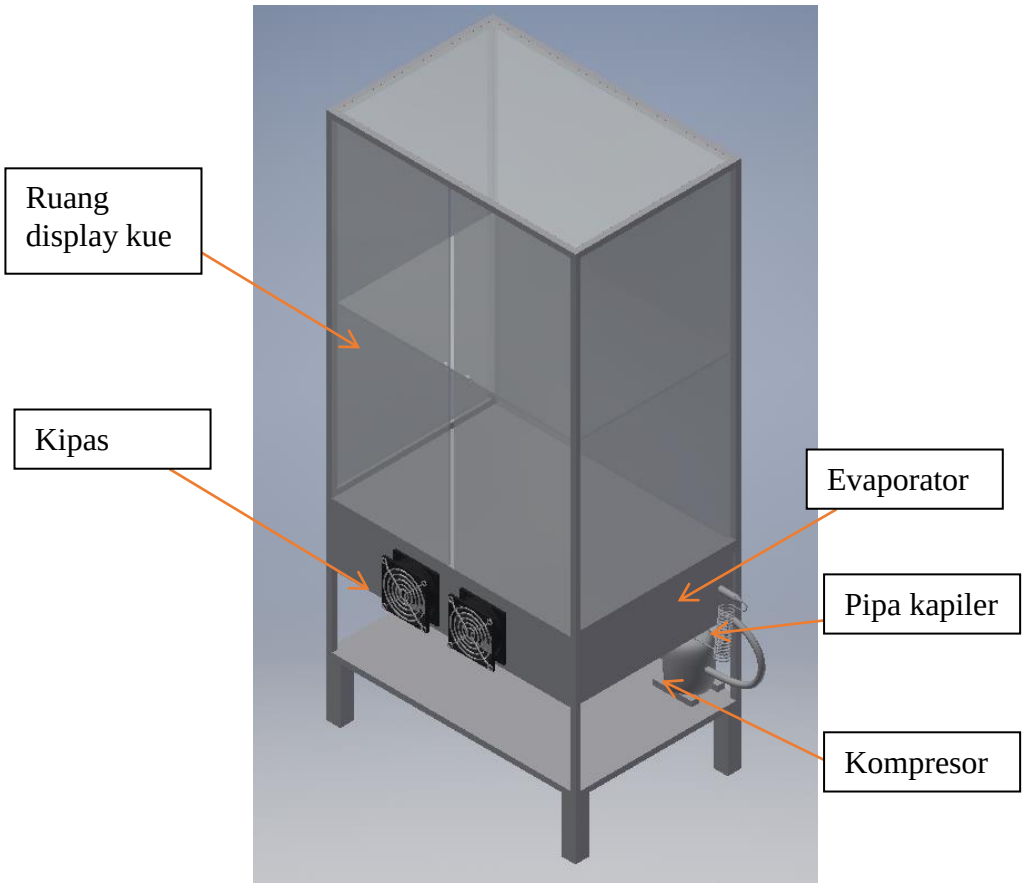
4. PERANCANGAN DAN PEMBUATAN

4.1. Perancangan Ruang *Cold Showcase*



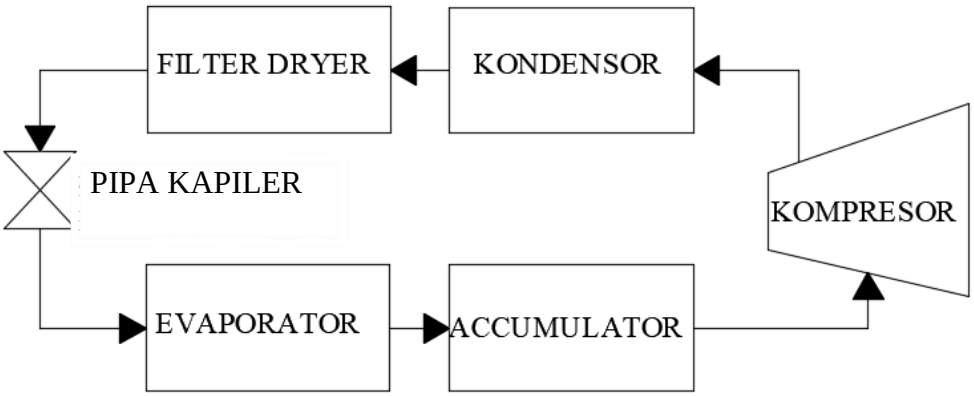
Gambar 4.1 Desain *cold showcase*

Pada Gambar 4.1 merupakan rancangan desain *cold showcase*. Pada desain tersebut terdapat evaporator, kompresor, katup ekspansi, lemari *showcase*. *Cold showcase* ini dirancang untuk menampung 2 buah *cake* berdiameter 20 cm dan 4 buah potongan *cake* dengan panjang 10 cm, maka dirancang suatu ruangan *cold showcase* dengan panjang 45 cm, lebar 30 cm dan panjang 65 cm. Berdasarkan data diatas maka volume ruangan *cold showcase* :

$$V_{cold\ showcase} = p \times l \times t$$
$$= 45 \times 30 \times 65$$
$$= 87750\ \text{cm}^3$$
$$= 87{,}75\ \text{L}$$

4.2. Perancangan Siklus Pendingin

Siklus yang dipilih untuk mesin pendingin adalah siklus kompresi uap ideal. Siklus ini memiliki sistem yang sederhana dan tidak membutuhkan ruang besar sehingga cocok untuk *cold showcase*. Siklus mesin ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Siklus pendingin mesin *Cold Showcase*

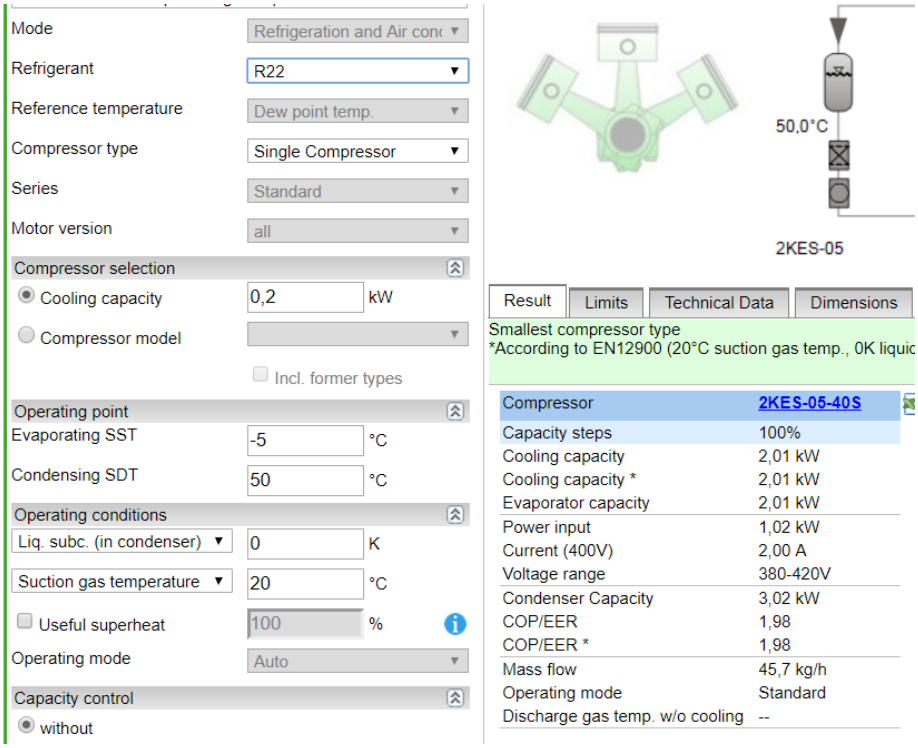
4.3. Penentuan Temperatur Kerja Evaporator

