran penghubung antara ruang pengering dengan kondensor [1]

- Ruang pengering dan kondensator tidak dipisahkan dengan katup, uap air mengalir melalui luasan  $d$  dengan panjang  $l$
- Ruang pengering dan kondensator dalam satu *housing*. Ruang kondensator dapat dipisahkan dengan suatu rak penutup. Dalam posisi terbuka, uap air mengalir melalui luasan  $d$ .
- Ruang pengering dengan 4 rak dengan pipa penghubung yang mempunyai luasan  $d$  (area  $F_k$ ) dan panjang  $l$ .

- d) Rancangan yang sama dengan c) hanya saja menggunakan sambungan elbow 90°.

Dalam hal ini saluran penghubung harus dirancang sedemikian rupa sehingga tidak mengganggu aliran uap air menuju kondensor. Tahanan aliran sebenarnya yang ditimbulkan oleh *elbow* pada saluran penghubung sangat tergantung pada bentuk dan kondisi permukaannya dibandingkan dengan panjang komponen tersebut. Eksperimen perbandingan antara panjang saluran penghubung terhadap diameternya dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.1.8. Densitas aliran uap air terhadap rasio  $l/d$  [1] hal 188

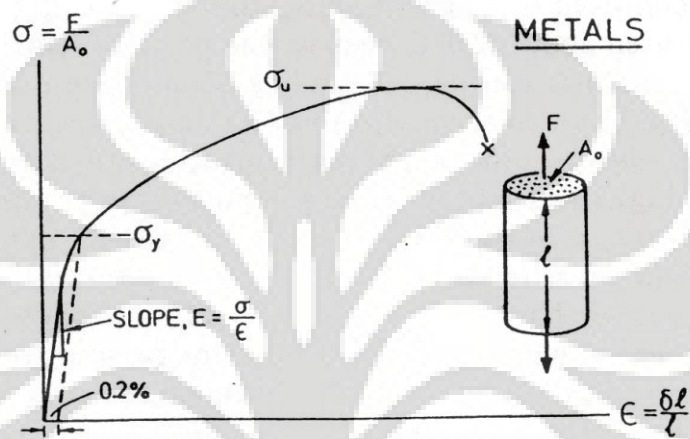
Perubahan bentuk saluran penghubung yang landai dan permukaan yang halus serta didukung dengan dimensi yang pendek sangat dianjurkan untuk mendukung transportasi uap air ke kondensor dengan kondisi tekanan yang berbeda.

## II.2. Perancangan Mesin Pengering

Rancangan mesin pengering dibuat dengan menerapkan prinsip-prinsip mekanikal dan proses manufaktur yang baik sehingga diharapkan dapat menghasilkan mesin pengering yang baik serta terhindar dari kebocoran guna mendukung keberlangsungan proses pengeringan beku.

### II.2.1. Karakteristik Material

Setiap material memiliki sifat tersendiri yang menunjukkan tingkat kemampuannya terhadap perlakuan gaya dari luar dalam suatu rancangan rekayasa. Karakteristik yang dimiliki oleh material antara lain: densitas, modulus elastisitas, ketangguhan dan konduktifitas thermal dan sifat-sifat lainnya. Karakteristik suatu material digambarkan dalam bentuk diagram tegangan-regangan seperti contoh berikut:



Gambar 2.2.1. Diagram tegangan-regangan material [8]

Dalam grafik tersebut, modulus elastisitas digambarkan dengan “*the slope of the linear elastic of the stress-strain curve*” sedangkan modulus Young’s,  $E$  menggambarkan sifat material terhadap tarikan atau kompresi. *Bulk modulus*,  $K$  menjelaskan ketahanan terhadap tekanan hidrostatik dan Poisson’s ratio,  $\nu$  menunjukkan rasio negatif material dari regangan lateral terhadap regangan aksial  $\epsilon_2/\epsilon_1$  pada pembebanan aksial.

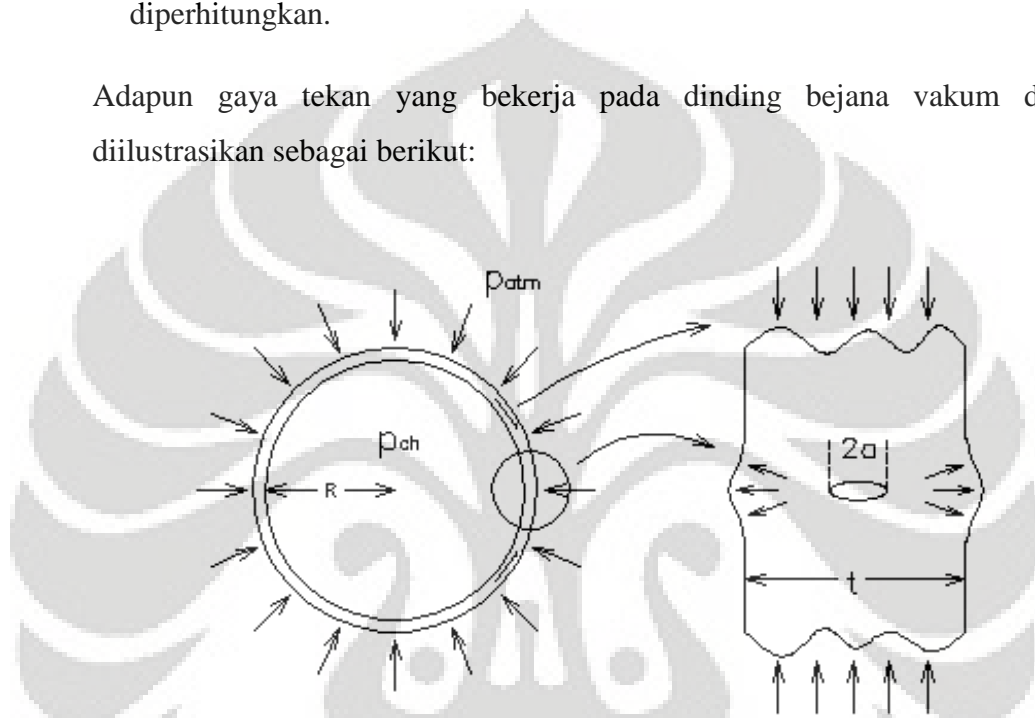
### II.2.2. Bejana vakum

Bejana vakum merupakan suatu tabung yang bekerja pada tekanan dibawah atmosfer pada sisi dalam serta tekanan atmosfer itu sendiri pada dinding luarnya yang mengakibatkan timbulnya penekanan pada dinding bejana yang dalam hal ini dapat mengakibatkan tekukan atau *buckling* sehingga pada batasan tertentu menimbulkan kebocoran terutama pada ketebalan yang relatif kecil. Analisa dalam perhitungan untuk menentukan

ketebalan dinding yang diperlukan dapat menggunakan asumsi sebagai berikut:

- i. Efek lengkungan tidak diperhitungkan
- ii. Tegangan tekan seragam pada luasan dinding
- iii. Pengaruh tahanan pada kedua plat penutup di kedua ujung bejana tidak diperhitungkan.

Adapun gaya tekan yang bekerja pada dinding bejana vakum dapat diilustrasikan sebagai berikut:



Gambar 2.2.2. gaya kompresi pada dinding bejana [8]

Pada gambar diatas, gaya yang bekerja pada dinding bejana yang divakum merupakan tegangan tekan dimana besarnya gaya tersebut disebabkan perbedaan tekanan antara takanan luar dan bagian dalam bejana yang bekerja pada keliling lingkaran dengan jari-jari  $R$  sepanjang  $L$  (arah tegak lurus bidang). Gaya tersebut kemudian ditahan oleh dua sisi bejana yang merupakan dinding dengan ketebalan  $t$  dan panjang  $L$ . Dengan demikian ketebalan dinding yang diperlukan oleh dinding bejana yang mengalami tekanan vakum dalam hal ini dapat diuraikan sebagai berikut:

$$f_c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots 2.2.1$$

(ref. [2] hal 76)

Dimana:

$P$  = Gaya pada dinding tabung (N)

Dimana:

$P = \text{Intensity of pressure} \times \text{projected area}$

$A$  = Luasan bidang yang menahan gaya tekan (m<sup>2</sup>)

$f_c$  = Tegangan kompresi

Dari rumus akan didapatkan ukuran tebal dinding tabung yang dibutuhkan dengan penguraian sebagai berikut:

$$f_c = \frac{p \cdot \pi \cdot d \cdot L}{2 \cdot t \cdot L} = \frac{p \cdot \pi \cdot d}{2 \cdot t}$$

Dimana:

$P$  = Tekanan yang bekerja pada dinding tabung (N/m<sup>2</sup>)

$d$  = Diameter bejana vakum (m)

$t$  = Tebal dinding bejana (m)

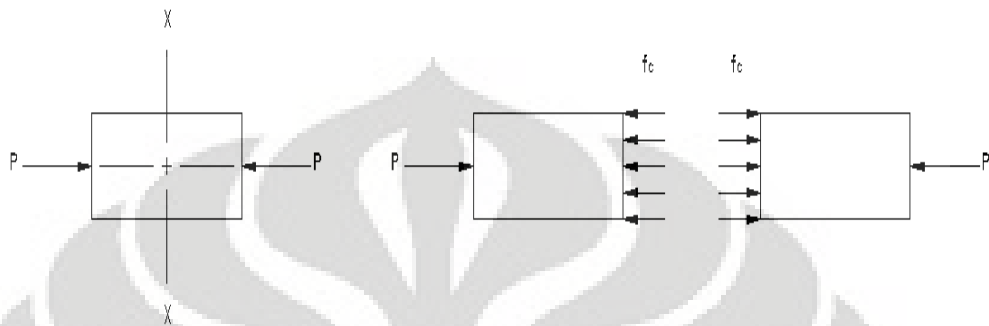
$L$  = Panjang bejana (m)

Tekanan yang terjadi pada dinding bejana harus lebih kecil dari tegangan luluh material ( $\sigma_f$ ) dengan faktor keamanan yang disesuaikan dengan penggunaan bejana tersebut.



### II.2.3. Tegangan Kompresi

Ketika suatu komponen dikenai gaya yang sama besar dan berlawanan dengan arah yang saling mendekat yang menyebabkan komponen mengalami kompresi sehingga dinamakan tegangan tekan untuk setiap luasan normal komponen terhadap gaya yang bekerja.



Gambar 2.2.3. Tegangan kompresi [2]

Tegangan kompresi:

$$f_c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots 2.2.2$$

(ref. [2] hal 76)

Regangan kompresi:

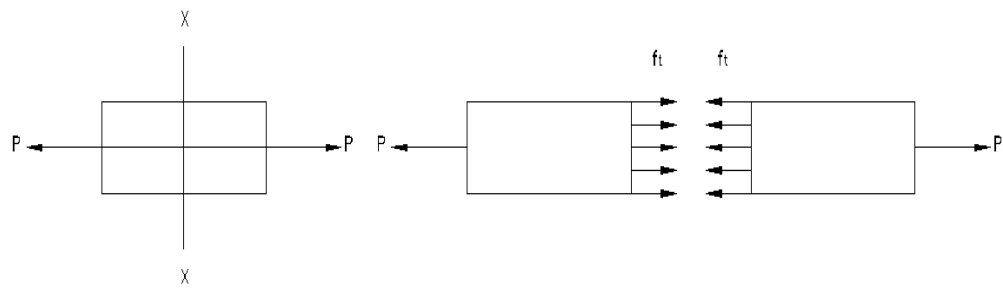
$$e_c = \frac{\delta l}{l} \dots\dots\dots 2.2.3$$

(ref. [2] hal 76)

### II.2.4. Tegangan Tarik

Tegangan tekan terjadi ketika komponen dikenai dua gaya yang sama dan berlawanan dengan arah saling menjauh yang menyebabkan komponen mengalami tarikan sehingga dinamakan tegangan tarik pada setiap luasan normal komponen terhadap gaya yang bekerja.





Gambar 2.2.4. Tegangan tarik [2]

Tegangan tarik

$$f_t = \frac{P}{A} \dots\dots\dots 2.2.4$$

(ref. [2] hal 75)

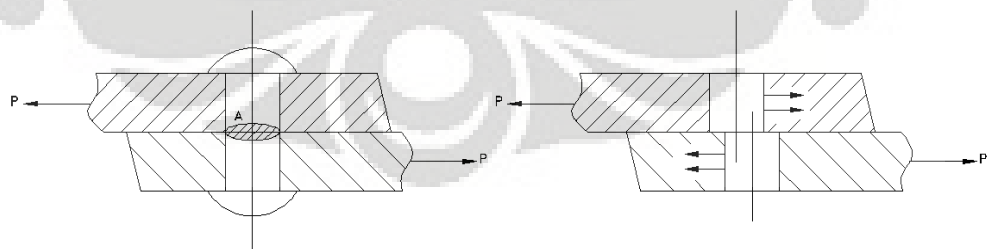
Regangan tekan

$$e_t = \frac{\delta.l}{l} \dots\dots\dots 2.2.5$$

(ref. [2] hal 75)

### II.2.5. Tegangan Geser

Tegangan geser terjadi ketika komponen mendapat perlakuan dua gaya yang berlawanan dan saling menjauh dengan besaran yang sama dan bekerja pada luasan tertentu sehingga menyebabkan pergeseran yang disebut tegangan geser.



Gambar 2.2.5. Tegangan geser [2]

$$f_s = \frac{\text{Tangential Force}}{\text{Resistance Area}} \dots\dots\dots 2.2.6$$

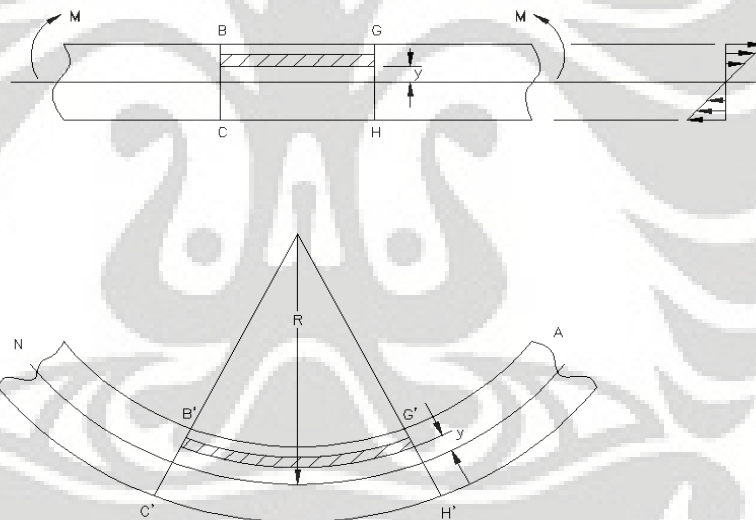
(ref. [2] hal 77)

$$f_s = \frac{P}{A} = \frac{P}{\frac{\pi}{4}d^2} \dots\dots\dots 2.2.7$$

(ref. [2] hal 77)

### II.2.6 Tegangan Bending

Dalam rekayasa seringkali suatu komponen mesin mendapatkan beban baik statis maupun dinamis yang bisa menyebabkan timbulnya tegangan bending disamping jenis tegangan lainnya seperti tegangan tarik, kompresi maupun tegangan geser.



Gambar 2.2.6. Bending [2]

Dalam proses bending, bagian atas dari komponen akan mendapatkan tegangan tekan sehingga menyebabkan kerutan akibat kompresi sedangkan bagian bawah komponen akan mengalami regangan akibat gaya tarik. Dalam gambar dapat dilihat bahwa pada bagian tengah tidak mengalami kompresi maupun tarikan akibat beban pada komponen yang disebut *neutral surface*. Jarak yang terdapat antara neutral surface terhadap suatu titik sepanjang luasan

bidang normal disebut. Adapun persamaan bending dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{M}{I} = \frac{f_b}{y} = \frac{E}{R} \quad \dots\dots\dots 2.2.8$$

(ref. [2] hal 111)

Dimana:

$M$  = Momen bending pada balok

$f_b$  = Tegangan bending

$I$  = Momen inersia luasan melintang terhadap *neutral axis*

$y$  = Jarak dari *neutral surface* ke lapisan paling luar

$E$  = Modulus Young balok

$R$  = *Radius of Culvature* balok

Dari persamaan diatas, tegangan bending dapat dituliskan sebagai berikut:

$$f_b = y \times \frac{E}{R} \quad \dots\dots\dots 2.2.9$$

(ref. [2] hal 112)

$E$  dan  $R$  adalah konstan

Dari persamaan diatas juga didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$f_b = \frac{M}{I} \cdot y = \frac{M}{\frac{I}{y}} = \frac{M}{Z} \quad \dots\dots\dots 2.2.10$$

(ref. [2] hal 112)

Rasio  $\frac{I}{y}$  biasa disebut *Section Modulus* dan dinotasikan dengan  $Z$

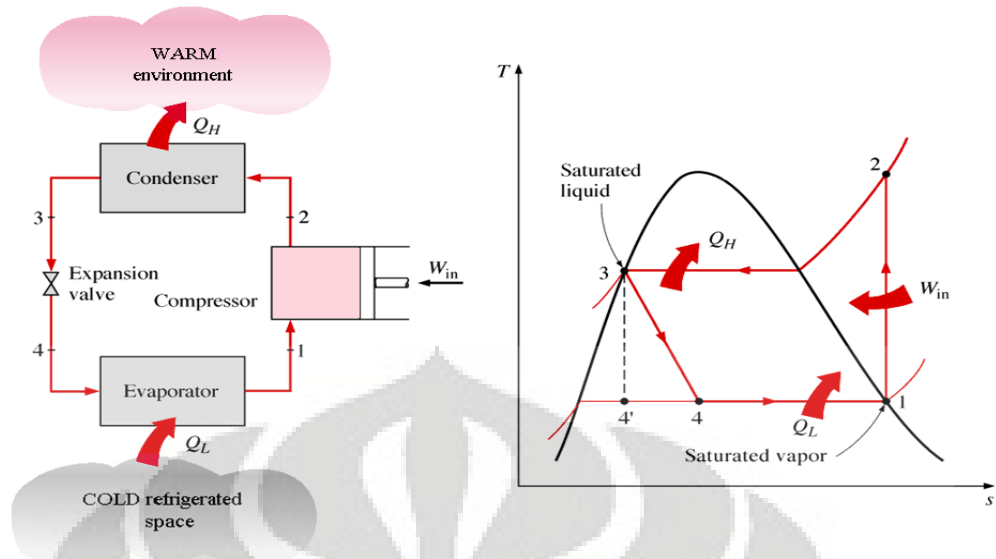
- Catatan:
1. Untuk komponen yang mempunyai bentuk simetris, *neutral axis* diasumsikan selalu berada pada tengah komponen
  2. Pada bentuk benda yang tidak simetris seperti bentuk *L-section* atau *T-section*, *neutral axis* tidak berada ditengah-tengah komponen. Dalam hal ini langkah pertama harus ditentukan titik *centroid* komponen sehingga lapisan ekstrim pada bagian atas dan bawah *neutral surface* dimana terjadi tegangan pada komponen dapat ditemukan. Bagian ekstrim yang mengalami tegangan paling besar digunakan sebagai acuan dalam perhitungan tegangan bending.

### II.3. 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.

#### II.3.1. Siklus Ideal Sistem Refrigerasi

Siklus ideal sistem refrigerasi merupakan pengembangan dari *reversed carnot cycle* melalui proses evaporasi gas *refrigerant* sebelum dikompresikan dan dengan mengganti peran turbin dengan *throttling device* seperti katup ekspansi ataupun pipa kapiler. Siklus sistem ini dapat digambarkan dengan diagram sebagai berikut:



Gambar 2.3.1. Siklus sistem pendingin [3]

Dengan penjabaran siklus untuk tiap-tiap langkah sebagai berikut:

- 1-2 Kompresi isentropik dalam kompresor
- 2-3 Tekanan konstan proses pembuangan panas dalam kondensor
- 3-4 Proses *throttling* oleh katup ekspansi
- 4-1 Tekanan konstan proses penyerapan panas dalam evaporator

Gas *refrigerant* mengalami penurunan tekanan pada saat melewati katup ekspansi sedemikian rupa sehingga lebih rendah daripada temperatur ruangan yang didinginkan untuk kemudian memasuki evaporator dan menguap dengan menyerap panas dari ruangan yang ingin didinginkan. Gas kemudian keluar dari evaporator dalam kondisi *saturated vapor* lalu memasuki kompresor dan melanjutkan siklus pendinginan.

Adapun prosesnya dapat dijelaskan secara lebih detail berikut ini :

- Refrigeran yang telah bersirkulasi satu siklus penuh masuk ke kompresor dalam keadaan uap jenuh (*saturated vapor*) dan akan ditekan di dalam kompresor ke tekanan yang lebih tinggi, menghasilkan tekanan dan temperatur *refrigerant* yang tinggi.

- Uap yang keluar dari kompresor dalam keadaan temperatur tinggi, di kenal dengan uap panas tingkat lanjut (*superheated vapor*) kemudian akan menuju ke kondensor dimana di kondensor ini *refrigerant* akan didinginkan dan dikondensasikan menjadi cairan dengan cara melewatkannya melalui *tube* bersirip, proses pendinginan di kondenser terdapat 2 cara yaitu : dengan udara yang dihasilkan dari fan/blower atau dengan media cairan pendingin ( contoh : air ). Pada kondenser terjadi peristiwa pembuangan kalor dari refrigeran/sistem ke lingkungan.
- *Refrigerant* yang telah terkondensasi menjadi cairan, dikenal dengan cairan jenuh (*saturated liquid*) kemudian akan menuju alat ekspansi dimana tekanannya akan diturunkan. Penurunan tekanan ini akan menghasilkan campuran x % liquid dan y % uap, yang kuantitasnya dapat dilihat di diagram mollier. y % uap inilah yang disebut sebagai *flash gas* yang akan mendinginkan sisa *refrigerant* yang masih berbentuk cairan ke temperatur yang lebih rendah dari temperatur ruangan yang akan didinginkan.
- Campuran uap dan cairan refrigeran yang bertemperatur dan bertekanan rendah kemudian akan memasuki evaporator. Fan akan mensirkulasikan udara yang tentunya lebih hangat dari temperatur campuran cairan dan uap refrigeran. Udara yang lebih hangat inilah yang akan membuat refrigeran cair berevaporasi seluruhnya sampai ke kondisi uap jenuh (*saturated vapor*) . Pada waktu yang sama pula, udara hangat akan menjadi dingin setelah melewati evaporator ( karena terjadi proses perpindahan panas ), udara yang dingin keluar dari evaporator akan mendinginkan ruangan sampai ke temperatur yang diinginkan. Untuk menyelesaikan satu siklus refrigerasi penuh maka 100 % uap dari evaporator akan kembali menuju ke kompresor.

### II.3.2. Perhitungan sistem refrigerasi

- Daya pendinginan

$$q_c = m_r (h_1 - h_4) \dots\dots\dots 2.3.2.1$$

(ref. [7] hal 8)

Dimana:

$m_r$  = laju aliran massa

$h_1$  = enthalpy pada titik 1

$h_4$  = enthalpy pada titik 4

- Daya kompresor

$$w_{Comp.} = m_r (h_2 - h_1) \dots\dots\dots 2.3.2.2$$

(ref. [7] hal 8)

Dimana:

$h_2$  = enthalpy pada titik 2

- Koefisien performance (COP)

$$COP_c = \frac{q_c}{w_{Comp.}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \dots\dots\dots 2.3.2.1$$

(ref. [7] hal 8)

### II.3.3. Komponen Sistem Refrigerasi

#### 1. Kompresor

Kompresor merupakan komponen yang penting dalam sistem refrigerasi yang berfungsi untuk mendorong gas *refrigerant* secara kontinu dari evaporator sehingga tekanan dan temperatur yang rendah didalam evaporator dimana terjadi penguapan dan pelepasan panas dari ruangan dapat dipertahankan. Kompresor kemudian harus mampu menaikkan tekanan *refrigerant* pada tingkatan dimana akan mengkondesasi dengan membuang panas ke media media pendingin dalam kondensor. Kompresor dalam sistem refrigerasi dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

a) Berdasarkan prinsip kerja

i. *Positive Displacement Compressor*

Dalam kompresor jenis ini proses kompresi dicapai dengan cara menjebak uap *refrigerant* kedalam ruang tertutup untuk kemudian mengurangi volumenya sehingga tekanannya akan naik seiring dengan berkurangnya volume selama langkah berlangsung. Ketika terjadi peningkatan tekanan hingga sedikit diatas tekanan kondensasi, kompresor kemudian mendorong gas *refrigerant* sehingga terjadi siklus pendinginan secara kontinyu.

ii. *Roto-Dynamic Compressor*

Prinsip kerja untuk menaikkan tekanan dalam jenis kompresor ini adalah dengan cara memberikan energi kinetik pada gas *refrigerant* oleh sebuah komponen yang berputar untuk dikonversikan menjadi tekanan ketika melewati suatu lintasan tertentu. Berbeda dengan jenis kompresor *positive displacement compressor* yang menghasilkan tekanan berfluktuasi, pada jenis kompresor ini menghasilkan tekanan yang stabil sehingga mengurangi keausan dan getaran.

b) Berdasarkan susunan motor penggerak

i. Jenis kompresor terbuka (*open compressor*)

Dinamakan kompresor terbuka karena menggunakan penggerak luar yang memiliki poros sebagai penghubung sehingga diperlukan lubang pada kompresor sebagai akses poros pemutar. Kompresor jenis ini biasanya digunakan pada kapasitas menengah hingga tinggi dengan kelebihan memiliki efisiensi tinggi dan fleksibel. Kelemahan sistem ini adalah adanya celah yang tidak bisa sempurna pada poros penghubung sehingga diperlukan perawatan secara berkala dan tabung penampung untuk mengantisipasi kebocoran gas *refrigerant*.



## ii. Jenis kompresor Hermetik (*sealed*)

Jenis kompresor ini menempatkan motor penggerak dan kompresor dalam satu ruangan dan dibuat sedemikian rupa sehingga tidak dimungkinkan terjadi kebocoran dari dalam kompresor. Kelemahan jenis kompresor ini adalah kurangnya pendinginan motor penggerak yang menyebabkan pemanasan komponen kompresor sehingga dalam hal ini diperlukan mekanisme pendinginan dengan melewati gas *refrigerant* melalui motor penggerak sehingga dalam hal ini diperlukan jenis *high dielectric refrigerant* sehingga adanya kebakaran akibat kontak listrik dapat dihindari. Kompresor Hermetik memiliki kerapatan yang tinggi sehingga memiliki kelebihan dapat digunakan dengan baik pada interval temperatur yang rendah namun efisiensinya lebih rendah dibandingkan dengan *Open Compressor* dikarenakan sebagian aliran *refrigerant* digunakan untuk mendinginkan kompresor.

## iii. Jenis kompresor semi Hermetik

Kompresor jenis merupakan jenis Hermetik namun memiliki motor penggerak yang masih dapat dipisahkan dengan perlengkapan katup pemisah dari ruang guna keperluan perawatan.

## 2. Kondensor dan Kompresor

Pada prinsipnya kondensor maupun evaporator merupakan komponen perpindahan panas dimana gas *refrigerant* mengalami perubahan fase. Didalam kondensor, *refrigerant vapour* mengalami kondensasi dengan membuang panas menuju media luar yang berfungsi sebagai penyerap panas. Sedangkan dalam evaporator, gas *refrigerant* mengalami penguapan dan menyerap panas dari sekitarnya. Berdasarkan kontak dengan fluida pendingin, kondensor maupun evaporator dapat dikategorikan menjadi:

### a) Pendinginan dengan udara

Dalam hal ini transfer perpindahan panas terjadi antara komponen dengan udara sekitar. Terdapat dua jenis pendinginan yaitu konveksi alami dan konveksi paksa dimana pada konveksi natural proses perpindahan panas

terjadi disebabkan adanya gaya *buoyancy* akibat perbedaan temperatur sedangkan pada konveksi paksa sirkulasi udara pendingin dilakukan dengan bantuan kipas ataupun blower sehingga jenis komponen ini memiliki kapasitas yang lebih besar. kedua jenis *heat exchanger* ini bisa dilengkapi dengan fin melalui pengaturan jarak tertentu dalam meningkatkan kapasitas perpindahan panas.

b) Pendinginan dengan air

Terdapat tiga jenis susunan komponen sistem perpindahan kalor antara lain:

- *Double pipe (tube-in-tube type)*

Tersusun dari dua pipa dengan diameter yang berbeda dimana *refrigerant* ataupun air sebagai media pendingin mengalir dengan arah yang berlawanan.

- *Shell-and-coil type*

Terdiri dari *shell* dan *coil* yang tersusun sedemikian rupa sehingga didapatkan kapasitas perpindahan kalor yang meningkat dengan penambahan *fin* yang membuat koefisien perpindahan kalor yang besar.

- *Shell-and-tube type*

Dengan jenis pemasangan horizontal dalam kondensor ini *refrigerant* mengalir melewati *shell* sedangkan media pendingin dialirkan melewati *tube* dengan sekali putaran atau lebih.

c) *Evaporative Condenser*

Jenis kondensor ini menggabungkan antara penggunaan air dan udara sebagai media untuk mendinginkan *refrigerant*. Dalam kondensor ini air disemprotkan dari sisi atas rangkaian pipa yang mengalirkan *refrigerant* sementara udara dihembuskan dari bagian bawah yang menyebabkan adanya lapisan tipis air pada pipa kondensor dimana terjadi proses perpindahan kalor. Jenis yang tidak menggunakan blower disebut *atmospheric condenser*.

### 3. Katup Ekspansi

Katup ekspansi merupakan salah satu bagian utama sistem refrigerasi yang berfungsi untuk mengurangi tekanan dari kondensor untuk disesuaikan dengan tekanan evaporator serta mengatur aliran *refrigerant* dari cairan bertekanan tinggi menuju yang ke evaporator untuk disesuaikan dengan laju penguapan dalam evaporator. Dalam kondisi normal laju aliran massa *refrigerant* dalam sistem harus proporsional dengan beban pendinginan maupun dengan pengkondisian yang lainnya. Terdapat dua jenis katup ekspansi yaitu *fixed opening type* dan *variable opening type* dimana pada jenis pertama luasan aliran *refrigerant* konstan sedangkan yang kedua luasan aliran berubah seiring dengan perubahan laju aliran massa. Jenis yang kedua ini memiliki beberapa tipe antara lain:

#### a) Katup ekspansi manual

Tekanan kerja jenis katup ini dilakukan secara manual untuk disesuaikan dengan kondisi kerja sistem yang diinginkan.

#### b) Pipa kapiler

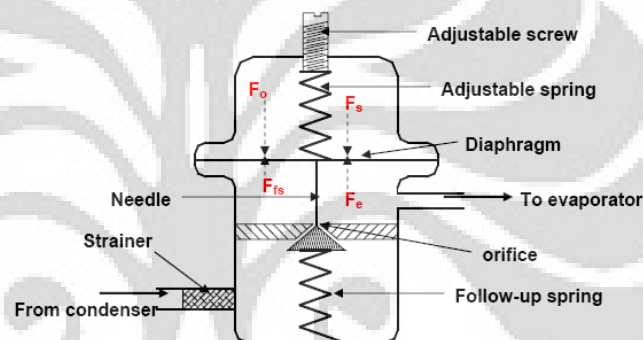
Merupakan jenis katup ekspansi yang terbuat dari pipa dengan perbandingan yang kecil antara diameter dengan panjang pipa yang biasa disebut *capillary tube*. Diameter yang dipakai umumnya berkisar antara 0.5 – 3mm dengan panjang 1 – 6 meter yang disesuaikan dengan kebutuhan sistem. Dengan dimensi itu menyebabkan terjadinya penurunan tekanan dikarenakan gesekan yang terjadi antara *refrigerant* dengan dinding kapiler serta terjadinya pembentukan campuran antara uap dan cairan pada saat penurunan tekanan tersebut sehingga terjadi penurunan *density* dimana pada saat yang sama dengan diameter dan laju aliran massa konstan menyebabkan kecepatan aliran akan bertambah. Hal inilah yang menimbulkan terjadinya penurunan tekanan sepanjang pipa kapiler.

c) Orifice

Merupakan metode untuk menurunkan tekanan dengan menaikkan kecepatan aliran *refrigerant* pada saat melewatkannya pada suatu penyempitan dalam pipa aliran yang disebut *orifice*.

d) Automatic Expansion Valve (AEV)

Katup ekspansi ini bekerja dengan menjaga tekanan tetap konstan pada evaporator untuk menjaga temperatur didalamnya tetap konstan selama siklus pendinginan berlangsung.



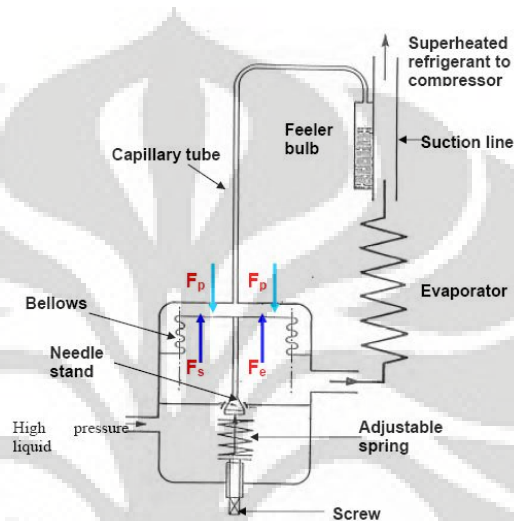
Gambar 2.3.2.1. Skematik AEV [4]

Katup ini bekerja berdasarkan dua gaya yang berlawanan arah yang masing-masing mengarah ke bawah yang ditimbulkan oleh *adjustable spring* dengan gaya  $F_s$  yang bisa disesuaikan oleh *adjustable screw* dan tekanan atmosfer  $F_o$  sementara gaya mengarah keatas ditimbulkan oleh tekanan *follow-up spring* serta keseimbangan tekanan antara kondensor dan evaporator.

e) Thermostatic Expansion Valve (TEV)

Merupakan jenis katup ekspansi yang paling serba guna dan banyak dipakai dalam desain sistem refrigerasi. Katup ini menjaga tekanan uap superheat pada keluaran evaporator agar tetap konstan serta sangat efektif dengan menjaga evaporator tetap kering sehingga mencegah hentakan pada saluran masuk (suction) karena mencegah adanya *refrigerant* masuk kedalam kompresor. Jenis katup ini memiliki sebuah *feeler bulb* yang berfungsi untuk merasakan temperatur pada keluaran evaporator sebagai masukan dalam

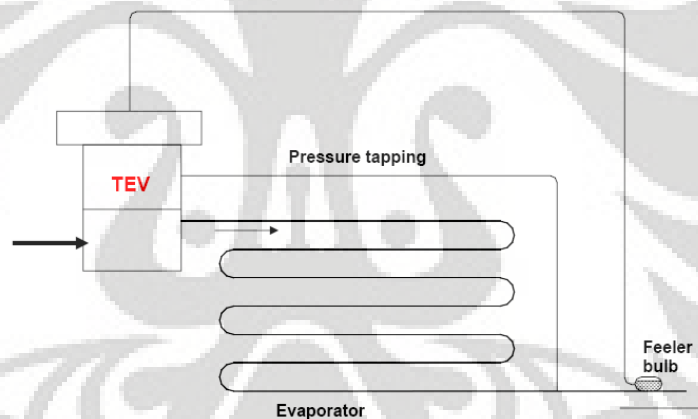
menjaga keseimbangan tekanan oleh katup ekspansi. *Feeler bulb* dihubungkan ke suatu bubungan pada katup oleh pipa kapiler yang berisi cairan yang dinamakan *power fluid*. Cairan tersebut bisa memiliki jenis yang sama dengan *refrigerant* maupun berbeda. Dalam hal bila *fluid power* berbeda jenis maka katup ekspansi tersebut dinamakan *TEV with cross charge*. Gambar katup ekspansi jenis ini dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.3.2.2. Skematik *TEV* [4]

Tekanan  $P_p$  pada *fluid power* merupakan tekanan saturasi berkaitan dengan temperatur pada keluaran evaporator. Jika dimisalkan bahwa temperatur evaporator adalah  $T_e$  dengan tekanan saturasi  $P_e$  maka tugas *TEV* adalah untuk menjaga temperatur  $T_e + \Delta T_s$  pada keluaran evaporator.  $\Delta T_s$  adalah besarnya temperatur superheat yang diperlukan dari *fluid power* dan besarnya  $T_e + \Delta T_s$  dengan mengacu pada keluaran evaporator merupakan temperatur pada tekanan saturasi dari *fluid power* untuk mempertahankan posisi tetap menekan sebesar  $P_p$  agar katup *needle stand* tetap membuka. Perbedaan  $F_p$  dan  $F_e$  merupakan besarnya gaya yang diperlukan untuk membuka katup *needle stand* yang bisa disesuaikan oleh *adjustable spring* dengan memutar *screw* untuk mengubah  $F_s$ . Pada saat siklus berhenti maka temperatur evaporator menjadi sama dengan temperatur ruang dan  $\Delta T_s$  menjadi nol sehingga katup menjadi tertutup. Ketika kompresor mulai bekerja maka akan menyebabkan tekanan  $P_e$  berkurang secara drastis sementara katup ekspansi

tertutup sehingga tidak terjadi aliran *refrigerant* ke evaporator. Karena tidak terjadi kenaikan tekanan dan temperatur maka perbedaan  $F_p$  dan  $F_e$  tidak cukup besar untuk mengimbangi gaya dorong *adjustable spring* yang menyebabkan *needle stand* tetap tertutup hingga mencapai titik tertentu. Hal ini mempunyai kelemahan dimana waktu yang diperlukan oleh katup ekspansi untuk membuka menjadi lebih lama pada evaporator yang lebih besar sehingga pemasukan *refrigerant* pun lebih lambat dan akhirnya menurunkan performa kerja sistem sehingga dibuat suatu sistem yang bisa mengatasi hal ini yaitu dengan menambahkan tekanan pada ruang dibawah *bellows* katup yang berasal dari keluaran evaporator agar bisa menyeimbangkan tekanan *adjustable spring* dan mempercepat *refrigerant* kedalam siklus. Katup jenis ini disebut *TEV with external equalizer* yang dapat dilihat seperti pada gambar beriku ini:



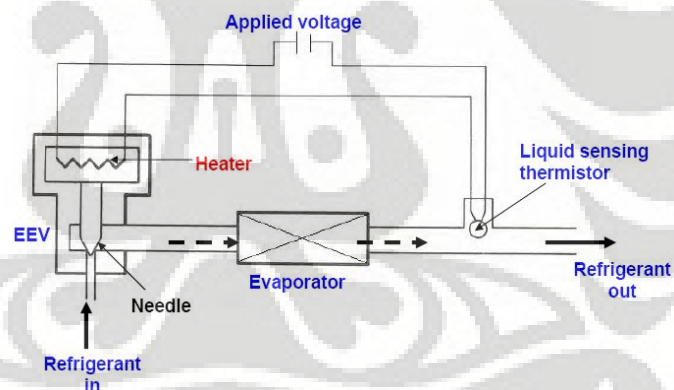
Gambar 2.3.2.3. Skematik AEV dengan *external equalizer* [4]

f) Float Type Expansion Valve

Merupakan jenis katup ekspansi yang biasa digunakan pada evaporator sistem pendingin berkapasitas besar dimana pembukaan maupun proses penutupan dilakukan oleh sebuah pelampung seiring dengan perubahan level cairan pada evaporator selama siklus berlangsung.

g) Electronic Expansion Valve (EEV)

Katup ini terdiri dari sebuah jarum dimana gerakan buka dan tutup dikendalikan oleh sebuah elemen pemanas keatas dan kebawah sehingga laju aliran *refrigerant* yang melalui orifice menjadi berubah sesuai dengan kondisi yang diinginkan. Elemen pemanas bekerja berdasarkan perubahan arus listrik yang dipengaruhi oleh sebuah *negative thermistor* dimana pada saat terjadi aliran superheat yang melawatinya, akan menyebabkan pemanasan sehingga tahanannya menurunkan dan menaikkan tegangan menuju pemanas dan menaikkan temperaturnya sehingga katup akan membuka lebih lebar sehingga menambah aliran *refrigerant* sampai terjadi penurunan temperatur yang menyebabkan tahanan pada *negative thermistor* naik dan menurunkan tegangan yang menuju elemen pemanas untuk kemudian mempersempit lubang alirannya. Gambar skematik katup ini dpaat dilihat sebagaimana berikut:



Gambar 2.3.2.4. Skematik EEV [4]

4. Zat Pendingin

*Refrigerant* dalam sistem pendingin memegang peranan penting dalam efisiensi siklus pendinginan sehingga dalam pemilihannya diperlukan penyesuaian dengan desain sitem, ukuran, keamanan maupun dengan isu yang berkaitan pemanasan global sehingga diperlukan pemikiran yang komprehensif dalam pemilihannya. Beberapa kriteria yang diperlukan dalam pemilihan *refrigerant* antara lain:



- i. Sifat thermodynamic dan thermo-physical yang mempertimbangkan:
- a. *Suction pressure* : dimana dengan temperatur kerja evaporator, tekanan saturasi hendaknya diatas tekanan atmosfer guna menghindari udara masuk ataupun embun masuk kedalam sistem serta supaya mudah dalam mendeteksi adanya kebocoran. Tekanan yang lebih tinggi lebih baik karena dapat meringankan kerja kompresor.
  - b. *Discharge pressure* : dimana dengan temperatur kerja kondensor, tekanan kondensor hendaknya serendah mungkin untuk memperkecil ukuran kompresor, kondensor maupun sistem lainnya.
  - c. *Pressure ratio* : hendaknya serendah mungkin untuk mendapatkan efisiensi volumetrik yang tinggi serta kebutuhan daya yang rendah.
  - d. *Latent heat of vaporization* : hendaknya setinggi mungkin sehingga laju aliran massa yang diperlukan untuk setiap unit kapasitas pendinginan menjadi kecil.
  - e. *Isentropic index of compression* : hendaknya serendah mungkin sehingga kenaikan temperatur selama proses kompresi menjadi rendah.
  - f. *Liquid specific heat* : hendaknya serendah mungkin sehingga derajat temperatur *subcooling* menjadi besar untuk menghindari gas menguap pada saluran masuk evaporator.
  - g. *Vapor specific heat* : hendaknya setinggi mungkin sehingga derajat temperature *superheating* menjadi rendah.
  - h. *Viscosity* : nilai viskositas hendaknya rendah baik pada fase cair maupun uap untuk menghindari *pressure drop* dalam sirkulasi sistem.

- ii. Sifat keamanan terhadap lingkungan dengan pertimbangan:



- a. *Ozon Depletion Potential (ODP)*: berdasarkan perjanjian Montreal nilai ODP harus nol. Nilai ini dipengaruhi oleh kandungan *chlorine* atau *bromine* dalam molekul sehingga dalam waktu dekat *refrigerant* dengan kandungan unsur tersebut tidak diperkenankan pemakaiannya. Diantara jenis tersebut adalah R11, R12 maupun R22.
- b. *Global Warming Potential (GWP)*: nilai ini berbeda dengan ODP diatas dimana dalam hal ini *refrigerant* dengan nilai GWP tinggi hendaknya dihindari penggunaannya.
- c. *Total Equivalent Warming Index (TEWI)* : parameter ini mempengaruhi dua faktor yaitu *direct* yang berkaitan langsung dengan pembuangan ke atmosfer dan *indirect* melalui konsumsi energi yang kesemuanya berkaitan dengan pemanasan global. Semakin kecil nilai TEWI semakin baik dalam menghindari pemanasan global.
- d. *Toxicity* : kandungan racun dalam *refrigerant* pada prinsipnya berkaitan dengan konsentrasi maupun transformasi ketika beraksi dengan udara luar dimana terdapat *refrigerant* yang berkonsentrasi rendah namun sangat beracun dan berdampak buruk bagi lingkungan.
- e. *Flammability* : sifat ini membahayakan secara langsung sehingga perlu dihindari. Dalam hal ini ASHARE telah mengategorikan menjadi berdasarkan *standard group* yang terdiri dari A1 sampai A3 dan B1 sampai B3 dengan urutan dari yang rendah sampai yang berbahaya.
- f. *Chemical Stability* : hendaknya stabil selama melakukan sirkulasi.
- g. *Compatibility* : dapat menyesuaikan dengan material konstruksi sistem yang digunakan baik logam maupun nonlogam.

h. *Miscibility with lubrication oil* : dalam hal ini *refrigerant* yang memiliki kemampuan memisahkan diri yang rendah dari oli (misal R22) hendaknya dilengkapi komponen *oil separator* untuk mensirkulasikan oli pelumas kembali ke kompresor.

i. *Dielectric strength* : merupakan sifat yang penting jika memakai kompresor jenis hermetik karena juga berfungsi sebagai pendingin pada motor penggerak.

j. *Ease leak detection*

iii. Nilai ekonomis *refrigerant* yang rendah serta mudah didapatkan.

## 5. Komponen pendukung sistem pendingin

### i. *Oil separator*

Kompresor dalam sistem refrigerasi menghasilkan tekanan aliran uap *refrigerant* yang cukup besar dan panas serta mengandung oli dari kompresor yang ikut terbawa saat proses *discharging* berlangsung sehingga diperlukan *oil separator* yang berfungsi untuk menyaring dan mengembalikan oli ke kompresor. Proses pemisahan terjadi dikarenakan aliran uap mengalami perlambatan pada saat memasuki *oil separator* untuk kemudian mengumpulkannya hingga level tertentu untuk kemudian dialirkan dengan dibukanya sebuah *needle valve* yang digerakkan oleh pelampung. *Oil separator* hendaknya di insulasi untuk menghindari berfungsi sebagai kondensor yang dapat melepas panas ke lingkungan.