Produk yang ingin didinginkan adalah 2 buah *cake* berdiameter 20 cm dengan berat satu *cake* sekitar 1,5 kg dan 4 buah potongan *cake* sepanjang 10 cm dengan berat satu potongan sekitar 300 gram. Suhu ruangan c*old showcase* yang ingin dicapai adalah 7°C. Suhu lingkungan udara sekitar *cold showcase* adalah 22°C. Menurut Smith (p.361, 2005), perpindahan panas minimal memiliki beda temperatur sekitar 10-20°C, maka dari itu suhu *refrigerant* pada evaporator dirancang -5°C dan suhu *refrigerant* pada kondensor adalah 50°C.

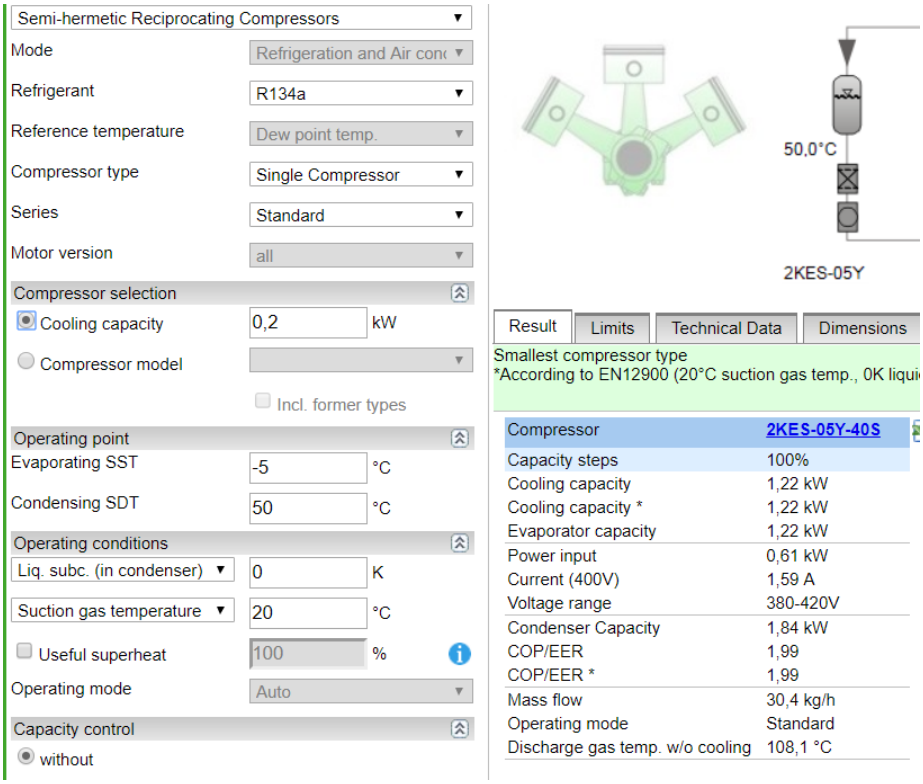
4.4. Penentuan Jenis *Refrigerant*

Ada berbagai jenis *refrigerant* yang digunakan untuk industri dan untuk keperluan *commercial* saat ini. Pemilihan *refrigerant* untuk mesin *cold showcase* berdasarkan faktor keamanan terhadap lingkungan dan kemampuannya untuk berubah fase pada tekanan kerja *cold showcase*. *Refrigerant* yang sering digunakan untuk mesin pendingin *commercial* adalah R-22, R-134a, R-32 dan R-410a karena *refrigerant* tersebut memiliki *cooling capacity* yang cukup besar. Hal ini dibuktikan pada contoh aplikasi perhitungan *condensing unit* dari salah satu *supplier*. Pada unit dan temperatur saturasi evaporator yang sama, *refrigerant* R-

22 mampu menanggung beban pendinginan yang lebih besar dibandingkan R-134a (Gambar 4.3). Tetapi pada tahun 2014 penggunaan R-22 mulai dilarang karena memiliki angka ODP dan GWP yang cukup besar sedangkan R-134a memiliki angka ODP dan GWP yang relatif lebih kecil. Data angka ODP dan GWP berbagai *refrigerant* terdapat pada Tabel 2.1. Sedangkan R-32 dan R-410a pada tahun 2014 pemakaian mulai dianjurkan untuk sistem pendingin AC karena memiliki *cooling capacity* yang paling besar dan tekanan *refrigerant* yang besar jika dibandingkan dengan R-22 dan R-134a. Tetapi apabila sistem pendingin menggunakan *refrigerant* R-32 dan R-410a memerlukan pipa tembaga yang besar agar kuat menahan tekanan *refrigerant* yang besar. Hal ini menyebabkan sistem pendingin memerlukan ruang yang lebih besar karena menggunakan pipa yang lebih besar. Maka dari itu *refrigerant* yang dipilih untuk mesin *cold showcase* adalah R-134a karena memiliki *cooling capacity* yang cukup besar, memiliki angka ODP dan GWP yang relatif kecil dan juga tekanan *refrigerant* yang rendah.