### ii. *Filter dryer*

Merupakan komponen sistem pendingin yang berfungsi untuk menyaring *refrigerant* dari zat pengotor dan kandungan air yang terbawa sirkulasi selama proses sehingga bersih dan tetap kering. *Filter dryer* biasanya berupa tabung silinder yang terbuat dari aluminium, tembaga ataupun baja yang berisi bahan kimia seperti alumina aktif atau *silica gel* yang mampu menyerap air sebesar 12 sampai 16% dari beratnya. Kedua ujung saluran masuk dan

keluar komponen berisi elemen penyaring dengan ujung yang di hubungkan secara permanen.

iii. *Accumulator*

Berfungsi sebagai komponen pengaman sistem, *accumulator* berfungsi untuk mencegah cairan *refrigerant* mengalir melewati saluran hisap dan memasuki kompresor. Masuknya cairan *refrigerant* kedalam kompresor dapat menyebabkan *knocking* dan mengakibatkan kerusakan. Cairan *refrigerant* yang memasuki *accumulator* akan diuapkan untuk menjamin saluran masuk yang menuju kompresor berisi uap.

iv. *Sight glass*

*Sight glass* pada umumnya dipasang pada saluran yang mengandung cairan *refrigerant* untuk mendeteksi adanya gelembung secara visual serta menganalisa kondisi sistem. Pada bagian atas komponen ini biasanya terdapat tanda berupa warna yang mengindikasikan kondisi *refrigerant* pada saat melewati *sight glass*. Terdapat dua macam cara menyambung komponen ini yaitu dengan *soldering* atau baut pada kedua ujungnya dimana pada cara yang pertama pipa dibuat lebih panjang untuk menghindari kerusakan akibat pemanasan kaca saat pemasangan.

v. *Shut-off valve*

Katup ini berfungsi untuk mengatur besarnya tekanan pada saluran yang juga bisa dipakai untuk menghentikan suatu bagian sistem tertentu yang dalam desain dipisahkan dengan *shut-off valve* tanpa mengganggu sistem yang lain. Katup yang biasanya digerakkan dengan tangan ini harus tahan terhadap korosi, operasi yang berulang-ulang tanpa menimbulkan kebocoran.

vi. *Check valve*

*Check valve* merupakan komponen yang sangat penting dalam sistem refrigerasi dimana katup ini berfungsi untuk mencegah aliran cairan atau uap *refrigerant* dari arah aliran yang salah. Dalam hal *check valve* harus terhindar

dari kebocoran melalui penggunaan seal yang benar sehingga kebocoran *refrigerant* pada aliran sesuai dengan yang diinginkan dapat dihindari. Katup ini juga harus memiliki respon buka yang baik karena jika terjadi hambatan dalam proses kerjanya maka katup bisa berfungsi sebagai *throttling* dikarenakan adanya *pressure drop* yang cukup besar.

vii. *Pressure gauge*

Berfungsi untuk mengukur tekanan yang melewati saluran *refrigerant* yang berfungsi sebagai indikator untuk mengetahui keadaan sistem selama siklus berlangsung. Pada umumnya satuan tekanan dalam *pressure gauge* menggunakan *pounds per square inch* diatas tekanan atmosfer (psig atau psi) dimana tekanan nol pada *pressure gauge* menunjukkan tekanan satu atmosfer atau 14.7 psia. Dalam hal tertentu terdapat alat ukur yang juga mendeteksi tekanan vakum yang menunjukkan tekanan nol absolut.

#### II.3.4. Sistem Refrigerasi Serbaguna

Dalam beberapa penerapannya, terkadang sistem refrigerasi dibutuhkan untuk mengubah lebih dari satu temperatur sehingga diperlukan katup pengatur lebih dari satu dengan kompresor yang berbeda untuk setiap evaporator dengan operasi temperatur yang berbeda pula sehingga hal ini dapat menambah kerumitan sistem dan kurang ekonomis. Untuk mengatasi hal ini diperlukan suatu rancangan yang lebih praktis dan ekonomis dengan mengarahkan aliran *refrigerant* dari evaporator menuju ke kompresor untuk kemudian dikompresikan ke seluruh sistem refrigerasi seperti contoh berikut:

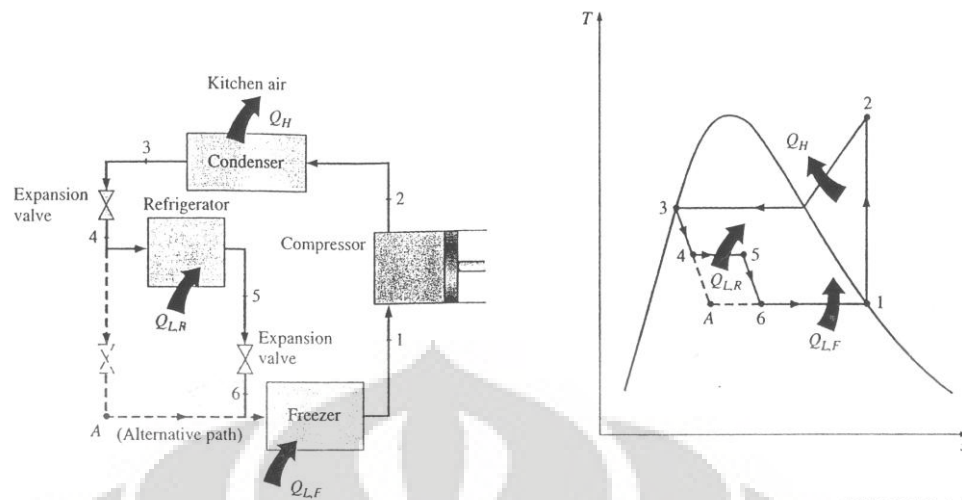


FIGURE 10-14 Schematic and  $T$ - $s$  diagram for a refrigerator-freezer unit with one compressor.

Gambar 2.3.3.1. Contoh sistem refrigerasi serbaguna [5]

#### II.4. Proses perpindahan kalor

Merupakan proses terjadinya perpindahan energi berbentuk kalor yang merambat dari benda bertemperatur tinggi ke benda yang memiliki temperatur lebih rendah melalui cara dan media tertentu yang umumnya dikenal dengan perpindahan kalor secara konduksi, konveksi maupun radiasi.

##### II.4.1. Radiasi dalam ruang-kurung

Merupakan proses perpindahan kalor yang terjadi dimana suatu permukaan perpindahan kalor yang memiliki suhu  $T_1$  yang seluruhnya terkurung oleh permukaan lain yang jauh lebih luas yang berada pada suhu  $T_2$  maka pertukaran radiasi netto dalam hal ini dapat diperhitungkan dengan rumus:

$$q = \varepsilon_1 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) \dots\dots\dots 2.3.2.1$$

(ref.[10] hal 14)

Dimana:

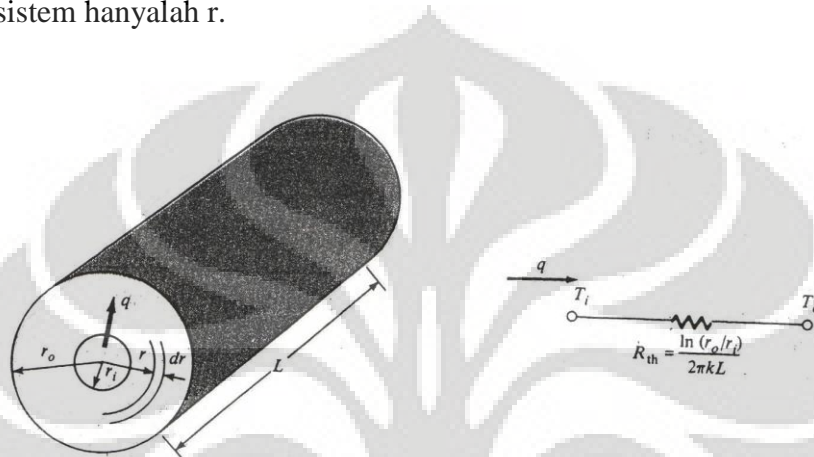
$\varepsilon_1$  = emisifitas bahan

$\sigma$  = konstanta Stefan-Boltzmann sebesar  $5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

$A_1$  = Luas permukaan ( $\text{m}^2$ )

#### II.4.2. perpindahan kalor dalam sistem radial

Bila suatu silinder panjang dengan jari-jari dalam  $r_i$ , jari-jari luar  $r_o$ , dan panjang  $L$  seperti pada gambar 2.4.1. dimana silinder ini mengalami beda suhu  $T_i-T_o$ . dengan perbandingan panjang silinder dengan diameter yang sangat besar maka dapat diandaikan bahwa aliran kalor berlangsung menurut arah radial sehingga koordinat ruang yang diperlukan untuk menentukan sistem hanyalah  $r$ .



Gambar 2.4.1. aliran kalor satu dimensi melalui silinder bolong dengan analogi listrik

Dengan menyesuaikan luasan maka dari Hukum Fourier didapatkan persamaan:

$$q = \frac{2\pi kL (T_i - T_o)}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \dots\dots\dots 2.3.2.1$$

(ref.[10] hal 30)

#### II.5. Aloe Vera

Lidah buaya dikenal sebagai adalah jenis tanaman dimungkinkan berasal dari Afrika Utara, Kepulauan Canary dan Tanjung Verde. Lidah buaya tumbuh dalam daerah dengan iklim kering yang tersebar secara luas di Afrika dan daerah-daerah kering lainnya. Banyak studi ilmiah tentang penggunaan lidah buaya yang telah dilakukan, namun beberapa di antaranya

saling bertentangan. Meskipun demikian, ada beberapa bukti bahwa ekstrak lidah buaya berguna dalam perawatan diabetes dan lipid darah tinggi pada manusia. Efek positif ini diperkirakan karena keberadaan senyawa seperti polisakarida, mannans, anthraquinones dan lektin.

#### II.4.1. Kandungan Mineral

Lidah buaya mempunyai kandungan zat gizi yang diperlukan tubuh dengan cukup lengkap, yaitu vitamin A, B1, B2, B3, B12, C, E, choline, inositol dan asam folat. Kandungan mineralnya antara lain terdiri dari: kalsium (Ca), magnesium (Mg), potasium (K), sodium (Na), besi (Fe), zinc (Zn), dan kromium (Cr). Beberapa unsur vitamin dan mineral tersebut dapat berfungsi sebagai pembentuk antioksidan alami, seperti vitamin C, vitamin E, vitamin A, magnesium, dan zinc. Antioksidan ini berguna untuk mencegah penuaan dini, serangan jantung, dan berbagai penyakit degeneratif. Bubur aloe vera merupakan cairan yang sangat encer dengan kekentalan seragam yang mengandung 96% sampai 97% air.

#### II.4.2. Manfaat

Lidah buaya merupakan tanaman yang sangat bermanfaat untuk kesehatan kulit, sistem metabolisme, dan energi tubuh. Khasiat yang terkandung dalam lidah buaya atau aloe vera yang antara lain; sebagai antioksidan alami, memperlancar fungsi pencernaan, sebagai antibiotik dan antiseptik alami sebagai penghilang rasa sakit, melindungi kulit dari dehidrasi dan menjaga kelembaban kulit.

Aloe vera juga digunakan untuk pengobatan macam-macam penyakit seperti; ambeien, sembelit, batuk, penurunan kadar gula darah, radang tenggorokan, diabetes mellitus, menyembuhkan kulit yang luka dan mengatasi jerawat. Dalam dunia kecantikan, aloe vera digunakan untuk menyuburkan rambut, menghaluskan wajah, mengencangkan kulit dan memperlambat penuaan. Lidah buaya sudah sejak ribuan tahun silam dimanfaatkan.



## **BAB III**

### **PERANCANGAN ALAT**

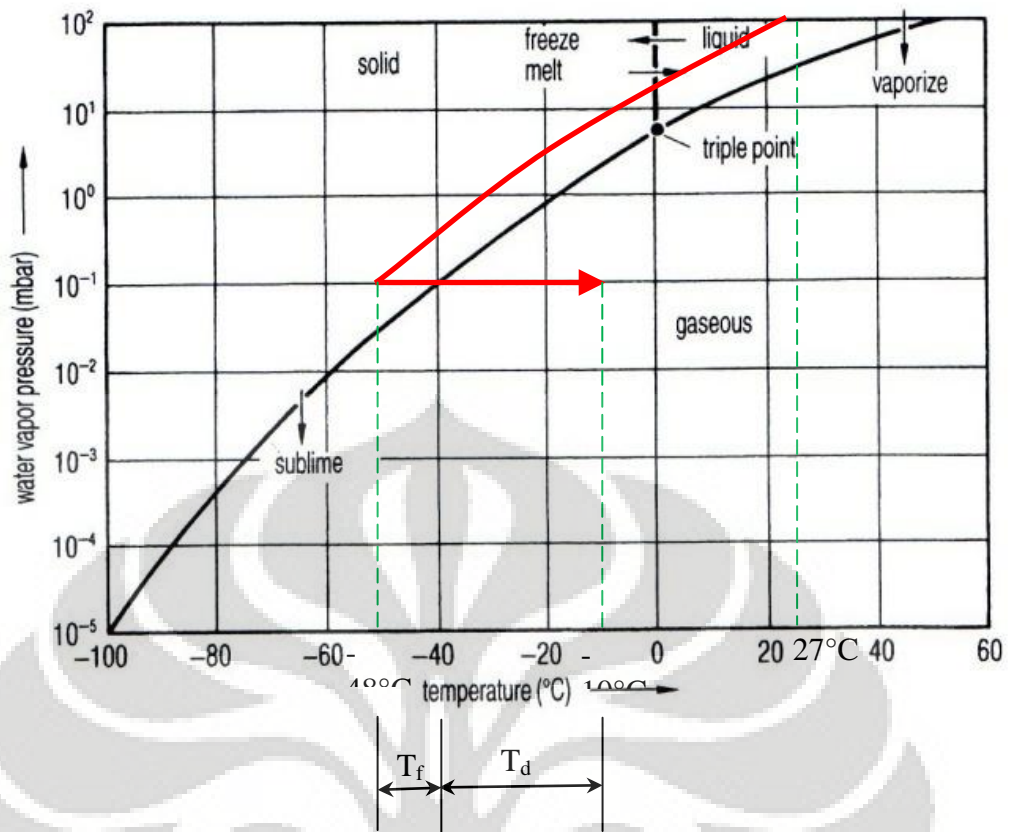
#### III.1. Parameter perancangan

##### III.1.1. Proses pengeringan beku

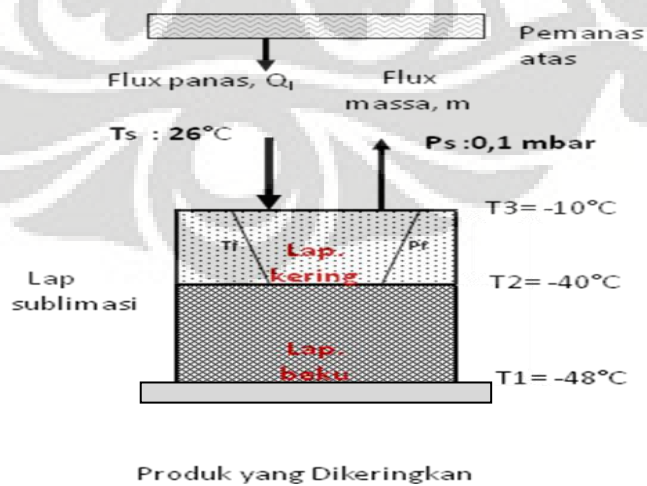
Dalam proses perancangan ini berkaitan dengan kondisi proses pengeringan beku baik tekanan dan temperatur awal sampai tekanan dan temperature akhir proses. Kebutuhan proses ini akan menjadi masukan dalam perancangan alat pengering beku vakum produk aloe vera.

Proses pengeringan beku vakum itu sendiri mengacu pada diagram tekanan dan temperatur air dimana pada kondisi awal produk berada pada tekanan dan temperatur atmosfer (1013,25 mbar dan 27°C) untuk kemudian dilakukan proses penvakuman dengan pompa vakum hingga mencapai tekanan 0,1 mbar. Berdasarkan garis proses pada gambar 3.1.1 maka pada tekanan tersebut produk akan mengalami penurunan temperatur hingga -48°C dimana pada tekanan dan temperatur tersebut kemudian dilakukan proses pemanasan ruang pengering dengan mengalirkan refrigeran dari kompresor ke pemanas yang terdapat pada ruang pengering. Dengan pemanasan tersebut diharapkan temperatur permukaan produk akan melewati garis sublimasi yang dalam hal ini berada pada titik -40°C hingga temperatur -10°C yang berada pada permukaan produk sebagai temperatur target untuk mencapai laju pengeringan yang cukup selama proses pengeringan beku berlangsung. Perbedaan temperatur antara permukaan sublimasi dengan permukaan produk menggambarkan perbedaan temperatur pada lapisan kering produk dimana dengan perbedaan yang semakin besar (sejauh masih dalam batasan yang disyaratkan) maka laju aliran uap air dari lapisan sublimasi saat melewati lapisan kering akan semakin lancar sehingga proses pengeringan dapat berjalan dengan lancar. Adapun diagram tekanan dan temperatur proses pembekuan dapat dilihat pada gambar sebagai berikut:





Gambar 3.1.1. Diagram proses pengeringan beku aloe vera  
 Dari diagram diatas jika diaplikasikan pada gambar produk yang akan dikeringkan akan didapatkan proses perpindahan panas dari dasar produk (temperatur yang merupakan fungsi tekanan ruang) hingga temperatur sublimasi dan temperatur permukaan produk seperti gambar 3.1.2 dibawah ini.



Gambar 3.1.2. Kondisi produk beku dalam ruang pengering

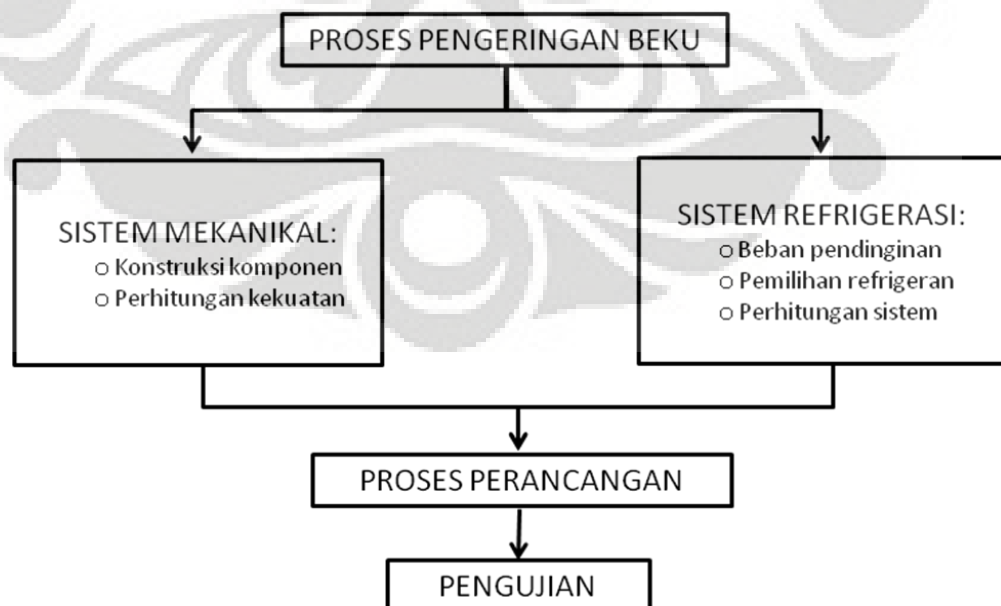
### III.1.2. Produk spesimen

Produk uji adalah aloe vera dengan kandungan air berkisar 98% yang ditempatkan dalam suatu wadah silinder dengan diameter 13 cm dan ketinggian aloe vera 2 cm sehingga mempunyai luasan kontak dengan ruang pengering sebesar  $0,0133 \text{ m}^2$  dan volume total air  $0,000265 \text{ m}^3$ . Dengan volume specimen tersebut didapatkan volume air yang terkandung sebesar  $0,000259 \text{ m}^3$  dengan massa 0,26 kg. Aloe vera tersebut kemudian dikeringkan dengan target kandungan sisa air sebesar 3% sehingga volume total yang akan disublimasikan selama proses sebesar 0,247 kg.

## III.2. Proses perancangan sistem mekanikal

### III.2.1. Diagram alir proses perancangan

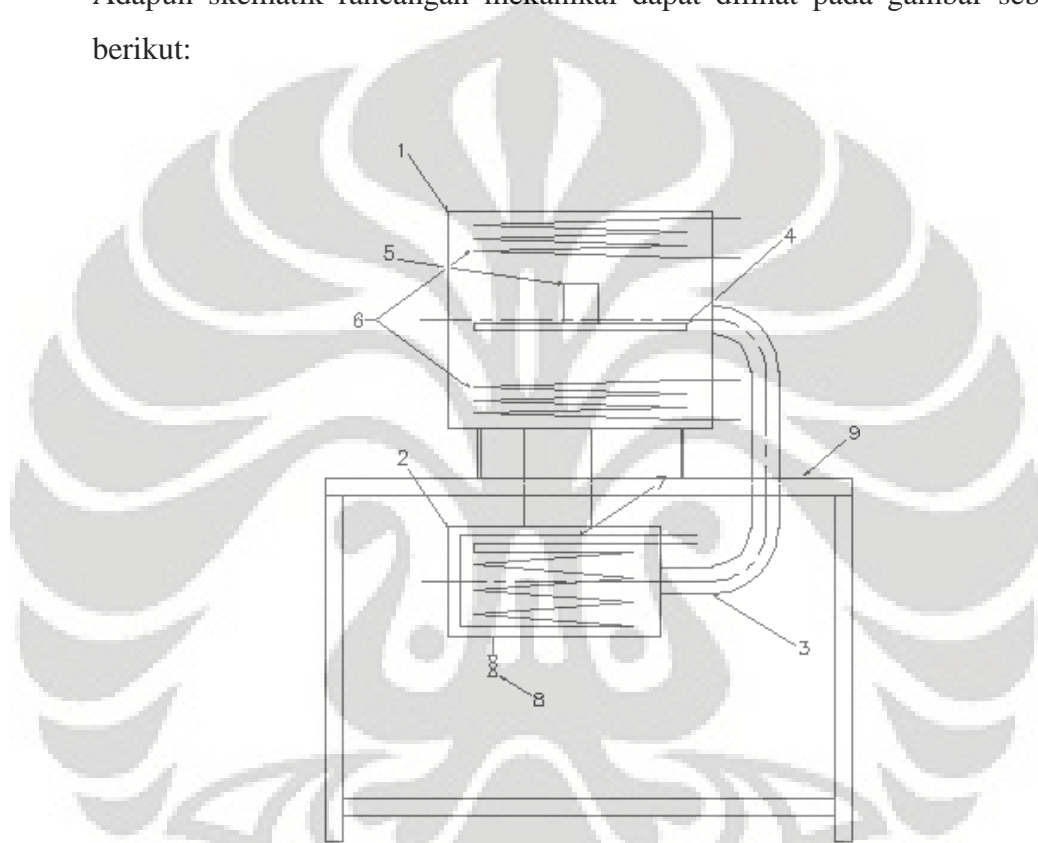
Dalam hal ini tahapan perancangan dibagi menjadi dua yaitu proses pembuatan ruang pengering dan sistem refrigerasi sebagai sumber pendinginan evaporator dalam ruang perangkap uap (cold trap) serta sebagian energi panas yang akan digunakan untuk memanaskan ruang pengering selama proses sublimasi. Adapun gambar diagram alir tersebut adalah sebagai berikut:



Gambar 3.2.1. Diagram alir perancangan alat

### III.2.2. Skematik rangkaian mekanikal sistem pengering

Komponen utama alat pengering beku yang dirancang mengacu pada prinsip dasar proses yang terdapat pada buku *Freeze Drying* (Georg-Wilhelm Oetjen, Peter Haseley) mengenai pola aliran uap air selama pengeringan yang kemudian perletakan dan dimensinya disesuaikan dengan pengoperasian di labolatorium pendingin departemen teknik mesin Universitas Indonesia. Adapun skematik rancangan mekanikal dapat dilihat pada gambar sebagai berikut:



Gambar 3.2.2. Skematik komponen utama pengering beku (gambar simetris)

Keterangan:

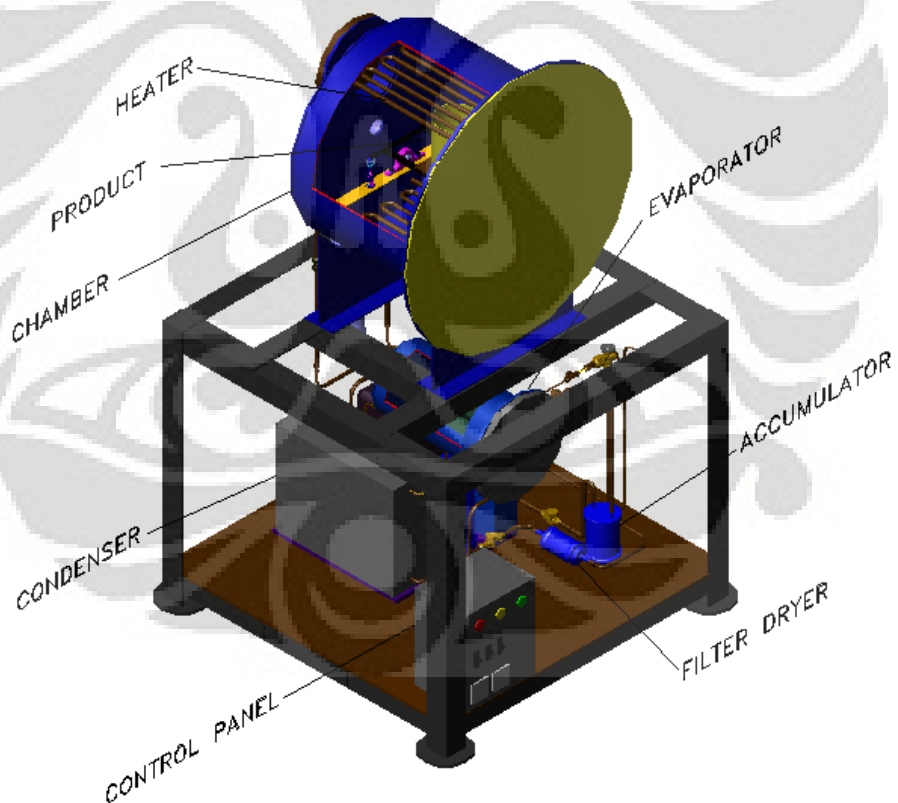
1. Ruang pengering
2. Ruang perangkap uap
3. Pipa penghubung
4. Tumpuan produk
5. Produk

6. Pemanas Atas dan bawah
7. Pipa evaporator
8. Katup penghubung pompa vakum
9. Rancangan penumpu alat

### III.2.3. Perhitungan Kekuatan

#### III.2.3.1. Gambar rancangan mesin pengering

Sebelum perancangan alat dilakukan proses perancangan (desain) menggunakan software AutoCAD untuk mendapatkan kesesuaian antara ukuran komponen alat yang diperkirakan akan digunakan dalam merancang alat pengering beku vakum. Gambar desain tersebut dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 3.2.3. Desain alat

Dari gambar rancangan kemudian dilakukan perhitungan komponen-komponen utama alat yang menjadi pertimbangan utama, diantaranya tabung pengering, tabung perangkap uap, kekuatan batang penumpu dan rangkaian pengikat baut yang diperlukan.

### III.2.3.2. Perhitungan tabung vakum

#### 1. Ruang Pengering

Ruang pengering dirancang dengan mempertimbangkan faktor teknis, operasional maupun pengembangan proses pengujian beku vakum kedepan diantaranya:

- a. Dalam perancangan awalnya, ruang pengering diharapkan bisa menampung mekanisme penggetar produk specimen dengan rancangan yang masih dalam tahap pengembangan sehingga diperlukan ruang yang mencukupi.
- b. Ruang pengering diperkirakan dapat menampung dimensi produk yang lebar yang diperkirakan menjadi parameter yang dipertimbangkan dalam pengujian pengeringan beku vakum.
- c. Pemasangan sistem instrumentasi sebagai input parameter proses memerlukan ruang yang memadai sehingga diperlukan dimensi yang besar.

Dengan pertimbangan tersebut diatas maka dalam hal direncanakan ruang pengering yang akan dibuat dari tabung dengan diameter 24” dari bahan yang tahan karat sehingga dipilih pipa *galvanized* dengan panjang 50 cm.

Adapun perhitungan kekuatan yang diperlukan dalam perancangan tabung pengering adalah besarnya kebutuhan tebal dinding sehingga tidak terjadi kerusakan dengan tekanan operasi yang dikenakan sesuai proses. Perhitungan tersebut dapat menggunakan rumus tegangan sebagai berikut:

$$f_c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots 2.2.1$$

Dimana:

$P$  = Gaya yang bekerja pada dinding tabung (N)

$A$  = Luasan ketebalan dinding tabung ( $m^2$ )

Gaya yang bekerja pada dinding tabung merupakan gaya yang ditimbulkan oleh perbedaan tekanan antara bagian luar dan dalam tabung yang bekerja pada sepanjang luasan tepi luar tabung sehingga didapatkan:

$F = \text{Intensity of pressure} \times \text{projected area}$

Besarnya gaya tersebut ditahan oleh dua sisi tabung sehingga dari pertimbangan diatas maka besarnya tegangan pada dinding tabung dapat dihitung sebagai berikut:

$$f_c = \frac{p \cdot \pi \cdot d \cdot L}{2 \cdot t \cdot L}$$

Dimana:

$p$  = Tekanan yang bekerja ( $N/m^2$ )

$d$  = Diameter luar tabung (m)

$L$  = Panjang tabung (m)

$T$  = Ketebalan dinding tabung yang diperlukan (m)

Tegangan tersebut harus lebih kecil dibandingkan dengan tegangan luluh ( $\sigma_f$ ) yang mampu ditahan oleh material, sehingga:

$$f_c \leq \sigma_f$$

Dengan menganggap bahwa terjadi dinamika perubahan tekanan pada proses vakum maka beban dianggap dinamis dengan faktor keamanan sebesar 8 dan bahan dari As-rolled yang memiliki tegangan luluh sebesar 346 Mpa ( $3,46 \times 10^8 N/m^2$ ) dengan jari-jari 24'' (0,6096 m) maka ketebalan dinding dapat dihitung dengan:

$$\frac{p \cdot \pi \cdot d}{2t} \leq \frac{\sigma_f}{8}$$

$$t \geq \frac{8 \cdot p \cdot \pi \cdot d}{2\sigma_f}$$

$$t \geq \frac{8 \cdot 10,132 \times 10^4 \cdot 3,14 \cdot 0,6216}{2,346 \times 10^8}$$

$$t \geq 2,286 \times 10^{-3} m$$

$$t \geq 2,286 mm$$

Dari perhitungan didapat bahwa ketebalan minimum dinding masih lebih kecil dari perancangan alat sehingga dapat disimpulkan aman karena ketebalan pipa yang didapatkan sebesar 6 mm.

## 2. Ruang Evaporator

Ruang evaporator saling berhubungan dengan ruang pengering sehingga dapat diasumsikan mendapatkan perlakuan mekanik yang sama sehingga dengan bahan yang sama dan diameter sebesar 8" (0,2032 m) ketebalam material dapat dihitung sebagai berikut:

$$t \geq \frac{8 \cdot p \cdot \pi \cdot d}{2\sigma_f}$$

$$t \geq \frac{8 \cdot 10,132 \times 10^4 \cdot 3,14 \cdot 0,2132}{2,346 \times 10^8}$$

$$t \geq 7,841 \times 10^{-4} m$$

$$t \geq 0,784 mm$$

Dari perhitungan didapat bahwa ketebalan minimum dinding masih lebih kecil dari perancangan alat sehingga dapat disimpulkan aman karena ketebalan pipa yang didapatkan sebesar 6 mm.

### III.2.3.3. Perancangan rangkaian penumpu

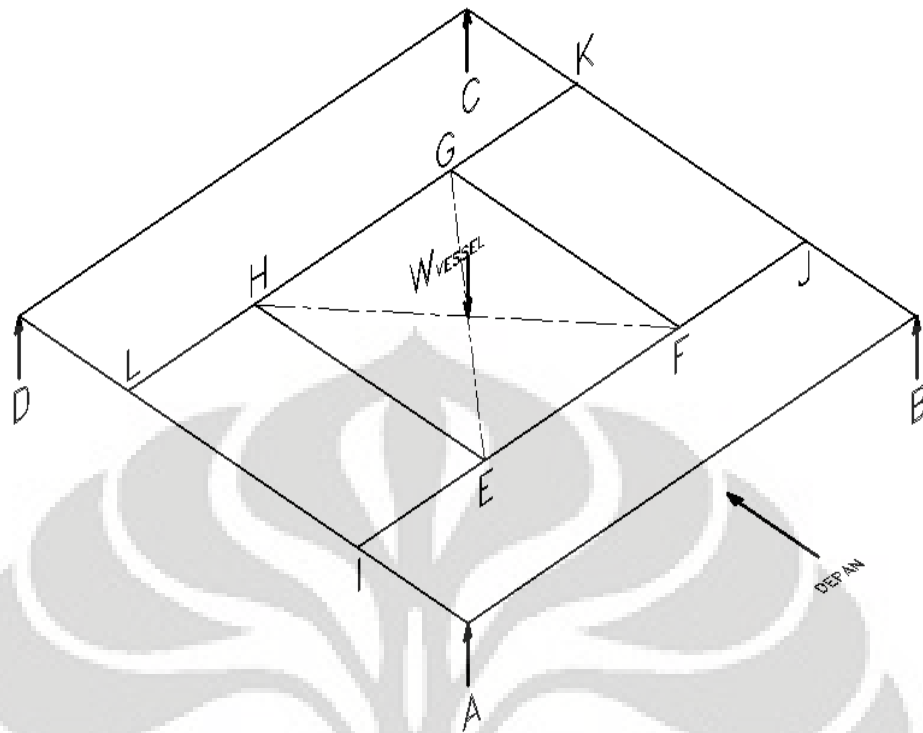
#### 1. Reaksi keseluruhan penumpu atas

Dalam perancangan sistem penumpu, dilakukan penyederhanaan sesuai dengan gambar perancangan sebagai berikut:

- Tabung pengering dan perangkat uap merupakan satu kesatuan yang dihubungkan dengan suatu support gantung sehingga posisi tabung perangkat uap menggantung pada tabung pengering sehingga beban tabung merupakan gabungan keduanya. Tabung tersebut kemudian disupport oleh dua plat pada bagian bawah tabung pengering terhadap rangkaian penumpu
- Perletakan tabung simetris terhadap rangkaian penumpu sehingga perhitungan kekuatan dapat dilakukan dengan meninjau batang yang mendapat pembebanan sejenis.
- Titik dimana terjadi tegangan maupun momen maksimum yang didapat melalui perhitungan reaksi gaya internal dijadikan sebagai acuan dalam menentukan dimensi batang penumpu yang dibutuhkan.
- Dalam perancangan ini tidak mempertimbangkan faktor lendutan yang dimungkinkan terjadi pada batang-batang horizontal dan mengabaikan gaya berat batang.
- Sebelum dilakukan perhitungan pada batang yang ditinjau, dilakukan penyederhanaan gambar sedemikian rupa dengan notasi titik-titik yang diperlukan untuk mempermudah perhitungan.

Dari gambar rancangan dapat dilakukan rangkaian penumpuan beban oleh support sebagai berikut:





Gambar 3.2.4. Reaksi gaya-gaya pada support atas

## 2. Perhitungan beban

Beban yang bekerja pada penumpu merupakan beban statis yang ditimbulkan oleh gaya berat tabung pengering dan tabung perangkap uap yang menggunakan bahan *steel* dengan densitas  $9130 \text{ Kg/m}^3$  sehingga dapat diperhitungkan sebagai berikut:

a. Tabung 24"

o Massa silinder:

$$m = \rho \times V$$

Dimana:

$V$  = volume ( $\text{m}^3$ ), yang dapat dihitung sebagai berikut:

$$V = \left[ \frac{\pi}{4} \times d_o^2 - \frac{\pi}{4} \times d_i^2 \right] L$$

$d_i$  = diameter dalam (0,6096 m)

$d_o$  = diameter luar (0,6096m+0,012m)

$L$  = panjang silinder (0,5 m)

Sehingga didapatkan:

$$V = \left[ 0,785 \times 0,6216^2 - 0,785 \times 0,6096^2 \right] 0,5$$

$$V = 5,798 \times 10^{-3} m^3$$

$$m = 9130 \frac{Kg}{m^3} \times 5,798 \times 10^{-3} m^3$$

$$m = 52,944 Kg$$

- o Tutup belakang ( tebal 8mm)

$$m = \rho \times V$$

$$V = \frac{\pi}{4} \times d_o^2 \times L$$

$$V = 0,785 \times 0,6096^2 \times 0,008$$

$$V = 2,336 \times 10^{-3} m^3$$

$$m = 9130 \frac{Kg}{m^3} \times 2,336 \times 10^{-3} m^3$$

$$m = 21,32 Kg$$

- o Flange (diameter luar 80 cm dan tebal 8mm)

$$m = \rho \times V$$

$$V = \left[ \frac{\pi}{4} \times d_f^2 - \frac{\pi}{4} \times d_i^2 \right] L$$

$d_f$  = diameter luar flange (0,8 m)

$$V = \left[ 0,785 \times 0,8^2 - 0,785 \times 0,6216^2 \right] \times 0,008$$

$$V = 1,685 \times 10^{-3} m^3$$

$$m = 9130 \frac{Kg}{m^3} \times 1,685 \times 10^{-3} m^3$$

$$m = 15,38 Kg$$

- o Pintu penutup (tebal 5mm)

$$m = \rho \times V$$

$$V = \frac{\pi}{4} \times d_f^2 \times L$$

$$V = 0,785 \times 0,8^2 \times 0,005$$

$$V = 2,512 \times 10^{-3} m^3$$

$$m = 9130 \frac{Kg}{m^3} \times 2,512 \times 10^{-3} m^3$$

$$m = 22,93 Kg$$

- b. Tabung 8"

Dengan komponen yang sama dengan tabung pengering dan dimensi yang berbeda didapatkan:

- o Massa silinder (tebal 5mm)

$$m = \rho \times V$$

$$V = \left[ \frac{\pi}{4} \times d_o^2 - \frac{\pi}{4} \times d_i^2 \right] L$$

$d_i$  = diameter dalam (0,2032 m)

$d_o$  = diameter luar (0,2032m+0,01m)

$L$  = panjang silinder (0,4 m)

Sehingga didapatkan:

$$V = \left[ 0,785 \times 0,2132^2 - 0,785 \times 0,2032^2 \right] \times 0,4$$

$$V = 1,307 \times 10^{-3} \text{ Kg}$$

$$m = 9130 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \left( 1,307 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \right)$$

$$m = 11,937 \text{ Kg}$$

- o Tutup belakang (tebal 5mm)

$$m = \rho \times V$$

$$V = \left[ \frac{\pi}{4} \times d_i^2 \right] L$$

$$V = \left[ 0,785 \times 0,2032^2 \right] \times 0,005$$

$$V = 1,62 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$m = 9130 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \left( 1,62 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \right)$$

$$m = 1,47 \text{ Kg}$$

- o Flange (lebar sisi 5cm dan tebal 5mm)

$$m = \rho \times V$$

$$V = \left[ \frac{\pi}{4} \times d_f^2 - \frac{\pi}{4} \times d_i^2 \right] L$$

$$V = \left[ \frac{\pi}{4} \times 0,3032^2 \right] - \left[ \frac{\pi}{4} \times 0,2032^2 \right] \times 0,005$$

$$V = 1,978 \times 10^{-4} m^3$$

$$m = 9130 \frac{kg}{m^3} \times (1,978 \times 10^{-4} m^3)$$

$$m = 1,814 kg$$

c. Saluran penghubung (pipa 2" dan tebal 3mm dengan panjang total 0,898m)

$$m = \rho \times V$$

$$V = \left[ \frac{\pi}{4} \times d_o^2 \right] - \left[ \frac{\pi}{4} \times d_i^2 \right] \times L$$

$$V = \left[ \frac{\pi}{4} \times 0,057^2 \right] - \left[ \frac{\pi}{4} \times 0,05^2 \right] \times 0,898$$

$$V = 4,483 \times 10^{-4} m^3$$

$$m = 9130 \frac{kg}{m^3} \times (4,483 \times 10^{-4} m^3)$$

$$m = 4,093 kg$$

d. Penumpu dan massa produk specimen

Dalam hal ini diperkirakan massa yang dimiliki komponen-komponen dalam tabung pengering sebesar 3 kg.

Dari perhitungan diatas didapatkan massa total beban yang bekerja pada sistem penumpu sebesar 134,88 kg. Dengan toleransi sebesar 10% maka massa yang dalam diperhitungkan sebesar 148,367 kg. Dengan beban total tabung tersebut maka gaya berat yang ditimbulkan sebesar:

$$W_{ves} = m \times g$$

$$W_{ves} = 148,367Kg \times 9,8 \frac{m}{s^2} = 1454N$$

### 3. Tumpuan I-J

#### ○ Reaksi Tumpuan

$$\begin{array}{l} M \\ + \curvearrowright \end{array} \quad \sum M_J = 0$$

$$\sum M_J = -I_y \cdot 1 + 727 \cdot 0,5 = 0$$

$$I_y = 363,5N$$

$$\begin{array}{l} y \\ + \uparrow \end{array} \quad \sum F_y = 0$$

$$\sum F_y = 363,5 - 727 + J_y = 0$$

$$J_y = 363,5N$$

#### ○ Reaksi Gaya Internal a-a

$$\begin{array}{l} y \\ + \uparrow \end{array} \quad \sum F_y = 0$$

$$\sum F_y = 363,5 - V_{a-a} = 0$$

$$V_{a-a} = 363,5N$$

$$\begin{array}{l} M_{a-a} \\ + \curvearrowright \end{array} \quad \sum M_{a-a} = -363,5 \cdot x_1 + M_{a-a} = 0$$

$$M_{a-a} = 363,5x_1$$

$$\rightarrow x_1 = 0; M_{a-a} = 0$$

$$x_1 = 0,5; M_{a-a} = 181,75Nm$$

o Reaksi Gaya Internal b-b

$$\begin{array}{l} y \\ + \uparrow \end{array} \quad \sum F_y = 0$$

$$\sum F_y = 363,5 - 727 - V_{b-b} = 0$$

$$V_{b-b} = -363,5N$$

$$\begin{array}{l} Mb-b \\ + \curvearrowright \end{array} \quad \sum M_{b-b} = -363,5(0,5 + x_2) + 727 \cdot x_2 + M_{b-b} = 0$$

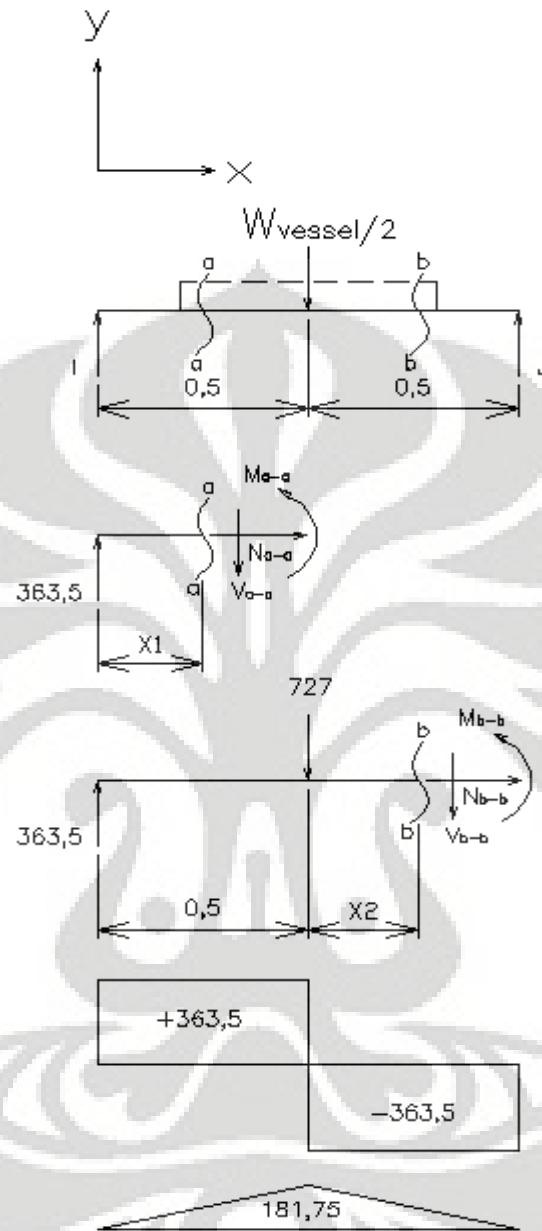
$$\sum M_{b-b} = -181,75 - 363,5x_2 + 727 \cdot x_2 + M_{b-b} = 0$$

$$M_{b-b} = 181,75 - 363,5 \cdot x_2$$

$$\rightarrow x_2 = 0; M_{b-b} = 181,75Nm$$

$$\rightarrow x_2 = 0,5; M_{b-b} = 0Nm$$

- o Grafik Reaksi Gaya



Gambar 3.2.5. Grafik gaya dan momen dalam batang I-J

#### 4. Tumpuan A-D

- o Reaksi Tumpuan

$$+ \curvearrowright \sum M_A = 0; D_y \cdot 1 - 363,5 \cdot 0,72 - 363,5 \cdot 0,28 = 0$$



$$D_y = 363,5N$$

$$+\uparrow \sum F_y = 0; A_y \cdot -363,5 - 363,5 + 363,5 = 0$$

$$A_y = 363,5N$$

o Reaksi Gaya Internal a-a

$$+\uparrow \sum F_y = 0; 363,5 - V_{a-a} = 0$$

$$V_{a-a} = 363,5N$$

$$+\curvearrowright \sum M_{a-a} = 0; -363,5x_1 + M_{a-a} = 0$$

$$M_{a-a} = 363,5 \cdot x_1$$

$$\rightarrow x_1 = 0; M_{a-a} = 0$$

$$x_1 = 0,28; M_{a-a} = 101,78N$$

o Reaksi Gaya Internal b-b

$$+\uparrow \sum F_y = 0; 363,5 - 363,5 - V_{b-b} = 0$$

$$V_{b-b} = 0$$

$$+\curvearrowright \sum M_{b-b} = 0; -363,5(0,28 + x_2) + 363,5 \cdot x_2 + M_{b-b} = 0$$

$$\sum M_{b-b} = 0; -101,78 - 363,5x_2 + 363,5 \cdot x_2 + M_{b-b} = 0$$

$$M_{b-b} = 101,78Nm$$

o Reaksi Gaya Internal c-c

$$\begin{array}{c}
 y \\
 + \uparrow
 \end{array}
 \sum F_y = 0; 363,5 - 363,5 - 363,5 - V_{c-c} = 0$$

$$V_{c-c} = -363,5N$$

M<sub>c-c</sub>

+ ↷

$$\sum M_{c-c} = 0; -363,5(0,72 + x_3) + 363,5(0,44 + x_3) + 363,5 \cdot x_3 + M_{c-c} = 0$$