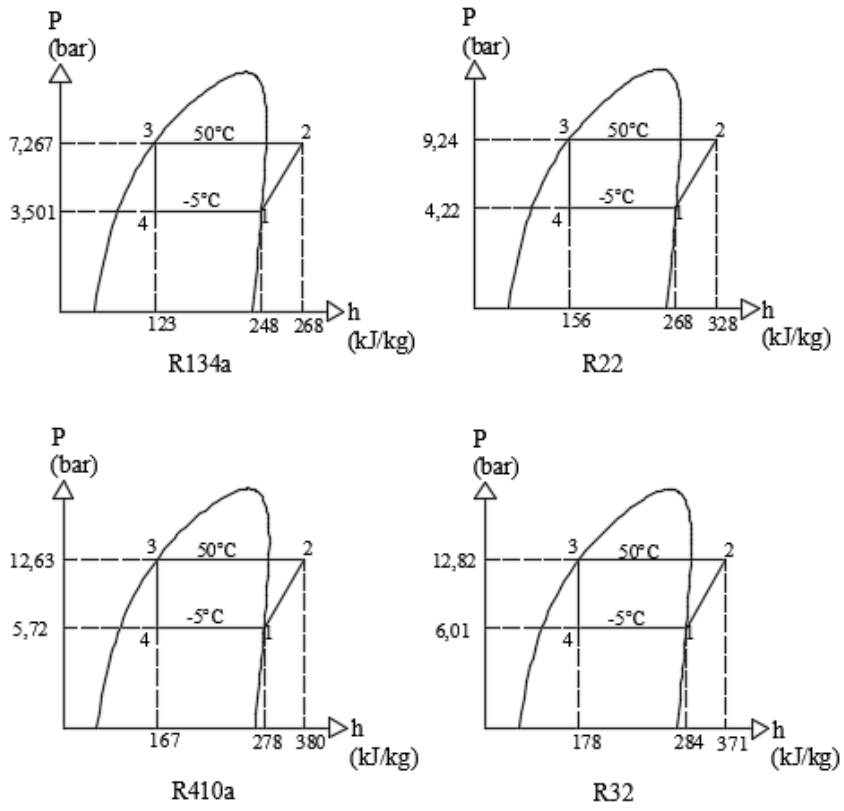


a. R-22



b. R-134a

Gambar 4.3 Perbandingan kinerja *refrigerant*
Sumber : https://www.bitzer.de/websoftware/



Gambar 4.4 Perbandingan P-h Diagram 4 *Refrigerant*

4.5. Perhitungan Beban Pendinginan

Beban pendinginan pada *cold showcase* adalah jumlah kalor yang diserap dari produk ke *refrigerant* ditambah jumlah kalor yang diserap dinding kaca ke *refrigerant* kemudian dibuang ke udara sekitar. Produk yang ingin didinginkan adalah 2 buah *cake* berdiameter 20 cm dengan berat satu *cake* sekitar 1,5 kg dan 4 buah potongan *cake* sepanjang 10 cm dengan berat satu potongan sekitar 300 gram. Produk tersebut didinginkan dari suhu 27°C menjadi 7°C dalam waktu 20 menit. Berikut perhitungan besar kalor yang dilepas dari produk dan dinding.

4.5.1. Beban kalor dari produk

Massa total *cake* adalah 3 kg dan massa total potongan *cake* adalah 1,2 kg, sedangkan kalor jenis *cake* adalah 2613 J/kg.°C, maka beban kalor keseluruhan dari produk :

$$\dot{Q}_1 = \frac{m_{cake} \times Cp_{cake} \times (T_1 - T_2)}{t}$$

$$= \frac{3 \times 2613 \times (27-7)}{20 \times 60}$$

$$= 130{,}65 \text{ Watt}$$

$$\dot{Q}_2 = \frac{m_{potongan\ cake} \times Cp_{potongan\ cake} \times (T_1 - T_2)}{t}$$

$$= \frac{1{,}2 \times 2613 \times (27-7)}{20 \times 60}$$

$$= 52{,}26 \text{ Watt}$$

$$\dot{Q}_{produk} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2$$

$$= 130{,}65 + 52{,}26$$

$$= 182{,}91 \text{ Watt}$$

4.5.2. Beban kalor dari dinding

Pada perhitungan beban kalor dari dinding, bagian luar dinding menggunakan konveksi alami sedangkan untuk bagian dalam dingin menggunakan konveksi paksa yang berasal dari kipas. Berdasarkan pengukuran kipas yang digunakan memiliki kecepatan udara sebesar 2,4 m/s atau laju aliran massa udaranya sebesar 0,028 kg/s. Kecepatan udara didalam ruangan *showcase* sebesar 0,5 m/s atau laju aliran massa udaranya sebesar 0,002 kg/s.

Beberapa perhitungan yang harus dilakukan untuk menghitung beban kalor dari dinding adalah, menghitung *Rayleigh number* dan *Reynold number*, menghitung *Nusselt number*, menghitung jala-jala termal, dan yang terakhir menghitung beban kalor dari dinding. Pada setiap langkah perhitungan perlu dibagi antara dinding horizontal dengan dinding vertikal karena memiliki perbedaan persamaan.

4.5.2.1. Perhitungan *Rayleigh number* dan *Reynold number*

Perhitungan *Rayleigh number* pada dinding *cold showcase* menggunakan Persamaan (2.12) dengan data tabel *properties* udara pada 1 atm (data terdapat pada lampiran 4). *Rayleigh number* yang perlu dihitung berada pada 2 kondisi yaitu pada bagian luar *cold showcase* dan bagian dalam. Maka dari itu perlu dihitung dahulu koefisien ekspansi volume (β) dengan menggunakan Persamaan

(2.11). T_f untuk $\beta_{bagian\ luar\ cold\ showcase}$ adalah (295 K + 293 K)/2 = 294 K. T_f untuk $\beta_{bagian\ dalam\ cold\ showcase}$ adalah (280 K + 283 K)/2 = 281,5 K.

$$\beta_{bagian\ luar\ cold\ showcase} = \frac{1}{T_f}$$
$$= \frac{1}{294\ K}$$
$$= 0{,}003401$$

$$\beta_{bagian\ dalam\ cold\ showcase} = \frac{1}{T_f}$$
$$= \frac{1}{281{,}5\ K}$$
$$= 0{,}003552$$

- ***Rayleigh number*** **dan** ***Reynold number*** **pada dinding posisi vertikal**

$$Ra_{L_{bagian\ luar}} = \frac{\beta \times g \times (T_s - T_\infty) \times {L_c}^3 \times Pr}{v^2}$$
$$= \frac{0{,}003401 \times 9{,}81 \times (22 - 20) \times 0{,}6^3 \times 0{,}73025}{(0{,}00001539)^2}$$
$$= 4{,}864 \times 10^8$$

$$Re_{L_{bagian\ dalam}} = \frac{V_{udara} L}{v}$$
$$= \frac{0{,}5 \times 0{,}6}{0{,}000013908}$$
$$= 21570{,}3$$

- ***Rayleigh number*** **dan** ***Reynold number*** **pada dinding posisi horizontal**

$$Ra_{L_{bagian\ luar}} = \frac{\beta \times g \times (T_s - T_\infty) \times {L_c}^3 \times Pr}{v^2}$$
$$= \frac{0{,}003401 \times 9{,}81 \times (22 - 20) \times 0{,}075^3 \times 0{,}73025}{(0{,}00001539)^2}$$
$$= 9{,}5 \times 10^5$$

$$Re_{L_{bagian\ dalam}} = \frac{V_{udara} L}{v}$$

$$= \frac{0{,}8 \times 0{,}4}{0{,}000013908}$$

$$= 14380{,}2$$

4.5.2.2. Perhitungan Koefisien Konveksi

Perhitungan *Nusselt number* pada dinding *cold showcase* menggunakan data pada Tabel 2.2 dengan data tabel *properties* udara pada 1 atm (data terdapat pada lampiran 4). *Nusselt number* yang perlu dihitung berada pada 2 kondisi yaitu pada bagian luar *cold showcase* dan bagian dalam.