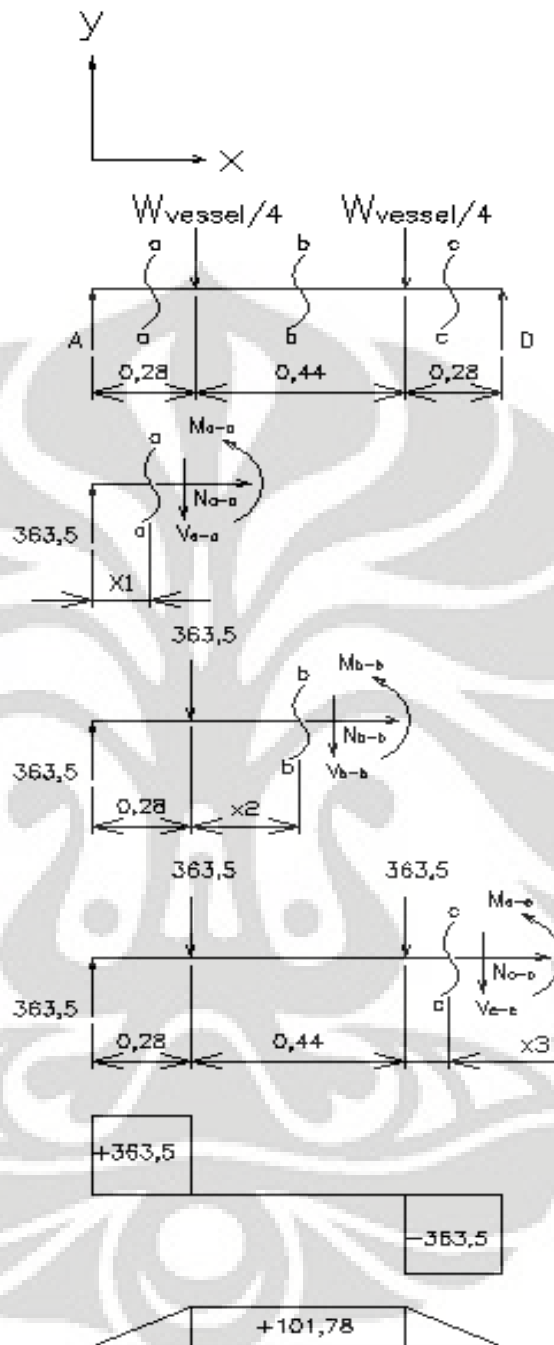
$$\sum M_{c-c} = 0; -261,72 - 363,5x_3 + 159,94 + 363,5x_3 + 363,5 \cdot x_3 + M_{c-c} = 0$$

$$\sum M_{c-c} = 0; -101,78 + 363,5x_3 + M_{c-c} = 0$$

$$\rightarrow x_3 = 0; M_{c-c} = 101,78Nm$$

$$\rightarrow x_3 = 0,28; M_{c-c} = 0$$

o Grafik Reaksi Gaya



Gambar 3.2.6. Grafik gaya dan momen dalam batang A-D

Dari hasil perhitungan diatas didapatkan bahwa tegangan geser maupun momen gaya yang terbesar terdapat pada tumpuan I-J yakni sebesar  $2 \times 363,5$  N dan 181,75 Nm. Dari tegangan geser yang terjadi pada batang yang telah

diketahui dapat ditentukan besarnya luasan batang yang diperlukan sesuai dengan beban yang bekerja dengan melakukan perhitungan sebagai berikut:

- o Luas penampang batang penumpu

Dengan jenis pembebanan statis maka digunakan faktor keamanan sebesar 8 dan bahan ST37 yang memiliki tegangan luluh sebesar 340 N/mm<sup>2</sup> didapatkan perhitungan sebagai berikut:

$$f_s = \frac{P}{A} \dots\dots\dots 2.2.6$$

$$f_s < \sigma_f$$

$$\frac{P}{A} \leq \frac{\sigma_f}{8}$$

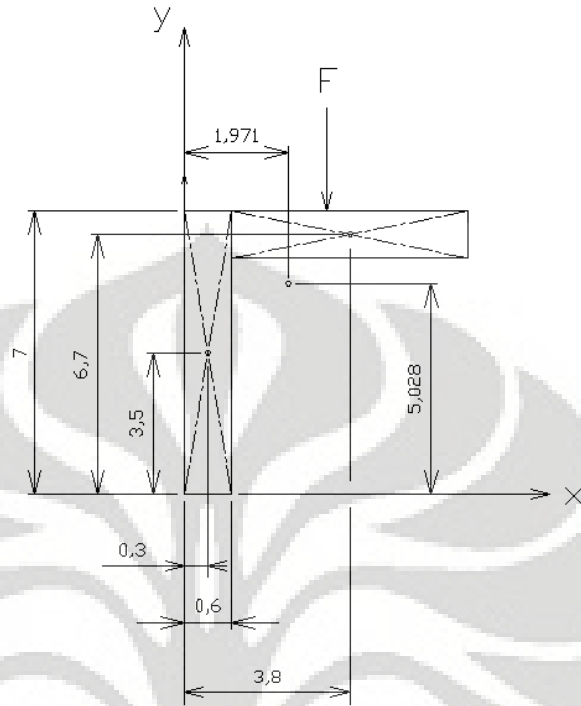
$$A \geq \frac{8 \times 727 N}{340 N/mm^2} \geq 17,105 mm^2$$

Luasan diatas merupakan nilai minimum yang diperlukan sebagai acuan dalam memilih besi siku sebagai support kedua tabung vakum. Selanjutnya adalah menentukan dimensi besi siku dengan mengacu pada ketersediaan barang dimana ukuran besi siku terkecil adalah 20x20x3 mm dengan luasan 112 mm<sup>2</sup>. Dengan demikian dengan besi siku tersebut telah mampu menumpu tabung vakum, sehingga dalam hal ini pemilihan besi siku lebih didasarkan pada kesesuaian dimensi terhadap tabung, untuk itu dipilih besi siku dengan dimensi 70x70x6 mm dengan luas 813 mm<sup>2</sup> sehingga dipastikan aman.

- o Momen bending

Sebelum melakukan perhitungan momen pada batang siku L dengan dimensi 70x70x6 terlebih dahulu menentukan titik centroid serta memperhitungkan momen inersia batang sebagai berikut:

Titik Centroid (x,y)



Gambar 3.2.7. Skematik dan letak titik *centroid* batang

$$C_x = \frac{\sum A_i x_i}{\sum A_i}$$

$$C_x = \frac{1 \times 0,6 \cdot 0,3 + 6,4 \times 0,6 \cdot 3,8}{1 \times 0,6 + 6,4 \times 0,6}$$

$$C_x = \frac{15,852}{8,04} = 1,971 \text{ cm} = 0,0197 \text{ m}$$

$$C_y = \frac{\sum A_j x_j}{\sum A_j}$$

$$C_y = \frac{1 \times 0,6 \cdot 3,5 + 6,4 \times 0,6 \cdot 6,7}{1 \times 0,6 + 6,4 \times 0,6}$$

$$C_y = \frac{40,428}{8,04} = 5,028\text{cm} = 0,0503\text{m}$$

Momen inersia dan luasan

Dalam hal ini momen inersia yang diperhitungkan adalah pada arah y dikarenakan gaya yang bekerja diasumsikan pada arah vertikal, sehingga:

$$I_y = I_{y1} + I_{y2}$$

$$I_y = \frac{bh_1^3}{12} + \frac{bh_2^3}{12}$$

$$I_y = \frac{0,6 \times 7^3}{12} + \frac{6,4 \times 0,6^3}{12} = 17,15\text{cm}^4$$

$$I_y = 17,15 \times 10^{-8} \text{m}^4$$

Dengan asumsi bahwa batang akan mengalami kerusakan jika melewati tegangan luluh material maka dengan penggunaan material ST37 dengan tegangan luluh 340 N/mm<sup>2</sup>, besarnya momen bending yang diijinkan dapat dihitung sebagai berikut:

$$\frac{M}{I} = \frac{f_b}{y} \dots\dots\dots 2.2.8$$

$$M = \frac{f_b I}{y} = \frac{3,4 \times 10^8 \text{ N/m}^2 \cdot 17,15 \times 10^{-8} \text{ m}^4}{0,0503\text{m}}$$

$$M = 1159,244\text{Nm}$$

$$M_{b-b} \ll M$$

Dari perhitungan didapatkan bahwa momen bending yang terjadi lebih kecil dibandingkan momen yang diijinkan sehingga rancangan aman. Hasil

perhitungan diatas sama dengan perhitungan pada batang L-K maupun B-C dikarenakan memiliki posisi yang sama terhadap beban.

#### 4. Baut tabung perangkap uap

Bagian ini berfungsi untuk menahan gaya berat yang dimiliki oleh tabung perangkap uap dengan massa 15,221 Kg sehingga memiliki gaya berat sebesar 149,166 N. Support ini telah dirancang dari plat dengan dimensi 15 cm x 8 cm dengan rancangan yang memakai baut sehingga dapat dilepas. Tahapan ini mengasumsikan beban yang ditahan oleh aman sehingga perhitungan dilakukan untuk mengetahui dimensi baut yang diperlukan dengan rumus sebagai berikut:

$$f_s = \frac{P}{A} \dots\dots\dots 2.2.7$$

$$f_s < \sigma_f$$

$$\frac{P}{A} \leq \frac{\sigma_f}{8}$$

Dimana:

$P$  = Beban support (N)

$A$  = luasan baut penahan ( $\text{mm}^2$ )

$\sigma_f$  = Tegangan luluh bahan (dalam hal ini memakai ST37 dengan tegangan luluh  $340 \text{ N/mm}^2$ ) dengan faktor keamanan 8

Sehingga didapatkan:

$$A \geq \frac{8 \times 149,166 \text{ N}}{340 \text{ N/mm}^2} \geq 3,509 \text{ mm}^2$$



Dalam perancangan digunakan baut yang berdiameter 10mm dengan jumlah 5 buah sehingga luasan total sebesar 392,5mm<sup>2</sup> sehingga dalam hal ini rancangan baut aman.

#### 5. Support utama tabung vakum

Bagian ini dibuat dari plat yang satu sisinya dibentuk sesuai dengan diameter luar ruang pengering untuk kemudian dilas. Perhitungan tegangan di fokuskan pada bagian yang memiliki tegangan maksimum yakni dengan luasan yang terkecil yang merupakan luasan tegak lurus terhadap beban (bukan pada luasan yang menempel dengan tabung yang memiliki radius). Dengan beban yang merupakan penjumlahan massa tabung pengering dan perangkat uap sebesar 1454 N dan penggunaan material ST37 serta faktor keamanan 8 didapatkan luas yang dibutuhkan:

$$f_c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots 2.2.1$$

$$f_s < \sigma_f$$

$$A \geq \frac{8 \times 1454N}{340N/mm^2} \geq 34,212mm^2$$

Dalam perancangan, untuk menyesuaikan dengan dimensi tabung digunakan plat dengan ukuran 50cm x 0,5cm sehingga memiliki luasan sebesar 2500mm<sup>2</sup>. Dengan penggunaan 2 buah support maka dapat dipastikan aman.

#### 6. Baut pengikat pada tiap kaki penumpu

perancangan obaut dalam hal ini adalah baut yang diperlukan pada rancangan support atas terhadap kaki-kaki penumpu dengan mempertimbangkan berat penumpu itu sendiri. Dengan demikian didapatkan perhitungan sebagai berikut:

$$f_s = \frac{P}{A} \dots\dots\dots 2.2.7$$

Dimana:

$A$  = luasan bidang geser ( $m^2$ )

$P$  = Gaya total yang bekerja pada masing-masing kaki (N)

$f_s$  = Tegangan geser ( $N/m^2$ )

Gaya total memperhitungkan gaya berat komponen penumpu sebagai berikut:

$$W_{sa} = m \times g$$

Dengan menggunakan plat siku L berdimensi 70x70x6 mm dan densitas 9130  $Kg/m^3$  serta panjang total yang dirancang sebesar 6,889 m dan luasan sebesar 8,13  $cm^2$  maka didapatkan:

$$W_{sa} = \rho \times V \times g$$

$$W_{sa} = \left[ \left( 8,13 \times 10^{-4} m^2 \times 6,889 m \times 9130 \frac{kg}{m^3} \right) \right] \times 9,8 \frac{m}{s^2}$$

$$W_{sa} = 501,122 N$$

Maka:

$$f_s = \frac{\left( \frac{W_{ves} \times W_{sa}}{4} \right)}{A}$$

$$f_s < \sigma_f$$

$$\frac{\left( \frac{W_{ves} \times W_{sa}}{4} \right)}{A} = \frac{\sigma_f}{8}$$

$$A \geq \frac{8 \times 488,78 N}{340 \frac{N}{mm^2}} \geq 11,5 mm^2$$

Dengan luasan minimal baut penyangga yang diperlukan pada setiap kaki adalah 11,5 mm<sup>2</sup>. Dalam prakteknya digunakan baut yang berdiameter 10 mm dengan jumlah 10 buah sehingga luasan totalnya sebesar 785 mm<sup>2</sup> sehingga dapat disimpulkan rancangan aman.



Gambar 3.2.8. Baut pada kaki penumpu

### 7. Tegangan tekan pada kaki penumpu

Kaki penumpu dalam hal ini berfungsi untuk menahan beban total keseluruhan alat pengering beku sehingga beban yang diperhitungkan merupakan beban total yang dapat diperhitungkan sebagai berikut:

$$f_c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots 2.2.1$$

Dimana:

$P$  = Gaya oleh beban total (N)

$A$  = Luasan tapak kaki masing-masing penumpu (m<sup>2</sup>)

Gaya oleh beban total dapat diperkirakan sebagai berikut:

- Beban tabung vakum

$$W_{ves} = 1454N$$

- Beban keseluruhan penumpu

Komponen plat L yang digunakan dalam rancangan penumpu menggunakan plat L dengan dimensi 70x70x6 mm dengan panjang total

6,88m dan 50x50x3 mm dengan panjang total 4m dimana luasannya sebesar  $2,96 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  sehingga masing-masing memiliki gaya berat sebagai berikut yang dapat diperhitungkan sebagai berikut:

Plat 70x70x6:

$$m = \rho \times V$$

$$m = 9130 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left( 1,13 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times 6,88 \text{ m} \right)$$

$$m = 51,068 \text{ kg}$$

$$W = 51,068 \text{ kg} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 500,466 \text{ N}$$

Plat 50x50x3:

$$m = 9130 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left( 9,6 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times 4 \text{ m} \right)$$

$$m = 10,809 \text{ kg}$$

$$W = 10,809 \text{ kg} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 105,928 \text{ N}$$

Dengan demikian gaya berat total yang ditimbulkan oleh penumpang adalah 606,394 N

o Beban sistem pendingin

Dalam perhitungan ini massa sistem refrigerasi diperkirakan sebesar 30Kg sehingga gaya berat yang ditimbulkan sebesar:

$$W = 30 \text{ kg} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 294 \text{ N}$$

Sehingga gaya berat total yang bekerja pada 4 kaki penumpang adalah 2353,746N sehingga luasan minimum pada masing-masing kaki dapat diperhitungkan sebagai berikut:

$$f_c < \sigma_f$$

$$A \geq \frac{8 \times \left( \frac{2353,746N}{4} \right) N}{340 \frac{N}{mm^2}} \geq 13,845 mm^2$$

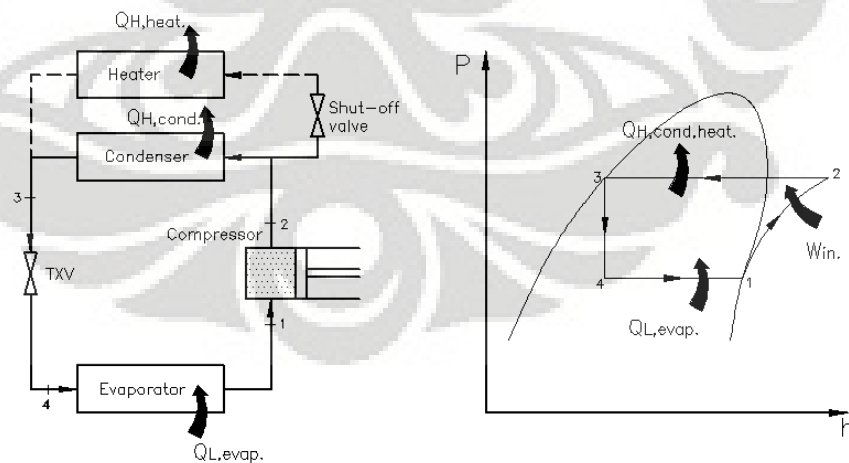
Dalam perancangan setiap kaki penumpu dibuat dari plat yang dipotong silinder dengan diameter 13cm sehingga tegangan yang bekerja sebesar:

$$f_c = \frac{2353,746N / 4}{0,785 \times 0,13^2} = \frac{588,436N}{0,0132} = 44355,029 \frac{N}{m^2}$$

### III.3. Perancangan Sistem Refrigerasi

#### III.3.1. Diagram Skematik Proses Refrigerasi

Sistem pendingin yang digunakan dalam alat pengering beku ini memanfaatkan panas dari kompresor untuk kemudian digunakan untuk membantu proses sublimasi dalam ruang pengering. Dengan kompresor tunggal diharapkan sistem ini bekerja dengan efisien.. Adapun diagram P-h sistem pendingin adalah sebagai berikut:



Gambar 3.3.1. Skematik diagram dan P-h diagram sistem pendingin

### III.3.2 Perhitungan sistem refrigerasi

#### III.3.2.1. Sistem Pendingin

##### 1. Beban Pendinginan

Dalam alat ini sistem pendinginan berfungsi untuk menangkap uap air yang terbentuk dari proses sublimasi sehingga dalam hal ini terdapat perubahan fase pada evaporator dari uap air menjadi es sehingga perlu diperhitungkan kalor latent uap air yang merupakan beban pendinginan. Dari tabel *saturated ice-water vapor* dengan temperatur  $-40$  didapatkan  $h_{ice,subl.}$  sebesar  $2839,9 \text{ kJ/kg}$ . Dengan massa produk yang dikeringkan sebesar  $0,26 \text{ kg}$  maka jika nilai kalor latent uap air (asumsi tidak ada perpindahan panas kalor sensibel) pada kondisi sublimasi dapat dihitung dengan:

$$Q_{latent,subl.} = m \cdot h_{ice,sat.vap.}$$

$$Q_{latent,subl.} = 0,26 \text{ kg} \cdot 2839,9 \text{ kJ / kg}$$

$$Q_{latent,subl.} = 738,374 \text{ kJ} \approx 738,374 \text{ kW} \cdot \text{sec}$$

Dengan target proses pengeringan  $12 \text{ jam}$  maka daya pendinginan didapatkan dengan:

$$Q_{pembekuan} = \frac{Q_{latent}}{t_{sublimation}}$$

$$Q_{pembekuan} = \frac{738,374 \text{ kWatt} \cdot \text{sec}}{3600 \cdot 12 \text{ sec}} = 17,092 \text{ Watt}$$

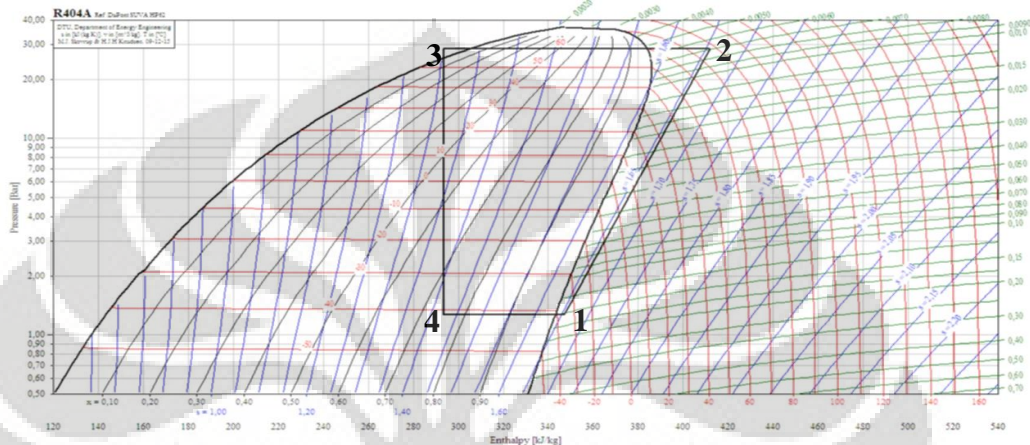
Dengan *safety factor* sebagai penyeimbang rugi-rugi kalor selama proses berlangsung sebesar  $30\%$  maka beban total pendinginan sebagai berikut:

$$Q_{pembekuan.} = 17,092 \text{ Watt} \cdot 1,3 = 22,219 \text{ Watt}$$

Besarnya beban pembekuan merupakan beban pendinginan yang terjadi pada evaporator sehingga bisa dikatakan sebagai  $Q_{evap.}$

## 2. Cairan refrigeran

Berdasarkan target titik sublimasi dimana proses sublimasi terjadi antara temperatur  $-39^{\circ}\text{C}$  an sampai  $-10^{\circ}\text{C}$  maka diperlukan refrigeran yang memiliki temperatur operasi dibawahnya. Untuk itu dipilih refrigeran 404A sehingga dengan *coolpack* didapatkan diagram sebagai berikut:



Gambar 3.3.2. Siklus refrigerasi ideal dengan superheat  
Coolpack

Dari siklus diatas didapatkan data-data pada tabel sebagai berikut:

Letak	T	P	h	v
Titik/notasi	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	[Bar]	[kJ/kg]	[ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]
Titik 1	-35,815	1,278	346,74	0,15219
Titik 2	77,669	28,609	411,89	0,00692
Titik 3	54,678	28,850	293,24	N/A
Titik 4	-41,269	1,278	293,24	0,11233

### a) Laju Aliran Refrigeran

Karena efek refrigerasi yang dibutuhkan hanya pada evaporator tanpa superheat, maka efek refrigerasi yang terjadi adalah dari titik 4 ke



titik 1, sehingga dengan efek refrigerasi sebesar 22,219 [W] maka dengan penambahan beban pemanas (diperhitungan selanjutnya), laju aliran refrigerannya dapat diperhitungkan. Besarnya laju aliran massa refrigerant adalah :

$$\dot{m} = \frac{Q_{evap}}{h_1 - h_4} = \frac{0,022219 + 0,087}{53,5} = 0,00204 [\text{kg/s}]$$

b) Daya Kompresor

Daya kompresor yang dibutuhkan pada perhitungan dari diagram p-h superheat (1 – 2) adalah sebesar :

$$\begin{aligned} W_k &= \dot{m} (h_2 - h_1) \\ &= (0,00204) \cdot (65,15) \\ &= 0,133 \text{ kJ/s} \approx 0,18083 \text{ hp} \end{aligned}$$

3. Kapasitas Kondensor

Dalam hal ini besarnya kapasitas kondensor yang diperlukan untuk membuang kalor ke lingkungan merupakan besarnya kerja yang diperlukan dari proses 2-3, sehingga didapatkan:

$$\begin{aligned} Q_{H,cond} &= \dot{m} (h_2 - h_3) = 0,00204 (111,89 - 293,24) \\ Q_{H,cond} &= 0,242 \text{ kJ/s} \approx 0,329 \text{ hp} \end{aligned}$$

III.3.2.2. Sistem Pemanas

Sistem pemanas yang direncanakan dalam mesin pengering beku dalam hal ini merupakan panas yang diperlukan untuk mendukung terjadinya proses sublimasi dalam ruang pengering dengan memanfaatkan temperatur yang tinggi dari kompresor. Adapun perhitungan sistem pemanas tersebut dirancang melalui tinjauan tersendiri

terhadap sistem secara keseluruhan dengan pendekatan hal-hal sebagai berikut:

### 1. Energi radiasi

$$q = \delta(K_{Str1}^4 - K_{Str2}^4) \times 1 / \left[ \left( \frac{1}{\varepsilon_1} \right) + \left( \frac{1}{\varepsilon_2} \right) - 1 \right]$$

Dimana:

$$\delta = 2,05 \times 10^{-7} \text{ kJ} / \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4$$

$$K_{Str1} = -10^\circ\text{C} \text{ (target temperatur permukaan produk)}$$

$$K_{Str1} = -41^\circ\text{C} \text{ (temperatur dibawah permukaan lapisan sublimasi)}$$

Nilai  $\varepsilon$  diasumsikan 1 sehingga didapatkan:

$$q = 2,05 \times 10^{-7} \text{ kJ} / \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4 (263^4 - 232^4)$$

$$q = 2,05 \times 10^{-7} \text{ kJ} / \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4 (263^4 \text{ K}^4 - 232^4 \text{ K}^4)$$

$$q = 188,732 \text{ kJ} / \text{m}^2 \cdot \text{h} \times \frac{1000\text{J}}{1\text{kJ}} \times \frac{1\text{W}\cdot\text{s}}{1\text{J}} \times \frac{1\text{h}}{3600\text{s}}$$

$$q = 52,42 \text{ W} / \text{m}^2$$

### 2. Radiasi dalam ruang kurung

Merupakan proses perpindahan kalor dalam suatu ruangan terhadap sumber panas (pipa pemanas) yang dianggap sebagai proses perpindahan kalor secara radiasi sehingga dapat dikategorikan sebagai radiasi dalam ruang kurung yang menyebutkan bahwa bila suatu permukaan perpindahan kalor berada pada suhu  $T_1$  yang seluruhnya terkurung oleh permukaan lain

yang jauh lebih luas yang berada pada suhu  $T_2$ , maka besarnya perpindahan kalor dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$q = \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot A_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

Dimana:

$$q = 52,42 \text{ W/m}^2$$

$$\varepsilon = 0,78 \text{ (emisivitas tembaga yang dipanaskan lama)}$$

$$\sigma = 5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

$$T_1 = 77,669^\circ\text{C} \text{ (temperatur refrigeran pada titik 2)}$$

$$T_2 = 26^\circ\text{C} \text{ (temperatur ruang pengering yang diinginkan)}$$

Sehingga luasan pemanas yang diperlukan untuk proses pengeringan sesuai dengan laju yang diinginkan sebesar:

$$q = \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot A (T_1^4 - T_2^4)$$

$$q = \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot 2\pi \cdot r_0 \cdot L (T_1^4 - T_2^4)$$

$$L = \frac{q}{\varepsilon_1 \sigma 2\pi r_0 (T_1^4 - T_2^4)}$$

$$L = \frac{52,42 \text{ W/m}^2}{0,78 \cdot 5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 0,0127 \text{ m} (50,83^4 - 299^4) \text{ K}^4}$$

$$L = 2,077 \text{ m}$$

Untuk menyesuaikan dengan dimensi pipa dan memanfaatkan ruang yang ada maka dalam hal ini panjang pipa yang akan dirancang sebesar 6,898 m sehingga dalam hal ini perhitungan telah sesuai dengan kelebihan panjang sebagai optimalisasi bila menginginkan temperatur yang lebih tinggi.

### III.3.3. Sistem refrigerasi aktual

#### 1. Kompresor



Gambar 3.3.3. Kompresor sistem pendingin

Data-data kompresor 404A:

- model : EN 12900
- frequency : 50 Hz
- nominal refrigerating capacity : 624 watt
- displacement : 26,3 cm<sup>3</sup>
- net weight : 23 kg
- rated current RLA : 3,8 A
- Max. current : 7,5 A
- Start current : 29 A

#### 2. Kondensor

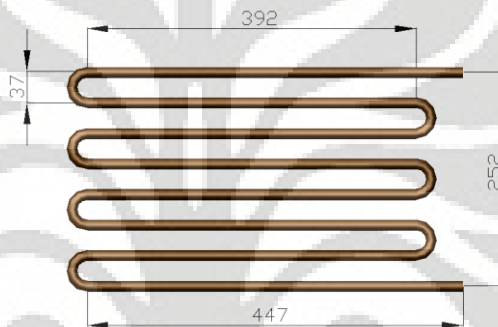


Gambar 3.3.4. Kondenser sistem pendingin

Keterangan:

- Daya kondensor : 3/4 hp
- Pipa kondensor : tembaga berdiameter 3/4" dengan fin pendingin
- Dimensi : 42 x 12 x 33 cm
- Pendingin : kipas
- 

### 3. Pemanas

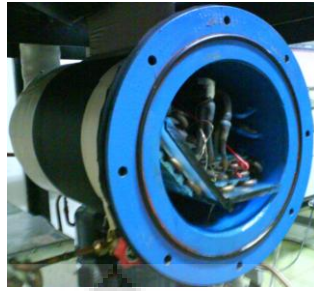


Gambar 3.3.5. Pipa pemanas

Keterangan:

- Bahan pipa : tembaga dengan diameter 1/2"
- Panjang pipa lurus : 3,246 meter
- Panjang total *U-bend* : 0,203 meter
- Panjang total pipa : 3,449 meter
- Terdapat dua pemanas yaitu atas dan bawah sehingga panjang keseluruhan pemanas adalah 6,898 meter.

#### 4. Evaporator



Gambar 3.3.6. Tabung ruang perangkat uap

Keterangan:

- Daya kondensor : 1 hp
- Pipa kondensor : tembaga berdiameter 3/4" dengan fin pendingin
- Kondisi operasi : temperatur  $-40^{\circ}$  C dengan tekanan 0,1 mbar

#### 5. Kemampuan sistem

- a) Dengan daya evaporator sebesar 1 hp (735,499 watt) dan beban total sebesar 109,2677 watt maka perbandingan kapasitas uap es yang mampu ditangkap dari produk dengan kandungan air sebesar:

$$\frac{109,2677\text{watt}}{0,247\text{kg}} = \frac{735,499\text{watt}}{m_{\text{sistem}}}$$

$$m_{\text{sistem}} = 1,662\text{Kg}$$

- b) Pipa pemanas dengan panjang masing-masing antara pemanas atas dan bawah sebesar 3,449 m sehingga memiliki panjang total sebesar 6,898m. Jika diasumsikan bahwa panas seragam sepanjang pipa maka kemampuan total pemanas dapat diperkirakan sebagai berikut:

$$q = \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot \pi \cdot d_0 \cdot L \left( T_1^4 - T_2^4 \right)$$

$$q = 0,785 \cdot 5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4 \cdot 3,14 \cdot 0,0127\text{m} \cdot 6,898\text{m} \left( 50,83^4 - 299^4 \right) \text{ K}^4$$

$$q = 87,0487\text{Watt}$$

c) COP sistem refrigerasi

Beban total dalam sistem refrigerasi disini merupakan beban yang ditimbulkan oleh energi untuk mengubah uap air menjadi es serta pemanasan untuk menghasilkan proses sublimasi. Dari perhitungan didapatkan bahwa energi pemanasan yang diperlukan sebesar 87,0487 Watt sehingga didapatkan perhitungan sebagai berikut:

$$COP = \frac{Q_{pembekuan} + q}{W_k}$$

$$COP = \frac{22,219\text{watt} + 87,0487\text{Watt}}{0,27 \times 10^3 \text{ J / s} \frac{1\text{Watt.s}}{1\text{J}}}$$

$$COP = \frac{109,2677\text{Watt}}{270\text{Watt}} = 0,404$$

d) COP sistem yang sebenarnya:

$$COP = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{346,74 - 293,24}{411,89 - 346,74} = 0,821$$

Sehingga dengan efisiensi aktual yang lebih besar dibandingkan dengan efisiensi unjuk kerja maka diharapkan sistem dapat berjalan dengan baik dan memadai.

### III.3.4. Proses Pembuatan

Uraian dalam proses pembuatan alat pengering beku dalam hal ini difokuskan pada proses pengerjaan komponen utama sistem pengering yang ditinjau secara umum sebagai pedoman dengan penjelasan sebagai berikut:



#### III.3.4.1. Tabung vakum

Alat pengering beku menggunakan tabung pengering dengan diameter 24" dan panjang 50 cm sementara tabung perangkap uap dengan diameter 8" dan panjang 40" yang tahapan pengerjaannya dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Proses pertama mempersiapkan pipa 24" dengan panjang 50 cm dan pipa 8" dengan panjang 40 cm untuk kemudian diratakan pada kedua ujungnya hingga simetris dengan proses *grinding*.



Gambar 3.3.7. Bahan tabung vakum 24"

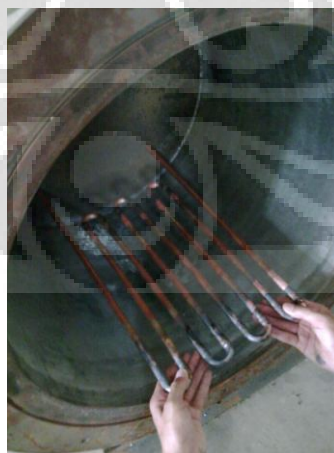
2. Pembuatan *flange* dengan diameter dalam 24" dan diameter luar 31,5" serta tebal 10 mm melalui proses *machining* untuk mendapatkan permukaan yang rata dan pembuatan *groove* dengan diameter 27" dan tebal 7 mm sebagai tempat *O-ring* yang akan mencegah tabung vakum dari kebocoran. *Groove* tersebut dibuat dengan kedalam 3,5 mm. *flange* ini kemudian dilas pada satu sisi dari pipa yang digunakan sebagai tabung yang telah dipersiapkan dengan las argon.
3. Pembuatan tutup belakang dengan diameter 24" dengan tebal 5 mm. Bagian ini akan dilubangi dengan diameter 6" sebagai *access flange* dengan tutup dari bahan *ebonite* yang memiliki diameter *O-ring* 8" dimana proses pembuatannya seperti *flange* diatas. Lubang ini berfungsi sebagai sarana memasukkan kebutuhan kabel elektronik kedalam ruang pengering. Penutup ini juga dilubangi tepat pada bagian tengahnya dengan diameter

2” sebagai saluran pipa penghubung dengan evaporator untuk kemudian dilas pada satu sisi tabung dengan las argon.



Gambar 3.3.8. Tabung pengering vakum dan perangkat uap dengan *flange* yang siap dirakit

4. Pembuatan pemanas atas dan bawah yang terdiri dari pipa tembaga dengan diameter 0,5” yang dipotong dengan panjang 395 mm dan jumlah masing-masing 8 buah untuk kemudian disambung dengan *U-bend* sehingga memiliki panjang total 3357,82 mm (3,358 m). Pemanas kemudian dilas pada plat penutup belakang setelah plat dibor dengan diameter 0,5” pada sisi atas dan bawah dengan letak yang simetris dan disesuaikan.



Gambar 3.3.9. Proses pemasangan pemanas

5. Pembuatan ruang evaporator dengan mempersiapkan pipa berdiameter 8” dengan panjang 40 cm dimana pada satu sisi di tutup dengan plat tebal 5 mm dan dibor 2” yang akan menghubungkan dengan ruang pengering oleh pipa yang kemudian dilas. Pada sisi lain di sambungkan *flange* dengan diameter dalam dan luar 21 cm dan 31 cm. *flange* ini di *machining* untuk membuat *groove* sesuai dengan diameter *O-ring* 10” sebagai penyekat dari kebocoran dengan penutup dari bahan *acrylic*.
6. Pembuatan rangka penumpu produk spesimen yang akan ditempatkan dalam tabung pengering. Perancangan bagian ini dengan mempertimbangkan sistem penggetar yang memanfaatkan motor listrik mesin jahit yang digunakan untuk memutar suatu poros dengan bubungan *eccentric* guna menimbulkan gerakan eksitasi pada meja tempat produk spesimen diletakkan maka dengan mempertimbangkan kesesuaian dimensinya terhadap tabung didapatkan desain yang dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 3.3.10. Rancangan tempat produk spesimen

7. Pemasangan *low fin-tube* yang memanfaatkan komponen AC mobil dengan daya 1 hp yang dimensinya dimodifikasi sedemikian rupa menyesuaikan dengan ruang evaporator.



Gambar 3.3.11. Evaporator perangkat uap

Bahan evaporator tersebut kemudian dimasukkan dalam bejana dengan diameter 8” yang telah dipersiapkan sebelumnya dengan terlebih dahulu melubangi dindingnya sebagai akses pipa pendingin keluar untuk kemudian dilakukan proses pengelasan untuk menghindari kebocoran udara. Setelah proses selesai termasuk pengecatan tabung, gambar perangkat uap dapat dilihat seperti dibawah ini:



Gambar 3.3.12. Penampang evaporator dalam ruang perangkat uap

#### III.3.4.2. Rancangan penumpu

1. Pembuatan rangka support alat dari plat *L-shape* yang telah ditentukan yang akan digunakan sebagai tempat dudukan ruang pengering dan evaporator.
2. Pemasangan tabung vakum pada tumpuan yang telah dikerjakan untuk kemudian dijadikan patokan dalam proses pembuatan pipa penghubung. Adapun gambar tahapan ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3.3.13. Pemasangan tabung vakum pada penumpu

3. Setelah proses percobaan pemasangan tabung vakum pada penumpu beserta pipa penghubung selesai maka kemudian dilanjutkan dengan proses pengecatan untuk menghindari dari korosi.

#### III.3.4.3. Perakitan sistem refrigerasi

1. Melakukan *Layout* komponen utama sistem pendingin yang akan digunakan pada posisi yang disesuaikan terhadap rancangan alat sedemikian rupa sehingga dapat memudahkan dalam melakukan proses *routing* pipa pendingin yang diperlukan secara optimal sekaligus tetap memperhatikan faktor estetika perancangan yang baik.



Gambar 3.3.14. *Layout* komponen utama sistem pendingin

2. Proses *routing* pipa sistem pendingin dengan mengacu pada diagram alir proses pendingin yang telah digambar dengan AutoCAD terlebih dahulu untuk mendapatkan tata letak yang sesuai dan dimensi bagian pipa yang diperlukan sehingga pemotongan maupun pengelasan dapat dilakukan dengan pasti sehingga mempercepat proses perakitan. Langkah selanjutnya kemudian dilakukan perakitan dengan proses pengelasan *acetyline* hingga mendapatkan hasil alat pengering seperti gambar dibawah ini:





Gambar 3.3.15. gambar jadi alat pengering beku dengan panel listrik

## **BAB IV**

### **PENGUJIAN ALAT**

#### IV.1. Prosedur Pengujian

Pada proses pengeringan vakum ini, efek pembekuan diperoleh dengan penguapan sebagian air bahan pada kondisi ruang bertekanan rendah. Penguapan ini memerlukan panas laten yang diambil dari produk, sehingga produk tersebut mengalami penurunan suhu bahkan sampai akhirnya membeku. Dalam hal ini efek pembekuan bukan karena perpindahan panas dari bahan ke media pembeku, tetapi karena pelepasan panas laten penguapan. Dengan demikian, energi yang dibutuhkan untuk proses pembekuan produk ini adalah energi untuk penurunan tekanan ruang pembekuan.

Pada pengeringan beku yang berhasil tanpa *collaps*, produk yang terbentuk adalah serbuk lidah buaya tanpa ada bagian yang mencair. Untuk melakukan uji kinerja pengeringan beku, bahan yang akan dikering-bekukan yaitu lidah buaya dipersiapkan dengan tahapan tahapan seperti berikut :

1. Penimbangan massa pelepah lidah buaya segar.
2. Pengupasan Lidah buaya segar.
3. Pembersihan lendir/getah yang ada pada daging lidah buaya.
4. Penimbangan seluruh daging lidah buaya segar yang didapat dari satu pelepah segar.
5. Pemotongan daging lidah buaya menjadi dadu kurang lebih 1 cm<sup>3</sup>.
6. Pemplansiran lidah buaya ukuran dadu dengan memanaskannya dengan air suhu 70 °C selama 10 menit.
7. Lidah buaya yang sudah diblansir kemudian diblender.
8. Lidah buaya yang sudah diblender dicampur maltodextrin dan air untuk mendapatkan formulasi campuran lidah buaya yang optimal yaitu yang membutuhkan energi pengeringan beku yang efisien.
9. Lidah buaya sebanyak yang sudah diformulasikan, di masukkan ke wadah sampel.

10. Pemasangan kabel termokopel untuk pengukuran suhu pada lapisan-lapisan produk
11. Penimbangan wadah sampel berisi lidah buaya tersebut.
12. Dilakukan pembekuan dengan lempeng sentuh ketika mode pembekuan ini dilakukan atau dengan penurunan tekanan ke kondisi vakum jika mode pembekuan vakum yang akan dilakukan.
13. Setelah semua bahan membeku kemudian dilakukan pengeringan dengan sublimasi.
14. Penimbangan kembali seluruh wadah berisi serbuk lidah buaya setelah selesai proses pengeringan beku.

#### IV.2. Pengujian Vakum

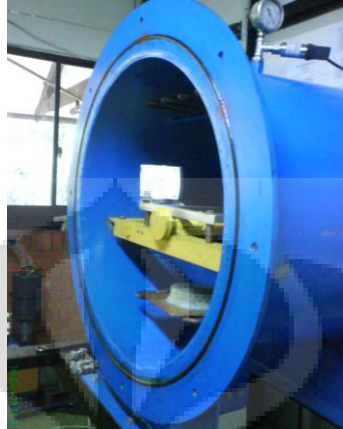
Sebelum dilakukan proses pengeringan produk aloe vera maka terlebih dahulu dilakukan proses pengujian alat yang diantaranya pengujian vakum. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa jauh kemampuan tabung pengering menahan kebocoran sehingga nantinya bisa dicapai tekanan sesuai dengan yang diinginkan yakni tekanan yang menyebabkan produk mengalami pembekuan sesuai dengan diagram tekanan dan temperatur air yang dijadikan sebagai acuan dalam perancangan. Adapun pengujian ini meliputi beberapa tahapan dan perlengkapan diantaranya:

##### 1. Persiapan alat uji

Persiapan alat uji disini antara lain menutup bagian-bagian alat yang yang berpotensi terjadi kebocoran seperti pada alat ukur (pressure transmitter), tempat penetrasi baik pipa instrumentasi maupun pipa pendingin pada evaporator, *flange* yang menjadi sambungan serta bagian yang menjadi akses yakni pintu ruang pengering dan pintu evaporator. Untuk menghindari kebocoran maka pada daerah kontak tersebut diberi o-ring karena memiliki luasan kontak yang besar sementara pada daerah yang memiliki kontak yang kecil dilakukan pengeleman hingga dimungkinkan tidak terjadi kebocoran. Salah satu bagian yang berpotensi kebocoran adalah pada ruang pengering



karena memiliki kontak yang cukup besar serta mendapat tekanan vakum yang besar.



Gambar 4.2.1. O-ring pada ruang pengering

## 2. Pompa vakum

Pompa yang digunakan dalam tes vakum adalah pompa dengan kemampuan yang diharapkan melebihi batas tekanan terendah dari tekanan yang diinginkan yakni sebesar 0,1 mbar sehingga pada saat ruangan vakum alat mencapai titik tekanan yang rendah hingga mendekati tekanan yang diinginkan maka dengan kemampuan pompa vakum yang rendah masih terdapat beda tekanan yang merupakan tekanan kerja pompa yang diperlukan agar tetap terjadi pemvakuman. Adapun spesifikasi pompa vakum yang digunakan adalah sebagai berikut:



Gambar 4.2.2. Pompa vakum

Pompa vakum tersebut mempunyai spesifikasi sebagai berikut:

Type : Direct oil rotary vacuum pump

AC 220 V 50Hz

Displacement : 50 Hz – 1200 L/min

60 Hz – 1440 L/min

Ultimate Vacuum :  $6.7 \times 10^{-2}$  Pa

Motor Power : 2.2 kW

Oil Capacity : 2.8 L

Pump Weight : 138 kg.

### 3. Proses penvakuman

Setelah persiapan selesai maka langkah selanjutnya adalah proses penvakuman alat uji. Proses ini dilakukan dengan cara menghubungkan katup manifold yang telah disediakan pada bagian bawah dari tabung evaporator menuju saluran yang terdapat pada pompa vakum. Pada manifold tersebut dirancang dengan dua *globe valve* yang bertujuan sebagai cadangan bila terjadi pergantian pompa vakum pada saat tekanan mencapai titik yang diinginkan. Untuk itu, pada saat menghubungkan dengan pompa vakum maka salah satu katup harus ditutup dengan rapat hingga pada saat yang dibutuhkan. Jika saluran penghubung dengan pompa vakum sudah siap maka selanjutnya adalah memastikan katup pada pompa vakum sudah membuka sebelum menyalakan pompa untuk kemudian membuka katup pada manifold evaporator setelah pompa vakum berjalan sehingga terjadi proses penvakuman.

### 4. Kontrol proses penvakuman

Proses control vakum dilakukan melalui data akuisisi yang bisa dilihat pada layar monitor yang telah diprogram dengan NI (national instrument)

sebelumnya dimana. Masukan tekanan vakum berasal dari *pressure transmitter* yang dipasang pada bagian atas tabung pengering yang merepresentasikan tekanan dalam tabung pengering maupun tabung evaporator karena keduanya saling berhubungan. Pada saluran yang sama juga dipasang alat *pressure gauge* yang digunakan sebagai pembanding validitas pengukuran yang dihasilkan oleh *pressure transmitter*. Hal ini diperlukan karena spesifikasi kemampuan alat ukur dengan output digital tersebut belum bisa dipastikan mencapai tekanan vakum yang presisi. Selama proses penvakuman berlangsung dilakukan langkah-langkah pemeriksaan alat uji dengan memeriksa bagian-bagian sekiranya berpotensi terjadi kebocoran seperti pada sambungan dan saluran alat ukur sampai dicapai tekanan sebesar 0,1 mbar.



Gambar 4.2.3. Alat pengukuran vakum tabung

Dalam pengujian yang sudah dilakukan biasanya setelah mencapai tekanan berkisar 1 mbar maka perubahan tekanan relatif kecil, hal ini dimungkinkan masih terdapat kebocoran yang sulit dideteksi ataupun terjadi tekanan yang mendekati kesetimbangan antara pompa vakum dengan alat uji sehingga tidak terjadi perpgerakan yang signifikan. Pada tahapan ini dijadikan sebagai tahapan penahanan tekanan sebagai simulasi kerja saat pengeringan produk berlangsung.