- ***Nusselt number* pada dinding posisi vertikal**

$$Nu_{bagian\ luar} = \{0{,}825 + \frac{0{,}387 \times {Ra_L}^{1/6}}{[1 + (\frac{0{,}492}{Pr})^{9/16}]^{8/27}}\}^2$$

$$= \{0{,}825 + \frac{0{,}387 \times (4{,}864 \times 10^8)^{1/6}}{[1 + (\frac{0{,}492}{0{,}73025})^{9/16}]^{8/27}}\}^2$$

$$= 98{,}841$$

$$h_{1,vertikal} = \frac{k \times Nu}{L}$$

$$= \frac{0{,}02484 \times 98{,}841}{0{,}6}$$

$$= 2{,}0071 \text{ W/m}^2.°\text{C}$$

$$Nu_{bagian\ dalam} = 0{,}664 \times {Re_L}^{0{,}5} \times Pr^{1/3}$$

$$= 0{,}664 \times (21570{,}3)^{0{,}5} \times (0{,}73472)^{1/3}$$

$$= 87{,}997$$

$$h_{2,vertikal} = \frac{k \times Nu}{L}$$

$$= \frac{0{,}02409 \times 87{,}997}{0{,}6}$$

$$= 3{,}532 \text{ W/m}^2.°\text{C}$$

- ***Nusselt number*** **pada dinding posisi horizontal**

$$Nu_{bagian\ luar} = 0{,}54 \times {Ra_L}^{1/4}$$
$$= 0{,}54 \times (9{,}5 \times 10^5)^{1/4}$$
$$= 16{,}858$$

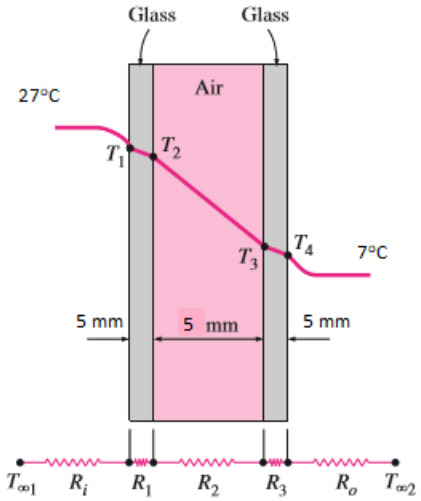
$$h_{1,horizontal} = \frac{k \times Nu}{L}$$
$$= \frac{0{,}02484 \times 16{,}858}{0{,}4}$$
$$= 2{,}019\ \text{W/m}^2.°\text{C}$$

$$Nu_{bagian\ dalam} = 0{,}332 \times {Re_L}^{0{,}5} \times Pr^{1/3}$$
$$= 0{,}332 \times (14380{,}2)^{0{,}5} \times (0{,}73472)^{1/3}$$
$$= 35{,}924$$

$$h_{2,horizontal} = \frac{k \times Nu}{L}$$
$$= \frac{0{,}02409 \times 35{,}924}{0{,}4}$$
$$= 2{,}163\ \text{W/m}^2.°\text{C}$$

4.5.2.3. Perhitungan Beban Kalor dari Dinding

Skema jala-jala termal pada dinding *cold showcase* dapat dijelaskan pada Gambar 4.5. Perhitungan jala-jala termal juga dibedakan untuk dinding dengan posisi vertikal dan posisi horizontal. Data mengenai konduktivitas termal kaca berada pada tabel *properties* matertial (data terdapat pada lampiran 5) sedangkan untuk konduktivitas termal udara berada pada tabel *properties* udara pada 1 atm (data terdapat pada lampiran 4).



Gambar 4.5 Skema jala-jala termal

- **Jala-jala termal pada dinding posisi vertikal**

$$R_{total} = R_{konveksi\,1} + R_{glass\,1} + R_{udara} + R_{glass\,2} + R_{konveksi\,2}$$

$$R_{total} = \frac{1}{h_{1,vertikal} \times A} + \frac{L_1}{k_1 \times A} + \frac{L_u}{k_u \times A} + \frac{L_2}{k_2 \times A} + \frac{1}{h_{2,vertikal} \times A}$$

$$= \frac{1}{2{,}007 \times 0{,}18} + \frac{0{,}005}{0{,}7 \times 0{,}18} + \frac{0{,}005}{0{,}026 \times 0{,}18} + \frac{0{,}005}{0{,}7 \times 0{,}18} + \frac{1}{3{,}532 \times 0{,}18}$$

$$= 55{,}041\ °C/W$$

- **Jala-jala termal pada dinding posisi horizontal**

$$R_{total} = R_{konveksi\,1} + R_{glass\,1} + R_{udara} + R_{glass\,2} + R_{konveksi\,2}$$

$$R_{total} = \frac{1}{h_{1,horizontal} \times A} + \frac{L_1}{k_1 \times A} + \frac{L_u}{k_u \times A} + \frac{L_2}{k_2 \times A} + \frac{1}{h_{2,horizontal} \times A}$$

$$= \frac{1}{2{,}091 \times 0{,}12} + \frac{0{,}005}{0{,}7 \times 0{,}12} + \frac{0{,}005}{0{,}026 \times 0{,}12} \frac{0{,}005}{0{,}7 \times 0{,}12} + \frac{1}{2{,}163 \times 0{,}12}$$

$$= 96{,}998\ °C/W$$

Perhitungan beban kalor dari dinding membutuhkan data perhitungan sebelumnya *overall heat transfer coefficient*. *Overall heat transfer coefficient* dapat dicari dengan menggabungkan koefisien konveksi dan koefisien konduksi dari jala-jala termal.

$$\dot{Q}_{dinding\ vertikal} = U \times \Delta T\ [2A_1 + 2A_2]$$

$$= (2{,}007 + \frac{0{,}7}{0{,}005} + \frac{0{,}026}{0{,}005} + \frac{0{,}7}{0{,}005} + 3{,}532) \times (22 - 7)\ [2 \times 0{,}18 + 2 \times 0{,}24]$$

$$= 146{,}22 \text{ Watt}$$

$$\dot{Q}_{dinding\ horizontal} = U \times \Delta T \times A$$

$$= (2{,}091 + \frac{0{,}7}{0{,}005} + \frac{0{,}026}{0{,}005} + \frac{0{,}7}{0{,}005} + 2{,}163) \times (22 - 7) \times 0{,}12$$

$$= 15{,}60 \text{ Watt}$$

$$\dot{Q}_{dinding\ total} = \dot{Q}_{dinding\ vertikal} + \dot{Q}_{dinding\ horizontal}$$

$$= 146{,}22 + 15{,}60$$

$$= 161{,}826 \text{ Watt}$$

$$\dot{Q}_{beban\ pendingin} = \dot{Q}_{produk} + \dot{Q}_{dinding\ total}$$

$$= 182{,}91 + 161{,}826$$

$$= 344{,}736 \text{ Watt}$$

4.6. Perhitungan Laju Aliran Massa Udara yang Diperlukan

Berdasarkan data dari tabel gas ideal (data terdapat pada lampiran 1), pada temperatur 7°C didapatkan entalpi ($h_{7°C}$) sebesar 280,13 kJ/kg. Pada temperatur 2°C didapatkan entalpi ($h_{2°C}$) sebesar 275,12 kJ/kg. Beban kalor didalam showcase dilepaskan ke udara yang masuk pada temperatur 2°C. Laju aliran massa udara yang diperlukan dapat dihitung dengan Persamaan (2.4).