## 5. Evakuasi proses pengujian vakum

Jika dalam waktu yang ditentukan tidak terdapat perubahan tekanan maka proses penvakuman dihentikan dengan menutup *globe valve* pada manifold sebelum mematikan pompa vakum. Proses ini merupakan langkah untuk mendeteksi kinerja ruang pengering untuk menahan kebocoran tanpa laju pengurangan tekanan dari pompa vakum. Hal ini dilakukan hingga didapatkan tekanan yang relatif stabil sehingga dengan waktu yang telah ditentukan dapat memperhitungkan laju kebocoran per satuan waktu.

### IV.3. Pengujian Sistem Pendingin

Tahapan ini merupakan langkah untuk mengetahui kondisi sistem refrigerasi dari proses pembuatan hingga menghasilkan proses refrigerasi untuk mendukung alat uji pengering beku sesuai dengan kebutuhan temperatur yang dibutuhkan. Pengujian dalam hal ini meliputi:

#### 1. Pengujian dari kebocoran

Pengujian saluran refrigerasi dari kebocoran dalam hal ini menggunakan media udara yang dilakukan dengan memberikan penekanan pada sistem hingga mencapai tekanan paling maksimum (sekitar 8 bar). Hal ini bertujuan untuk agar kebocoran yang terjadi dapat dengan mudah dideteksi karena dengan tekanan yang besar maka pada daerah dimana terjadi kebocoran akan mengeluarkan udara dengan besar pula. Cara mendeteksi kebocoran dalam hal ini menggunakan busa sabun yang akan memberikan tanda-tanda bila terjadi kebocoran pada daerah dimana dilakukan pemeriksaan.

#### 2. Pembersihan saluran refrigerasi

Pada tahapan ini dilakukan proses penvakuman saluran refrigerasi dengan pompa vakum melalui lubang akses yang telah disediakan. Tekanan vakum dikenakan hingga mencapai tekanan terendah untuk kemudian menahannya dengan tetap melakukan penvakuman. Hal ini bertujuan untuk membuang kotoran-kotoran yang terdapat dalam saluran baik berupa gas maupun debu-debu yang masuk selama proses manufaktur sistem pendingin. Penahanan ini

berlangsung hingga dirasakan saluran sudah cukup bersih dari zat-zat pengotor yang dapat bercampur dan mengganggu kinerja refrigeran.

### 3. Proses pengisian refrigeran

Proses ini merupakan tahapan penting yang menjadi bagian dalam mempersiapkan sistem refrigerasi yang optimal dimana tahapan ini memerlukan perhatian dalam hal kemurnian refrigeran yang akan dimasukkan kedalam sistem karena masuknya udara yang akan bercampur dengan refrigeran akan mengganggu kinerjanya sehingga tidak bekerja dengan temperatur sesuai dengan spesifikasi. Untuk mendukung hal tersebut maka langkah yang perlu diambil adalah dengan menggunakan saluran *testing manifold* yang menghubungkan antara saluran sistem refrigerasi, tabung gas refrigeran dan saluran pompa vakum. Ketiganya tergabung dalam satu manifold yang proses kerjanya disesuaikan dengan tahapan dimana proses awal adalah penvakuman, maka dalam hal ini saluran yang menuju tabung refrigeran harus ditutup sehingga tekanan vakum hanya mengarah ke dalam sistem refrigerasi. Sedangkan jika tekanan vakum sudah memenuhi, langkah selanjutnya adalah mengisi refrigeran dengan menutup saluran dari pompa vakum dan membuka saluran dari tabung refrigerant sehingga terjadi proses pengisian. Dengan memperhatikan tahapan-tahapan ini maka diharapkan tidak terjadi pencampuran refrigeran dengan udara luar pada saat pengisian. Adapun contoh *testing manifold* dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.3.1. Testing manifold

#### 4. Pengujian sistem

Jika pengisian refrigeran sudah mencukupi sesuai dengan volume yang dibutuhkan sistem maka langkah selanjutnya menjalankan sistem refrigerasi dengan menghidupkan kompresor dan kipas kondensor pada panel yang telah dirancang dan menjadi bagian sistem seperti gambar dibawah ini:



Gambar 4.3.2. Control panel

Sementara pada daerah tertentu telah dipasangkan *thermocouple* yang akan mendeteksi temperatur pada titik tersebut dan langsung bisa dilihat pada layar monitor yang telah diprogram dengan *labView* yang dapat mengintegrasikan informasi sistem sehingga dengan informasi tersebut dapat disimpulkan kinerja sistem refrigerasi secara keseluruhan.

#### IV.4. Unjuk kerja sistem pengering beku

Tinjauan dalam pembahasan ini meliputi temperatur dalam ruang pengering dan ruang evaporator serta tekanan yang merupakan refleksi kondisi yang akan mempengaruhi proses pengeringan aloe vera yang dipengaruhi oleh kinerja sistem pendingin dan pompa vakum.

##### 1. Temperatur ruang pengering dan evaporator

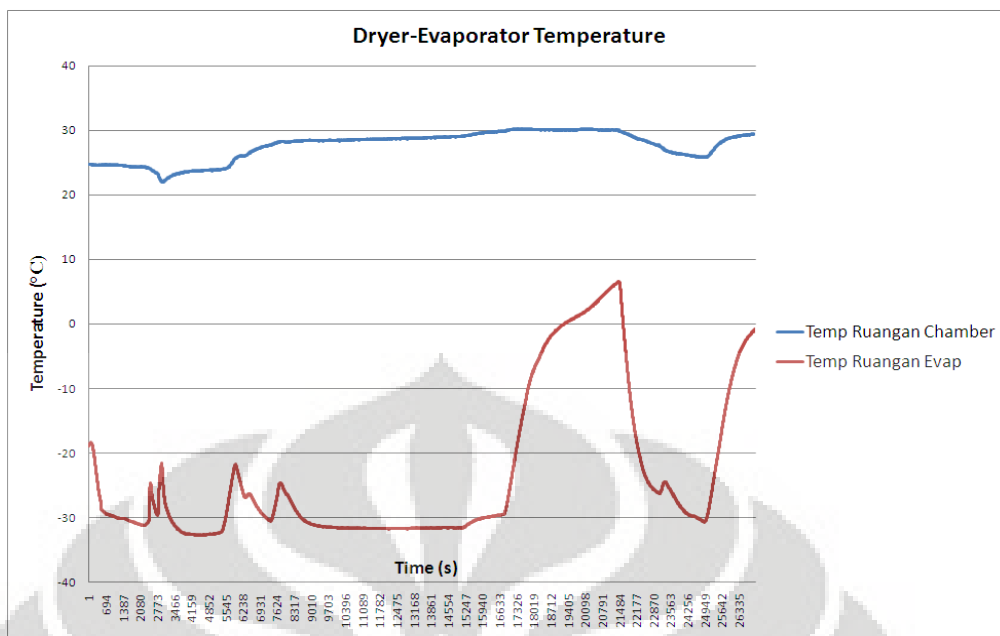
Temperatur diruang pengering merupakan temperatur yang akan mempengaruhi laju proses pengeringan itu sendiri dimana dalam hal ini



temperatur ruang tersebut disebabkan oleh panas dari kondensor yang memanfaatkan panas dari saluran *discharge* kompresor yang bertemperatur cukup tinggi sehingga tidak semua panas dibuang ke lingkungan oleh kondensor. Disinilah kelebihan sistem pengering ini yang dapat memanfaatkan panas tersebut sehingga sistem menjadi efisien dan ringkas.

Kelemahan dari pemanfaatan panas yang mengambil dari saluran *discharge* kompresor adalah tidak diketahuinya temperatur keluar dari pipa pemanas. Dalam prakteknya ketika saluran ini berfungsi, akan mempengaruhi kinerja evaporator. Hal ini dimungkinkan bahwa temperatur keluaran dari pipa pemanas masih cukup tinggi (lebih tinggi dari temperature ruang) sehingga ketika bercampur dengan refrigeran dari kondensor (yang telah mencapai temperatur ruang oleh konveksi paksa kipas) akan menaikkan temperaturnya kembali sebelum memasuki evaporator sehingga menaikkan temperatur evaporator. Hal inilah yang menyebabkan perlunya penyeimbangan pembukaan katup yang mengalirkan refrigeran ke pemanas sehingga didapatkan komposisi yang sesuai dimana antara temperatur evaporator dan pemanasan ruang pengering oleh pipa pemanas saling mendukung selama proses pengeringan berlangsung.

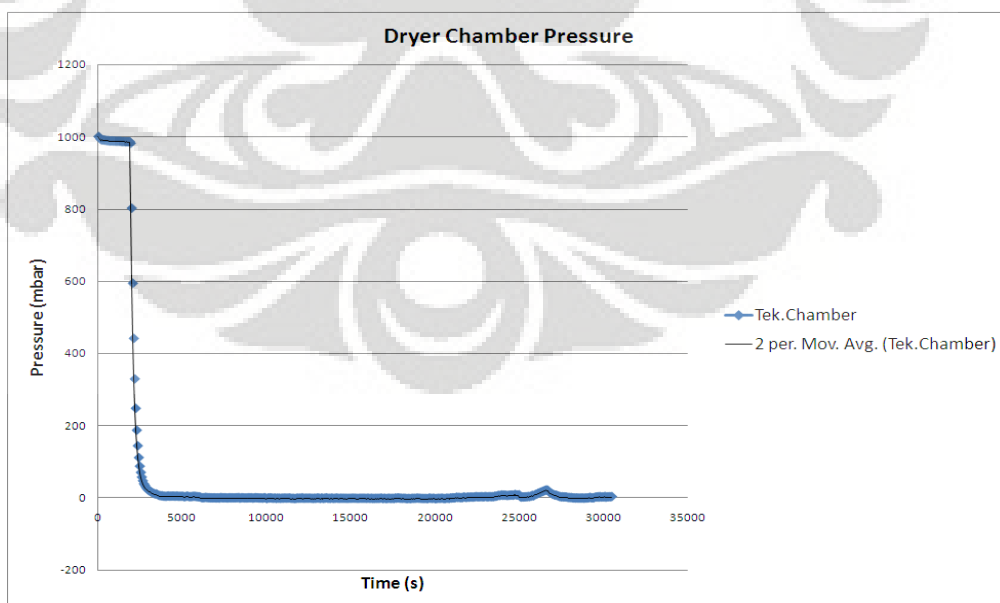
Temperatur diruang perangkat uap dipengaruhi oleh evaporator dimana pada ruangan ini dikehendaki temperatur yang rendah sehingga terjadi penangkapan uap air hasil proses sublimasi dari produk dalam ruang pengering yang mengalir melalui pipa penghubung. Jika temperatur dinding evaporator lebih rendah daripada temperatur uap air maka uap tersebut akan terperangkap dan menjadi es (mengalami deposisi) yang menempel pada dinding pipa maupun fin evaporator. Semakin besar perbedaan temperatur antara uap air dengan evaporator maka semakin cepat proses pembekuan sehingga jika hal ini diimbangi dengan laju proses pengeringan produk maka waktu proses pengeringan akan semakin cepat sehingga sistem semakin efisien.



Grafik 4.4.1. Temperatur ruang pengering dan evaporator

## 2. Tekanan diruang pengering

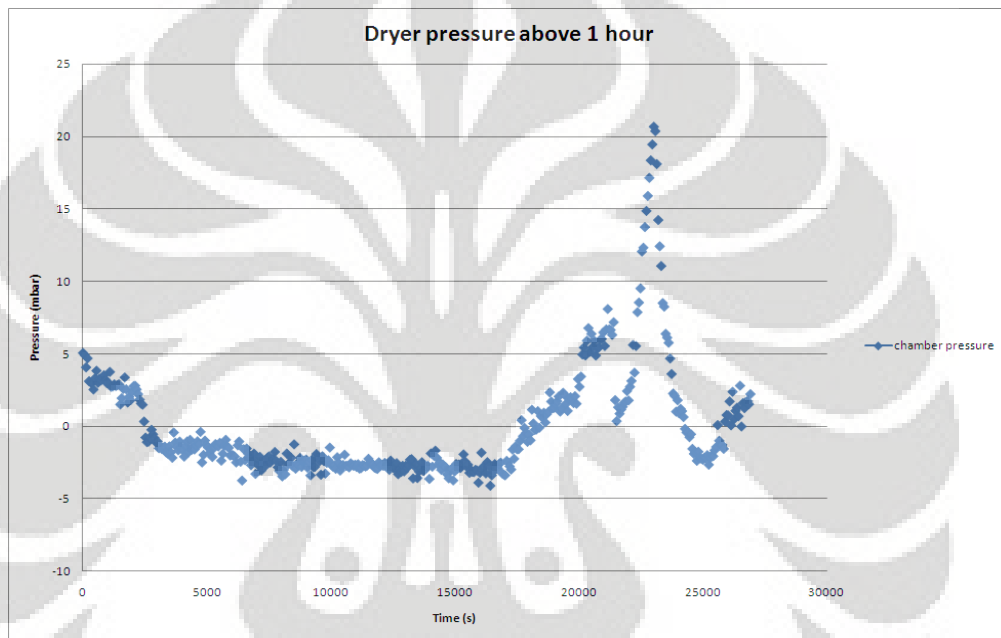
Tekanan pada ruang merupakan parameter yang akan mempengaruhi proses pembekuan produk sehingga diharapkan stabil guna menghindari perubahan temperatur dalam produk itu sendiri akibat fluktuasi tekanan ruangan.



Grafik 4.4.2. Tekanan ruang pengering



Dari grafik hasil eksperimen didapatkan bahwa tekanan ruang pengering pada saat mencapai tekanan vakum yang diinginkan cukup stabil sehingga diharapkan bisa menjaga temperatur produk untuk menghindari penurunan temperatur yang berakibat pada melelehnya produk sehingga tidak terjadi proses sublimasi. Jika dilihat antara grafik temperatur ruang dan tekanan maka dapat dilihat bahwa terjadi korelasi antara kenaikan temperatur pada ruang evaporator maupun pengering yang akhirnya menaikkan tekanan seperti dapat dilihat pada grafik dibawah ini:



Grafik 4.4.3. Tekanan ruang pengering setelah 1 jam penvakuman

Kenaikan tekanan pada ruang vakum akan menyebabkan kenaikan temperatur produk sehingga jika akhirnya dapat menyebabkan perubahan fase produk pada kondisi cair sehingga tidak terjadi proses pengeringan dengan sublimasi. Kenaikan temperatur ini disebabkan oleh pembukaan katup refrigeran ke pemanas melebihi batasan sehingga akhirnya mengganggu kinerja evaporator dengan menaikkan suhu yang mengakibatkan laju penangkapan uap terganggu sehingga proses pengeringan berjalan lambat.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **V.1. KESIMPULAN**

##### **V.1.1. Konstruksi pengering**

1. Sistem pengering beku telah berjalan dengan menghasilkan produk kering yang cukup memadai sebagai langkah awal dalam melakukan penelitian pengeringan beku vakum yang memanfaatkan panas buang kondensor.
2. Dengan kinerja awal hasil perancangan bisa dijadikan masukan untuk bisa dilakukan analisa kekurangan sehingga berguna dalam memperbaiki sistem yang berhubungan dengan proses pengeringan secara langsung untuk mendapatkan kinerja yang lebih optimal.

##### **V.1.2. Sistem refrigerasi**

1. Secara umum jika dilakukan pembagian aliran yang sesuai dalam mendukung proses pemanasan dalam ruang pengering dan pendinginan dalam ruang evaporator maka sistem refrigerasi yang dirancang telah mampu bekerja sesuai dengan beban yang diperlukan.
2. Pemanfaatan sebagian panas kondensor untuk meningkatkan temperatur ruang pengering mempengaruhi kinerja evaporator sehingga perlu dilakukan penyesuaian pembagian aliran refrigeran sesuai temperatur ruang pengering dan ruang perangkap uap yang dibutuhkan.

#### **V.2. SARAN**

1. Diperlukan perancangan pintu ruang pengering yang memadai melalui analisa defleksi yang terjadi akibat tekanan vakum dalam ruangan sehingga tidak terjadi defleksi kembali. Untuk mengatasinya bisa dengan pemilihan bahan dan dimensi yang memenuhi toleransi maupun dengan inovasi bentuk pintu sedemikian rupa sehingga dapat mengurangi defleksi yang terjadi. Hal lain yang perlu diperhatikan adalah pemasangan

mekanisme engsel pintu sehingga dalam aksesnya tidak memerlukan pengangkatan secara fisik guna menutup pintu ruang pengering setiap melakukan proses uji coba. Perancangan engsel hendaknya memperhatikan kaidah desain yang mampu mengatasi kemungkinan terjadinya kebocoran ruang pengering.

2. Sistem refrigerasi yang memanfaatkan sebagian panas kondensor terbukti mempengaruhi kinerja evaporator pada saat temperatur pemanasan yang lebih tinggi diinginkan. Hal ini disebabkan temperatur yang mengalami kenaikan saat penggabungan refrigeran dari kondensor dengan aliran dari pemanas. Untuk mengatasi hal ini maka diperlukan perancangan sistem pendinginan kembali refrigerant gabungan keduanya hingga mencapai suhu ruangan dengan kapasitas yang menyesuaikan masukan temperatur yang ada sehingga diharapkan dengan penambahan komponen ini maka penambahan suhu dari aliran pemanas tidak mempengaruhi kinerja pendinginan dalam evaporator. Hal ini pada akhirnya akan meningkatkan kinerja sistem karena dengan temperatur yang lebih tinggi pada ruang pengering oleh pemanas (dengan batasan tertentu yang disesuaikan dengan produk yang dikeringkan) maka laju sublimasi dan desorpsi akan meningkat. Disisi lain temperatur evaporator yang tetap rendah akan menghasilkan kinerja penangkapan uap air tetap optimal sehingga secara keseluruhan sistem pengeringan dapat berjalan dengan baik.
3. Diperlukan perancangan saluran pipa penghubung antara ruang pengering dengan evaporator dengan diameter yang lebih besar dan jarak yang minimal guna mendapatkan kinerja pengaliran uap air dari ruang pengering ke evaporator yang lebih optimal.
4. Proses laju penangkapan uap air tidak bisa dideteksi dikarenakan tidak terdapat sensor yang memberikan informasi kandungan uap air yang ada. Jika pada ruang pengering terdapat *RH meter* maka sebaiknya pada ruang evaporator dipasang pula alat pendeteksi kelembaban sehingga dengan perbandingan antar keduanya maka laju penangkapan uap air hasil proses sublimasi dapat diketahui.

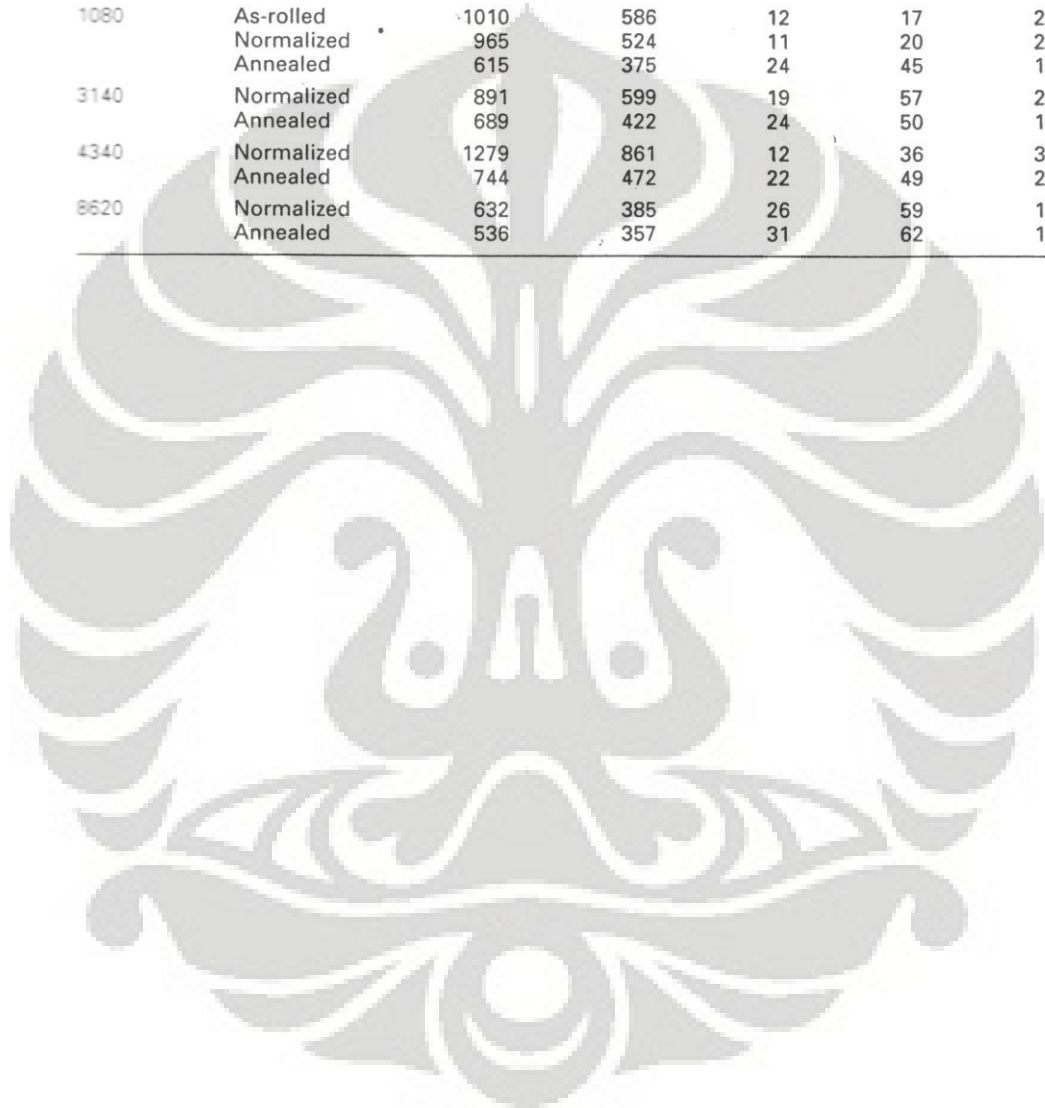
## DAFTAR REFERENSI

- [1]. Oetjen, Georg-Wilhelm., Haseley, Peter, 2004, *Freeze Drying-Second, Completely Revised and Extended Edition*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
- [2]. Khurmi, R.S., Gupta, J.K., *A Textbook Of Mechine Design*, 1980, Eurasia Publishing House (Pvt.) LTD
- [3]. Cengel, Yunus A., Michael A. Boles, 2002, *Thermodynamics an Engineering Approach Fourth Edition International Edition*, McGraw-Hill
- [4]. Kharagpur, EE IIT, *Refrigeration and Air Conditioning*, India, 2008
- [5]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Aloe\\_vera](http://en.wikipedia.org/wiki/Aloe_vera), Diakses Oktober 2009
- [6]. M.F. Ashby, *Material Selection in Mechanical Design*, First Edition, 1992.
- [7]. P.Kavanaugh, Stephen., *“HVAC Simplified”* American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2006.
- [8]. Holman J.P., 1991, *Perpindahan Kalor*, terj. E.Jasjfi, edisi keenam, Jakarta: Erlangga
- [9]. M. Idrus Alhamid, 2009, *Proposal RUUI: Pengembangan Pengering Beku Pembekuan Vakum Dengan Pemanasan Kondenser dan Vibrasi*, Fakultas Teknik Universitas Indonesia
- [10]. Kalpakjian, Serope., *Manufacturing Engineering Technology*, Third Edition, Illinois Institute of Technology