$$\dot{m}_{udara} = \frac{\dot{Q}_{beban\ pendingin}}{h_{7°C} - h_{2°C}}$$

$$= \frac{344{,}736}{280{,}13 - 275{,}12}$$

$$= 0{,}0688 \text{ kg/s}$$

Berdasarkan perhitungan laju aliran massa udara yang diperlukan, dapat ditentukan jumlah kipas untuk ruangan *showcase* dengan cara membandingkan laju aliran massa udara yang diperlukan dengan laju aliran massa dari 1 buah kipas.

$$jumlah\ kipas = \frac{laju\ aliran\ massa\ udara\ yang\ diperlukan}{laju\ aliran\ massa\ udara\ 1\ kipas}$$

$$= \frac{0{,}0688}{0{,}028}$$

$$= 2{,}4 \text{ buah kipas}$$

Maka kipas yang diperlukan pada ruangan *showcase* adalah 2,4 buah kipas atau dibulatkan keatas yaitu 3 buah kipas.

4.7. Perhitungan Laju Aliran Massa *Refrigerant*

Didalam evaporator, udara yang didinginkan dari temperatur 22°C menjadi temperatur 2°C. Perhitungan laju aliran massa *refrigerant* menggunakan data laju aliran massa udara dan IRC *Fluid Property Calculator* (data terdapat pada lampiran 2). Entalpi pada titik 1 (h_1) sebesar 248 kJ/kg dan entalpi pada titik 3 (h_3) sebesar 123 kJ/kg, sedangkan entalpi pada titik 3 sama dengan titik 4 ($h_3 = h_4$). Menurut tabel *properties* udara, kalor jenis udara sebesar 1,005 kJ/kg (data terdapat pada lampiran 3). Maka perhitungan laju aliran massa *refrigerant* :

$$\dot{m}_{refrigerant} \times (h_1 - h_4) = \dot{m}_{udara} \times C_{p\ udara} \times \left(T_{h,in} - T_{h,out}\right)$$

$$\dot{m}_{refrigerant} = \frac{\dot{m}_{udara} \times C_{p\ udara} \times \left(T_{h,in} - T_{h,out}\right)}{(h_1 - h_4)}$$

$$= \frac{0{,}0688 \times 1{,}005 \times (22 - 2)}{(248 - 123)}$$

$$= 0{,}01106 \text{ kg/s}$$

4.8. Penentuan Kompresor

Jenis kompresor yang digunakan untuk pembuatan *cold showcase* adalah kompresor jenis *hermetic* dengan merk Sikelan. Kompresor tersebut perlu menanggung beban dari evaporator sebesar 344,736 Watt dan dapat bekerja di temperatur tinggi. Spesifikasi dari kompresor dapat dilihat pada Gambar 4.6.

SIKELAN

>>> 制冰机专用压缩机
Compressor specialized for Ice-maker

◆R134A 中/高背压压缩机 电压220-240V/50-60Hz
◆R134A M/HBP 220-240V/50-60Hz

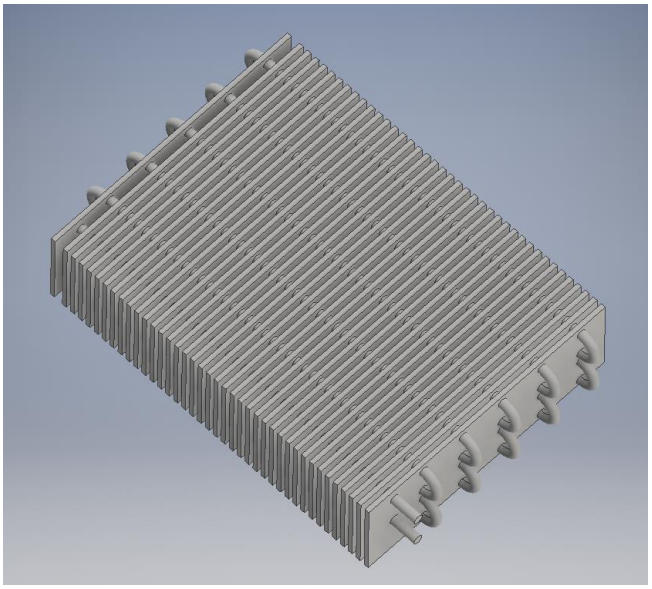
Serial	Model	HP	V / Hz	Displacement	Cooling Capacity						Motor Type	Flow Rate (kg/s)	Starting Device	Certificate
					-15°C		-10°C		-5°C					
					W	Btu/h	W	Btu/h	W	Btu/h				
L	GQR30TZ	1/10	220-240 V / 50-60 Hz	3.0	112	382	145	495	185	631	RSIR	0,0436	PTC / Current Starting Relay	CCC
	GQR35TZ	1/9		3.5	136	464	164	560	215	734	RSIR	0,0583		CCC
MS	GQR45TZ	1/6		4.5	177	604	230	785	280	955	RSIR	0,0653		CCC
	GQR55TZ	1/6+		5.5	188	641	245	836	310	1058	RSIR	0,0724		CCC
WZ	GQR80TZ	1/4+		8.0	324	1105	420	1433	550	1877	CSIR	0,0921	Current Starting Relay	CCC
	GQR90TZ	1/3-		9.1	365	1245	474	1617	621	2119	CSIR	0,0972		CCC
	GQR11TZ	3/8		11.0	412	1406	536	1829	702	2395	CSIR	0,2397		CCC
	GQR12TZ	3/8+		12.8	467	1593	606	2068	793	2706	CSIR	0,3971		CCC
	GQR14TZ	1/2		14.2	527	1798	685	2337	896	3057	CSIR	0,5781		CCC
	GQR16TZ	1/2+		15.3	580	1979	754	2573	1012	3453	CSIR	0,6793		CCC

Gambar 4.6 Spesifikasi kompresor
Sumber :
http://www.sikelan.com/english/uploadfile/%E5%88%B6%E5%86%B0%E6%9C%BA%E4%B8%93%E7%94%A8%E5%8E%8B%E7%BC%A9%E6%9C%BA.pdf

Berdasarkan Gambar 4.6, kompresor yang dipilih adalah merk Sikelan dengan tipe GQR11TZ. Kompresor tersebut dipilih karena memiliki *cooling capacity* yang paling mendekati perhitungan beban pendingin, yaitu sebesar 702 Watt.