Lampiran 1: Tabel Material Properties [12]

TABLE 5.4  
TYPICAL MECHANICAL PROPERTIES OF SELECTED CARBON AND ALLOY STEELS  
IN THE HOT-ROLLED, NORMALIZED, AND ANNEALED CONDITION

AISI	Condition	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation in 50 mm (%)	Reduction of Area (%)	Hardness (HB)
1020	As-rolled	448	346	36	59	143
	Normalized	441	330	35	67	131
	Annealed	393	294	36	66	111
1080	As-rolled	1010	586	12	17	293
	Normalized	965	524	11	20	293
	Annealed	615	375	24	45	174
3140	Normalized	891	599	19	57	262
	Annealed	689	422	24	50	197
4340	Normalized	1279	861	12	36	363
	Annealed	744	472	22	49	217
8620	Normalized	632	385	26	59	183
	Annealed	536	357	31	62	149



Lampiran 2: Tabel Momen Inersia [8]

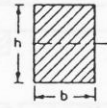
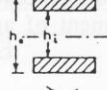
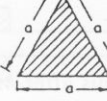

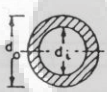
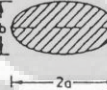
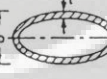
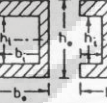
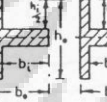
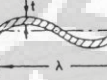
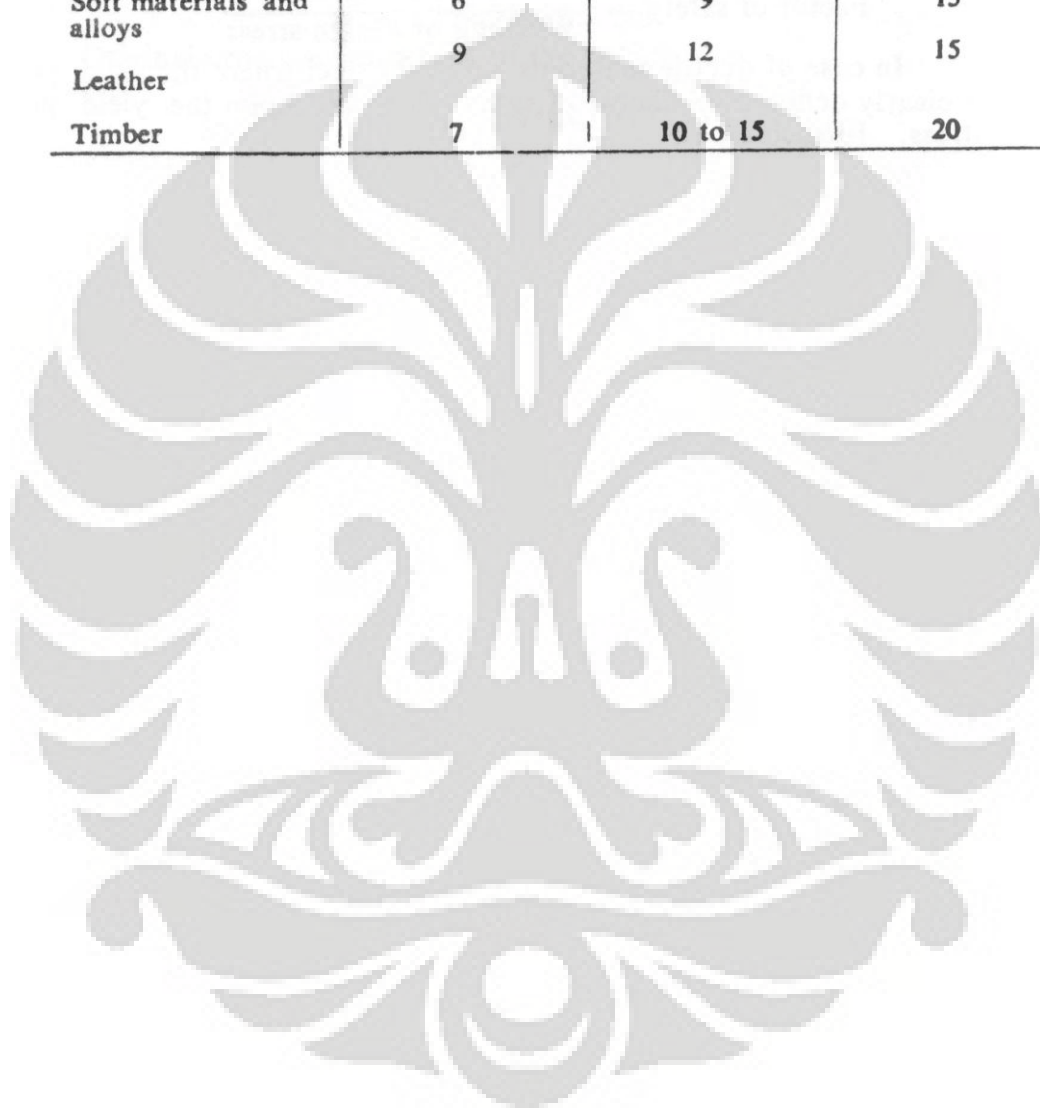
SECTION	A (m <sup>2</sup> )	I (m <sup>4</sup> )	K (m <sup>4</sup> )	I/y <sub>m</sub> (m <sup>3</sup> )	H (m <sup>3</sup> )
	bh	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{16}{3}hb^3(1-0.58\frac{b}{h})$	$\frac{bh^2}{6}$	$\frac{bh^2}{4}$
	b(h <sub>o</sub> - h <sub>i</sub> )	$\frac{b}{12}(h_o^3 - h_i^3)$	—	$\frac{b}{12h_o}(h_o^3 - h_i^3)$	$\frac{b}{4}(h_o^2 - h_i^2)$
	$\frac{\sqrt{3}}{4}a^2$	$\frac{a^4}{32\sqrt{3}}$	$\frac{a^4\sqrt{3}}{80}$	$\frac{a^3}{32}$	—
	$\frac{\pi d^2}{4}$	$\frac{\pi}{64}d^4$	$\frac{\pi}{32}d^4$	$\frac{\pi}{32}d^3$	$\frac{1}{6}d^3$
	$\frac{\pi}{4}(d_o^2 - d_i^2)$	$\frac{\pi}{64}(d_o^4 - d_i^4)$	$\frac{\pi}{32}(d_o^4 - d_i^4)$	$\frac{\pi}{32d_o}(d_o^4 - d_i^4)$	$\frac{1}{6}(d_o^3 - d_i^3)$
	πab	$\frac{\pi}{4}ab^3$	$\frac{\pi a^3 b^3}{a^2 + b^2}$	$\frac{\pi}{2}ab^2$	—
	2π(ab) <sup>1/2</sup> t	$\frac{\pi}{4}ab^3t(\frac{1}{a} + \frac{3}{b})$	$\frac{4\pi ta^2 b^2}{(a+b)}$	$\frac{\pi ab^2 t}{2}(\frac{1}{a} + \frac{3}{b})$	—
	h <sub>o</sub> b <sub>o</sub> - h <sub>i</sub> b <sub>i</sub>	$\frac{1}{12}(b_o h_o^3 - b_i h_i^3)$	—	$\frac{1}{12h_o}(b_o h_o^3 - b_i h_i^3)$	$\frac{1}{4}(b_o h_o^2 - b_i h_i^2)$
	h <sub>o</sub> b <sub>i</sub> + h <sub>i</sub> b <sub>o</sub>	$\frac{1}{12}(b_i h_o^3 + b_o h_i^3)$	—	$\frac{1}{12h_o}(b_i h_o^3 + b_o h_i^3)$	$\frac{1}{4}(b_o h_o^2 + b_i h_i^2 - 2b_i h_i h_o)$
	$t\lambda(1 + (\frac{\pi d}{2\lambda})^2)$	$\frac{t\lambda d^2}{8}(1 - \frac{0.81}{1 + 2.5(\frac{d}{2\lambda})^2})$	—	—	—

FIG. A2 Moments of sections.

Lampiran 3: Tabel Safety Factor [2]

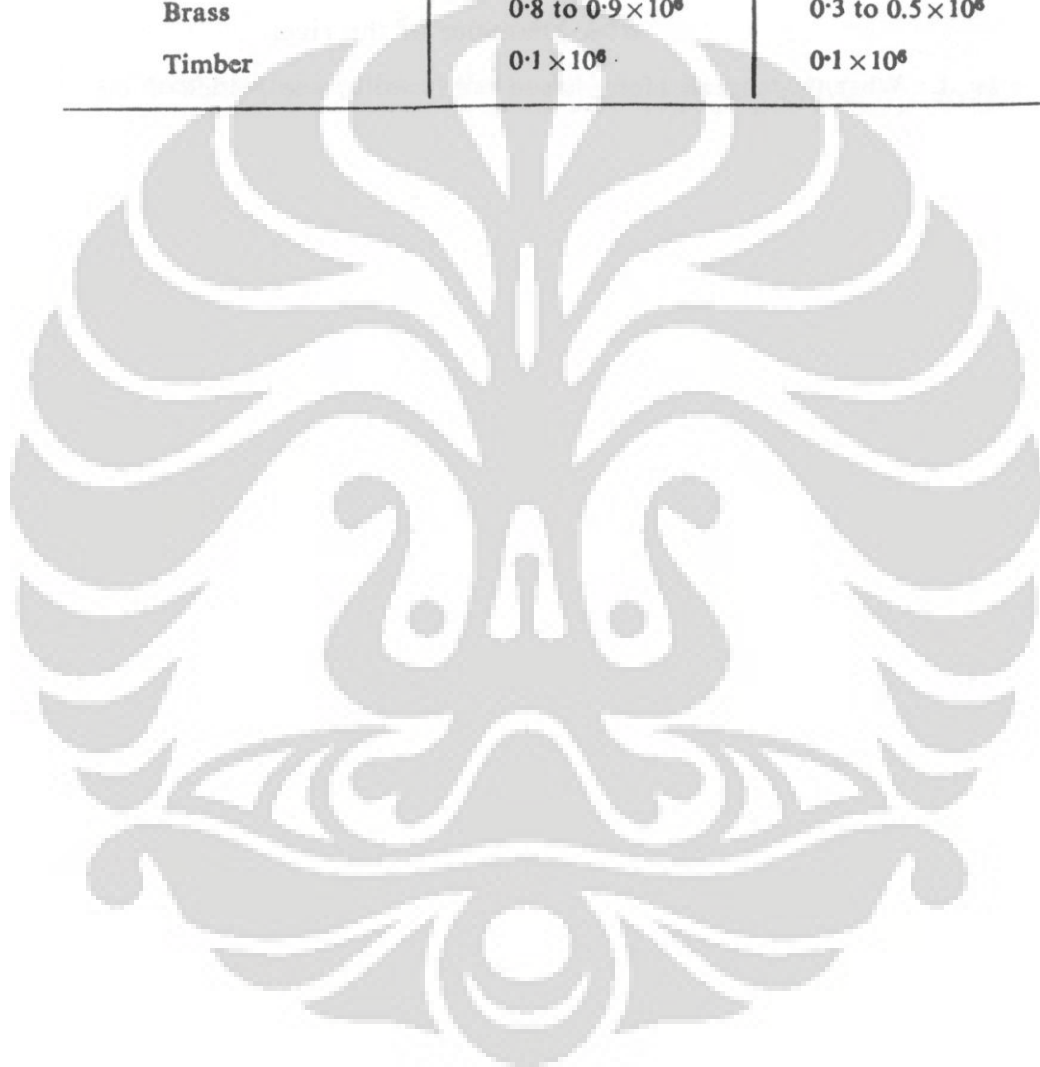
<i>Material</i>	<i>Steady load</i>	<i>Live load</i>	<i>Shock load</i>
<b>Cast iron</b>	<b>5 to 6</b>	<b>8 to 12</b>	<b>16 to 20</b>
<b>Wrought iron</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	<b>10 to 15</b>
<b>Steel</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>12 to 16</b>
<b>Soft materials and alloys</b>	<b>6</b>	<b>9</b>	<b>15</b>
<b>Leather</b>	<b>9</b>	<b>12</b>	<b>15</b>
<b>Timber</b>	<b>7</b>	<b>10 to 15</b>	<b>20</b>





Lampiran 4: Tabel Modulus Elastisitas dan Rigiditas [2]

<i>Material</i>	<i>E in kg/cm<sup>2</sup></i>	<i>N in kg/cm<sup>2</sup></i>
Steel	2 to $2.2 \times 10^6$	$0.8$ to $1.0 \times 10^6$
Wrought iron	$1.9$ to $2.0 \times 10^6$	$0.8$ to $0.9 \times 10^6$
Cast iron	$1.0$ to $1.6 \times 10^6$	$0.4$ to $0.5 \times 10^6$
Copper	$0.9$ to $1.1 \times 10^6$	$0.3$ to $0.5 \times 10^6$
Brass	$0.8$ to $0.9 \times 10^6$	$0.3$ to $0.5 \times 10^6$
Timber	$0.1 \times 10^6$	$0.1 \times 10^6$





Lampiran 5: Saturated ice – Water vapor [3]

**TABLE A-8**

Saturated ice–water vapor

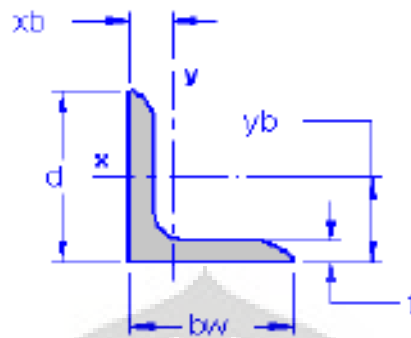
Temp., <i>T</i> °C	Sat. press., <i>P</i> <sub>sat</sub> kPa	Specific volume, m <sup>3</sup> /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K		
		Sat. ice, <i>v</i> <sub>i</sub> × 10 <sup>3</sup>	Sat. vapor, <i>v</i> <sub>g</sub>	Sat. ice, <i>u</i> <sub>i</sub>	Subl., <i>u</i> <sub>ig</sub>	Sat. vapor, <i>u</i> <sub>g</sub>	Sat. ice, <i>h</i> <sub>i</sub>	Subl., <i>h</i> <sub>ig</sub>	Sat. vapor, <i>h</i> <sub>g</sub>	Sat. ice, <i>s</i> <sub>i</sub>	Subl., <i>s</i> <sub>ig</sub>	Sat. vapor, <i>s</i> <sub>g</sub>
0.01	0.6113	1.0908	206.1	-333.40	2708.7	2375.3	-333.40	2834.8	2501.4	-1.221	10.378	9.156
0	0.6108	1.0908	206.3	-333.43	2708.8	2375.3	-333.43	2834.8	2501.3	-1.221	10.378	9.157
-2	0.5176	1.0904	241.7	-337.62	2710.2	2372.6	-337.62	2835.3	2497.7	-1.237	10.456	9.219
-4	0.4375	1.0901	283.8	-341.78	2711.6	2369.8	-341.78	2835.7	2494.0	-1.253	10.536	9.283
-6	0.3689	1.0898	334.2	-345.91	2712.9	2367.0	-345.91	2836.2	2490.3	-1.268	10.616	9.348
-8	0.3102	1.0894	394.4	-350.02	2714.2	2364.2	-350.02	2836.6	2486.6	-1.284	10.698	9.414
-10	0.2602	1.0891	466.7	-354.09	2715.5	2361.4	-354.09	2837.0	2482.9	-1.299	10.781	9.481
-12	0.2176	1.0888	553.7	-358.14	2716.8	2358.7	-358.14	2837.3	2479.2	-1.315	10.865	9.550
-14	0.1815	1.0884	658.8	-362.15	2718.0	2355.9	-362.15	2837.6	2475.5	-1.331	10.950	9.619
-16	0.1510	1.0881	786.0	-366.14	2719.2	2353.1	-366.14	2837.9	2471.8	-1.346	11.036	9.690
-18	0.1252	1.0878	940.5	-370.10	2720.4	2350.3	-370.10	2838.2	2468.1	-1.362	11.123	9.762
-20	0.1035	1.0874	1128.6	-374.03	2721.6	2347.5	-374.03	2838.4	2464.3	-1.377	11.212	9.835
-22	0.0853	1.0871	1358.4	-377.93	2722.7	2344.7	-377.93	2838.6	2460.6	-1.393	11.302	9.909
-24	0.0701	1.0868	1640.1	-381.80	2723.7	2342.0	-381.80	2838.7	2456.9	-1.408	11.394	9.985
-26	0.0574	1.0864	1986.4	-385.64	2724.8	2339.2	-385.64	2838.9	2453.2	-1.424	11.486	10.062
-28	0.0469	1.0861	2413.7	-389.45	2725.8	2336.4	-389.45	2839.0	2449.5	-1.439	11.580	10.141
-30	0.0381	1.0858	2943	-393.23	2726.8	2333.6	-393.23	2839.0	2445.8	-1.455	11.676	10.221
-32	0.0309	1.0854	3600	-396.98	2727.8	2330.8	-396.98	2839.1	2442.1	-1.471	11.773	10.303
-34	0.0250	1.0851	4419	-400.71	2728.7	2328.0	-400.71	2839.1	2438.4	-1.486	11.872	10.386
-36	0.0201	1.0848	5444	-404.40	2729.6	2325.2	-404.40	2839.1	2434.7	-1.501	11.972	10.470
-38	0.0161	1.0844	6731	-408.06	2730.5	2322.4	-408.06	2839.0	2430.9	-1.517	12.073	10.556
-40	0.0129	1.0841	8354	-411.70	2731.3	2319.6	-411.70	2839.9	2427.2	-1.532	12.176	10.644

Lampiran 6: Tabel densitas material [2]

TABLE 3.1  
PHYSICAL PROPERTIES OF SELECTED MATERIALS AT ROOM TEMPERATURE

Metal	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Melting Point (°C)	Specific Heat (J/kg K)	Thermal Conductivity (W/m K)
Aluminum	2700	660	900	222
Aluminum alloys	2630–2820	476–654	880–920	121–239
Beryllium	1854	1278	1884	146
Columbium (niobium)	8580	2468	272	52
Copper	8970	1082	385	393
Copper alloys	7470–8940	885–1260	377–435	29–234
Iron	7860	1537	460	74
Steels	6920–9130	1371–1532	448–502	15–52
Lead	11,350	327	130	35
Lead alloys	8850–11,350	182–326	126–188	24–46
Magnesium	1745	650	1025	154
Magnesium alloys	1770–1780	610–621	1046	75–138
Molybdenum alloys	10,210	2610	276	142
Nickel	8910	1453	440	92
Nickel alloys	7750–8850	1110–1454	381–544	12–63
Tantalum alloys	16,600	2996	142	54
Titanium	4510	1668	519	17
Titanium alloys	4430–4700	1549–1649	502–544	8–12
Tungsten	19,290	3410	138	166
Zinc	7140	419	385	113
Zinc alloys	6640–7200	386–525	402	105–113
<b>Nonmetallic</b>				
Ceramics	2300–5500	—	750–950	10–17
Glasses	2400–2700	580–1540	500–850	0.6–1.7
Graphite	1900–2200	—	840	5–10
Plastics	900–2000	110–330	1000–2000	0.1–0.4
Wood	400–700	—	2400–2800	0.1–0.4

Lampiran 7: Tabel plat siku sama kaki



Shape Designation $d \times b_w \times t$	Section Dimensional Data		Inside Corner Radius	External Edge Radius	Area of Section
	$d$ (mm)	$b_w$ (mm)	$R_1$ (mm)	$R$ (mm)	$A$ (cm <sup>2</sup> )
250 x 250 x 35	250	35	18	9	163
250 x 250 x 32	250	32	20	10	150
250 x 250 x 28	250	28	18	9	133
250 x 250 x 25	250	25	20	10	119
200 x 200 x 24	200	24	18	9	90.6
200 x 200 x 20	200	20	18	9	76.3
200 x 200 x 18	200	18	18	9	69.1
200 x 200 x 16	200	16	18	9	61.8
180 x 180 x 18	180	18	18	9	61.9
180 x 180 x 16	180	16	18	9	55.4
160 x 160 x 15	160	15	17	8.5	48.1
150 x 150 x 18	150	18	16	8	51
150 x 150 x 15	150	15	16	8	43
150 x 150 x 12	150	12	16	8	34.8
150 x 150 x 10	150	10	16	8	29.3
130 x 130 x 12	130	12	14	7	30
120 x 120 x 15	120	15	13	6.5	33.9
120 x 120 x 12	120	12	13	6.5	27.5
120 x 120 x 10	120	10	13	6.5	23.2
120 x 120 x 8	120	8	13	6.5	18.7
100 x 100 x 15	100	15	12	6	27.9
100 x 100 x 12	100	12	12	6	22.7
100 x 100 x 10	100	10	12	6	19.2

100 x 100 x 8	100	8	12	6	15.5
90 x 90 x 12	90	12	11	5.5	20.3
90 x 90 x 10	90	10	11	5.5	17.1
90 x 90 x 9	90	9	11	5.5	15.5
90 x 90 x 8	90	8	11	5.5	13.9
90 x 90 x 7	90	7	11	5.5	12.2
90 x 90 x 6	90	6	11	5.5	10.6
80 x 80 x 10	80	10	10	5	15.1
80 x 80 x 8	80	8	10	5	12.3
80 x 80 x 6	80	6	10	5	9.35
75 x 75 x 8	75	8	9	4.5	11.4
75 x 75 x 6	75	6	9	4.5	8.73
70 x 70 x 10	70	10	9	4.5	13.1
70 x 70 x 8	70	8	9	4.5	10.6
70 x 70 x 7	70	7	9	4.5	9.4
70 x 70 x 6	70	6	9	4.5	8.13
65 x 65 x 7	65	7	9	4.5	8.7
60 x 60 x 10	60	10	8	4	11.1
60 x 60 x 8	60	8	8	4	9.03
60 x 60 x 6	60	6	8	4	6.91
60 x 60 x 5	60	5	8	4	5.82
50 x 50 x 8	50	8	7	3.5	7.41
50 x 50 x 6	50	6	7	3.5	5.69
50 x 50 x 5	50	5	7	3.5	4.8
50 x 50 x 4	50	4	7	3.5	3.89
50 x 50 x 3	50	3	7	3.5	2.96
45 x 45 x 6	45	6	7	3.5	5.09
45 x 45 x 5	45	5	7	3.5	4.3
45 x 45 x 4.5	45	4.5	7	3.5	3.9
45 x 45 x 4	45	4	7	3.5	3.49
45 x 45 x 3	45	3	7	3.5	2.66
40 x 40 x 6	40	6	6	3	4.48
40 x 40 x 5	40	5	6	3	3.79
40 x 40 x 4	40	4	6	3	3.08
40 x 40 x 3	40	3	6	3	2.35
35 x 35 x 4	35	4	5	2.5	2.67
30 x 30 x 5	30	5	5	2.5	2.78

30 x 30 x 4	30	4	5	2.5	2.27
30 x 30 x 3	30	3	5	2.5	1.74
25 x 25 x 5	25	5	3.5	1.75	2.26
25 x 25 x 4	25	4	3.5	1.75	1.85
25 x 25 x 3	25	3	3.5	1.75	1.42
20 x 20 x 3	20	3	3.5	1.75	1.12