4.9. Perancangan Evaporator

Pada mesin *cold showcase* ini desain evaporator yang akan digunakan ditunjukkan pada Gambar 4.7. Desain evaporator ini menggunakan tipe *one pass shell and tube*. Rencana desain evaporator yang akan dibuat ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Rencana desain evaporator

4.9.1. Perhitungan Koefisien Konveksi di dalam Pipa

Penentuan koefisien pada evaporator digunakan teori *flow boiling* karena proses yang terjadi pada *refrigerant* saat melalui evaporator adalah proses *flow boiling*, yaitu proses berubahnya fasa *refrigerant* dari *mixture* saat masuk evaporator menjadi uap jenuh saat keluar evaporator. Pipa yang digunakan adalah pipa tembaga dengan diameter ¼ inch atau 0,0063 m. Data-data yang digunakan pada perhitungan koefisien konveksi *two phase refrigerant* berada pada Tabel saturasi *refrigerant* 134a (data pada lampiran 6).

$$A_{c\ inside} = \frac{\pi}{4} {D_{in}}^2$$

$$= \frac{\pi}{4} \times (0{,}0063)^2$$

$$= 0{,}0000311\ m^2$$

Selanjutnya adalah menghitung *mass flux refrigerant* dengan Persamaan (2.18). Laju aliran massa *refrigerant* yang dipakai adalah laju aliran massa dari kompresor yaitu 0,02397 kg/s. Data tersebut terdapat pada Gambar 4.6.

$$G = \frac{\dot{m}_{refrigerant}}{A_{c\ inside}}$$

$$= \frac{0{,}02397}{0{,}0000311}$$

$$= 769{,}01 \frac{kg}{m^2}.s$$

Dari data IRC *Fluid Property Calculator* (data pada lampiran 2) menunjukkan entalpi *refrigerant* fasa cair pada titik 4 (h_{4f}) adalah 45,15 kJ/kg, sedangkan pada fasa gas (h_{4g}) adalah 247,495 kJ/kg. Besar entalpi pada titik empat sama dengan pada titik tiga (h_3= h_4) adalah 123 kJ/kg, maka kualitas massa *refrigerant* (x) dapat dihitung dengan Persamaan (2.19).

$$x = \frac{h_4 - h_{4f}}{h_{4g} - h_{4f}}$$

$$= \frac{123 - 45{,}15}{247{,}495 - 45{,}15}$$

$$= 0{,}3847$$

Langkah berikutnya adalah menghitung panjang karakteristik partikel uap (L_c) pada subregion terjadinya *forced* evaporating dengan Persamaan (2.17).

$$L_c = \sqrt{\frac{\sigma}{g\,(\rho_f - \rho_g)}}$$

$$= \sqrt{\frac{0{,}01229}{9{,}81 \times (1311 - 12{,}07)}}$$

$$= 0{,}000982\ m$$

Setelah itu menghitung *Reynold number* (Re_m) dengan Persamaan (2.20).

$$Re_m = G \times [1 + x\left(\frac{\rho_f}{\rho_g} - 1\right)] \times \frac{L_c}{\mu_f}$$

$$= 769{,}019 \times [1 + 0{,}3847\left(\frac{1311}{12{,}07} - 1\right)] \times \frac{0{,}000982}{0{,}0002947}$$

$$= 108671{,}3$$

Maka koefisien konveksi *two phase boiling* pada *refrigerant* dapat dihitung dengan Persamaan (2.21).

$$h_{2P} = \frac{0{,}087 \times {Re_m}^{0{,}6} \times {Pr_f}^{1/6} \times (\frac{\rho_g}{\rho_f})^{0{,}2} \times k_f}{L_c}$$

$$= \frac{0{,}087 \times (108671{,}3)^{0{,}6} \times (4{,}051)^{1/6} \times (\frac{12{,}07}{1311})^{0{,}2} \times 0{,}0968}{0{,}000982}$$

$$= 28{,}5432\ \mathrm{W/m^2.°C}$$

4.9.2. Perhitungan Koefisien Konveksi Udara

Perhitungan koefisien konveksi menggunakan prinsip perpindahan panas secara konveksi paksa. Udara yang dialirkan berasal dari kipas yang laju aliran massa udaranya sesuai perhitungan laju aliran massa udara. Perhitungan pertama yang dilakukan adalah menghitung kecepatan udara yang mengalir pada evaporator.

$$v_m udara = \frac{\dot{m}_{udara}}{\rho \times A_{c\ outside}}$$

$$= \frac{0{,}0688}{1{,}196 \times (0{,}09 \times 0{,}18)}$$

$$= 3{,}551\ m/s$$

Kemudian menghitung *Reynold number* dengan Persamaan (2.15).

$$Re_D = \frac{\rho \times v_m \times Dh}{\mu}$$

$$= \frac{1{,}196 \times 3{,}551 \times 0{,}12}{0{,}000018346}$$

$$= 1736{,}41$$

Langkah selanjutnya adalah menghitung *Nusselt number*. *Nusselt number* tersebut digunakan untuk menentukan koefisien konveksi udara di evaporator.

$$Nu_o = 0{,}3 + \frac{0{,}62{Re_D}^{1/2}Pr^{1/3}}{[1 + (0{,}4/Pr)^{2/3}]^{1/4}}\left[1 + \left(\frac{Re_D}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$$

$$= 0{,}3 + \frac{0{,}62 \times (1736{,}41)^{1/2} \times (0{,}73038)^{1/3}}{[1 + (0{,}4/0{,}73038)^{2/3}]^{1/4}}\left[1 + \left(\frac{1736{,}41}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$$

$$= 21{,}446$$

$$h_o = \frac{k \times Nu_o}{Do}$$

$$= \frac{0{,}025288 \times 21{,}446}{0{,}075}$$

$$= 72{,}311 \text{ W/m}^2.°\text{C}$$

4.9.3. Perhitungan *Overall Heat Transfer Coefficient*

Overall heat transfer coefficient pada sistem silinder dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.16). Koefisien konduktivitas dari tembaga ($k_{tembaga}$) adalah 401 W/m.K.

$$U_i . A_{c\ inside} = \frac{1}{\frac{1}{h_{2p.} A_{c\ inside\ pipe}} + \frac{\ln(ro/ri)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_{o.} A_{c\ outside\ pipe}}}$$

$$U_i \times 2\pi r_i L = \frac{1}{\frac{1}{h_{2p.} A_{c\ inside\ pipe}} + \frac{\ln(ro/ri)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_{o.} A_{c\ outside\ pipe}}}$$

$$U_i = \frac{1}{\frac{2\pi r_i L}{h_{2p}.\, 2\pi r_i L} + \frac{\ln(ro/ri) \times 2\pi r_i L}{2\pi kL} + \frac{2\pi r_i L}{h_{o.} 2\pi r_o L}}$$

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_{2p}} + \frac{\ln(ro/ri) \times r_i}{k} + \frac{r_i}{h_{o.} r_o}}$$

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{28{,}5432} + \frac{\ln(0{,}00375/0{,}00315) \times r_i}{401} + \frac{0{,}00315}{72{,}311 \times 0{,}00375}}$$

$$= 153{,}252 \text{ W/m}^2.°\text{C}$$

4.9.4. Perhitungan Panjang Pipa Evaporator

Perhitungan panjang pipa pada evaporator menggunakan persamaan *heat exchanger*. *Heat exchanger* pada evaporator dianalisa dengan menggunakan metode NTU. Tipe *heat exchanger* yang digunakan adalah *shell and tube*. Langkah pertama yang dilakukan adalah menghitung *heat capacity rates* dengan menggunakan Persamaan (2.23).

$$C_{udara} = \dot{m}_{udara} \times Cp_{udara}$$

$$= 0{,}0688 \times 1{,}005$$

$= 0{,}069\ kW/°C$

$$C_{r134a} = \dot{m}_{refrigerant} \times Cp_{r134a}$$
$$= 0{,}0239 \times 1{,}326$$
$$= 0{,}0318\ kW/°C$$

Kemudian menghitung *capacity ratio* dengan menggunakan Persamaan (2.24).

$$c = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$
$$= \frac{0{,}0318}{0{,}069}$$
$$= 0{,}459$$

Langkah selanjutnya adalah menghitung *maximum rate of heat transfer* dengan menggunakan Persamaan (2.25).

$$Q_{max} = C_{min}(T_{min} - T_{max})$$
$$= 0{,}0318(22 - (-5))$$
$$= 0{,}8586\ kW$$
$$= 858{,}6\ W$$

Setelah itu menghitung *effectiveness* dengan menggunakan Persamaan (2.26).

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}}$$
$$= \frac{344{,}736}{858{,}6}$$
$$= 0{,}401$$

Langkah terakhir adalah menghitung NTU dengan tipe *heat exchanger shell and tube* menggunakan data pada Tabel 2.3.

$$NTU = -\frac{1}{\sqrt{1+c^2}} \ln\left(\frac{\frac{2}{\varepsilon} - 1 - c - \sqrt{1+c^2}}{\frac{2}{\varepsilon} - 1 - c + \sqrt{1+c^2}}\right)$$

$$= -\frac{1}{\sqrt{1+(0{,}459)^2}} \ln\left(\frac{\frac{2}{0{,}401} - 1 - (0{,}459) - \sqrt{1+(0{,}459)^2}}{\frac{2}{0{,}401} - 1 - (0{,}459) + \sqrt{1+(0{,}459)^2}}\right)$$

$$= 0{,}587$$

Setelah mendapatkan NTU maka dapat digunakan untuk menghitung panjang pipa pada evaporator dengan menggunakan Persamaan (2.27).

$$A_s = \frac{NTU \times C_{min}}{U_i}$$

$$= \frac{0{,}587 \times 0{,}0318}{153{,}252}$$

$$= 0{,}1219\ m^2$$

$$L = \frac{A_s}{\pi D}$$

$$= \frac{0{,}1219}{\pi \times 0{,}075}$$

$$= 5{,}174 \text{ m}$$

4.10. Penentuan Evaporator

Berdasarkan perhitungan *heat exchanger* evaporator pada perancangan evaporator, maka panjang pipa evaporator sebesar 5,174 m. Diameter pipa yang digunakan adalah ¼ inch. Material pipa evaporator menggunakan pipa tembaga. Dimensi evaporator yang digunakan yaitu panjang 40 cm, lebar 30 cm dan tebal 10 cm. Dimensi evaporator tersebut menyesuaikan dengan *cold showcase* yang memiliki panjang 45 cm dan lebar 30 cm.

4.11. Penentuan *Expansion Valve*

Berdasarkan perancangan dan skema sistem pendingin yang tidak terlalu besar pada *cold showcase* ini, maka *expansion valve* yang dipakai adalah pipa kapiler. Pipa kapiler yang digunakan memiliki diameter 0,31 mm dengan panjang 3 m.

4.12. Penentuan Kondensor

Kondensor diletakkan pada *showcase* hangat untuk dimanfaatkan kalor yang dilepaskan. Letak *showcase* hangat berada di sebelah kanan kompresor. Rancangan kondensor pada sistem pendingin *cold showcase* ini menggunakan hasil rancangan kondensor pada Tugas Akhir milik saudara Christoper Pratama Djaya yang berjudul "Perancangan *Heater Showcase* dengan Memanfaatkan Panas Kondensor". Berdasarkan hasil rancangan kondensor tersebut didapatkan bahwa kondensor memiliki panjang pipa 10 m dengan panjang 40 cm, lebar 25 cm dan tebal 10 cm.

4.13. Pembuatan *Cold Showcase*

Langkah pertama dalam pembuatan *cold showcase* ini adalah membuat lemari kaca yang digunakan untuk meletakkan kue. Kaca pada *cold showcase* ini menggunakan prinsip *double pane window* pada sisi depan, kiri dan kanan untuk menghindari terjadinya pengembunan.

Gambar 4.8 Lemari kaca *cold showcase*

Kemudian memilih evaporator dengan pipa ¼ inch dengan panjang 40 cm, lebar 30 cm, tebal 10 cm dan panjang pipa evaporator 7 m. Dimensi evaporator ini disesuaikan dengan panjang dan lebar dari lemari *cold showcase*. Pipa ¼ inch

dipilih untuk menyesuaikan pipa *suction* pada kompresor yang berukuran ¼ inch. Material dari pipa evaporator adalah aluminium. Pada Gambar 4.9, evaporator memiliki 16 baris pipa, sehingga apabila dikalikan dengan panjang 40 cm maka didapatkan panjang 6,4 m. Pada lengkungan pipa evaporator memiliki radius 3 cm dengan jumlah lengkungan 16 buah sehingga panjang lengkungan adalah 48 cm. Jadi apabila ditotal keseluruhan evaporator memiliki panjang kurang lebih 7 m.

Gambar 4.9 Bentuk evaporator

Pemilihan evaporator yang sudah ada dilakukan karena terdapat keterbatasan waktu untuk membuat evaporator baru. Selain itu untuk membuat evaporator baru diperlukan dana yang lebih besar dibandingkan dengan membeli evaporator yang sudah ada. Maka dari itu evaporator yang dibeli menyesesuaikan dengan spesifikasi evaporator yang sudah dirancang.

Langka berikutnya adalah memilih kompresor merk Sikelan tipe ADW110 dengan spesifikasi *cooling capacity* 3/8 pk. Kompresor merk Sikelan tipe ADW110 dipilih karena kompresor Sikelan tipe GQR11TZ tidak dapat ditemukan dan kompresor ini memiliki spesifikasi paling mirip dengan kompresor tipe tersebut.

Gambar 4.10 Kompresor merk Sikelan ADW110

Setelah itu memasang evaporator dan kompresor pada *cold showcase*. Letak evaporator dan kompresor berada dibawah lemari kaca. Pada sekitar evaporator ditutupi dengan lempengan aluminum agar evaporator tidak kontak langsung dengan udara sekitar. Pada salah satu lempengan aluminium diberi kipas untuk mengalirkan udara melalui evaporator hingga masuk kedalam ruangan *cold showcase*. Langkah selanjutnya adalah menghubungkan antar pipa pada kompresor, kondensor, evaporator dan pipa kapiler. Pipa kapiler yang digunakan memiliki diameter 0,31 mm dengan panjang 3 m.

Gambar 4.11 Pipa kapiler

Setelah pemasangan pipa selesai, maka dilakukan pengisian *refrigerant* R134a. Sistem pendingin pada *cold showcase* ini menggunakan satu botol penuh R134a yang berisi 390 g.

Gambar 4.12 Pengisian *refrigerant* R134a

Setelah pengisian *refrigerant* selesai, dilanjutkan dengan uji coba sistem pendingin. Ketika diuji coba didapatkan bahwa terjadi masalah pada evaporator, yaitu pipa evaporator mengalami sedikit kebuntuan yang menyebabkan evaporator tidak bisa menjadi dingin dan target temperatur ruangan *cold showcase* tidak dapat tercapai. Maka dari itu evaporator diganti dengan evaporator yang lebih baru dengan dimensi yang sama dengan evaporator yang lama.

Tabel 4.1 Hasil pengujian temperatur awal *cold showcase*

Titik pengujian	1	2	3	4	5	6
Temperatur Db (°C)	19	20	19	15	16	15

Ketika pemasangan evaporator baru, letak kompresor yang sebelumnya berada dibawah evaporator dipindahkan ke sebelah kanan *cold showcase*. Hal ini dikarenakan temperatur permukaan kompresor yang panas dapat mengganggu perpindahan panas pada evaporator.

Setelah evaporator baru dan kompresor kembali dipasangkan maka dilakukan kembali uji coba pada sistem pendingin. Ketika sistem pendingin telah berjalan dengan baik, maka langkah selanjutnya adalah pengujian temperatur ruangan *cold showcase*

Pada saat pengujian, ditemukan udara dingin yang menerobos keluar pada sambungan lempengan aluminium. Maka dari itu pada setiap sudut sambungan aluminium diberi *insulation foam* agar udara tidak dapat menerobos keluar.

Gambar 4.13 Bentuk akhir *cold showcase*

4.14. Pengujian *Showcase*

Pengujian *cold showcase* ini dibagi menjadi dua percobaan yaitu pengujian 2 lapis kaca dan pengujian 2 lapis kaca. Prosedur pengujian 2 lapis kaca *cold showcase* adalah sebagai berikut :

1. Menghidupkan sistem pendingin pada *cold showcase.*
2. Memasukkan kue kedalam lemari kaca.
3. Menunggu udara didalam lemari kaca menjadi *steady*.
4. Mengukur temperatur di enam titik didalam lemari kaca menggunakan *thermocouple* setiap 5 menit.
5. Mengukur temperatur pada pipa *inlet* dan *outlet* evaporator setiap 5 menit menggunakan *thermogun*.
6. Mengamati pengembunan yang terjadi pada kaca.
7. Menimbang massa 1 helai tisu.
8. Mengusap embun yang ada pada kaca dengan tisu.
9. Menimbang massa tisu yang digunakan untuk mengusap embun.
10. Mencatat dan menyimpan data hasil pengujian temperatur dan massa embun.
11. Menganalisa dan mengambil kesimpulan.

Prosedur pengujian 1 lapis kaca *cold showcase* adalah sebagai berikut :

1. Melepaskan penutup atas lemari *cold showcase*.
2. Melepaskan 1 lapis kaca pada sisi depan, kiri, dan kanan.
3. Memasang kembali penutup atas lemari *cold showcase*.
4. Menghidupkan sistem pendingin pada *cold showcase.*
5. Memasukkan kue kedalam lemari kaca.
6. Menunggu udara didalam lemari kaca menjadi *steady*.
7. Mengukur temperatur di enam titik didalam lemari kaca menggunakan *thermocouple* setiap 5 menit.
8. Mengukur temperatur pada pipa *inlet* dan *outlet* evaporator setiap 5 menit menggunakan *thermogun*.
9. Mengamati pengembunan yang terjadi pada kaca.
10. Menimbang massa 1 helai tisu.
11. Mengusap embun yang ada pada kaca dengan tisu.
12. Menimbang massa tisu yang digunakan untuk mengusap embun.

13. Mencatat dan menyimpan data hasil pengujian temperatur dan massa embun.
14. Menganalisa dan mengambil kesimpulan.

Pengujian pertama adalah pengujian *cold* showcase dengan 2 lapis kaca. Sedangkan pengujian kedua adalah pengujian *cold showcase* dengan 1 lapis kaca. Pengukuran yang dilakukan pada kedua pengujian tersebut adalah temperatur ruangan dan pengukuran massa tisu. Pengukuran temperatur dilakukan pada 6 titik yang ditunjukkan pada Gambar 4.15. Data rata-rata hasil pengujian 2 lapis kaca ditunjukkan pada Tabel 4.2 dan data rata-rata hasil pengujian 1 lapis kaca ditunjukkan pada Tabel 4.3. Data pengujian lengkap berada pada lampiran 7.

Gambar 4.14 Titik-titik pengukuran temperatur ruangan *cold showcase*

Tabel 4.2 Hasil Pengujian 2 Lapis Kaca

Waktu (Menit ke-)	Titik 1		Titik 2		Titik 3		Titik 4		Titik 5		Titik 6		Temperatur evap (°C)		Massa tisu (gram)	
	Db (°C)	Wb (°C)	Db (°C)	Wb (°C)	Db (°C)	Wb (°C)	Db (°C)	Wb (°C)	Db (°C)	Wb (°C)	Db (°C)	Wb (°C)	inlet	outlet	1 lapis kaca	2 lapis kaca
0	22,4	19,3	22,3	19,4	22,1	19,2	21,5	20,4	22	19,8	21,8	19,9	18,8	18,9		
5	21,4	19	21,6	19	21,5	18,9	19,2	18,5	19,3	18,4	19,1	18,3	14,1	16,4		
10	17,2	15,2	17,4	15,5	17	15,3	14,7	12,5	15	12,3	14,8	12,3	8,5	10,6		
15	14,1	11,7	14,3	11,8	14,2	11,7	10,8	8,9	10,9	9	10,7	8,8	6	8,3		
20	12,5	10,2	12,6	10	12,5	10,1	9,2	7,8	9,4	8	9,3	7,9	4,5	6,7	2	1
25	10,3	9,5	10,2	9,6	10,3	9,6	7,1	6	7,2	5,9	7,1	6	1,2	2,9		
30	8,9	7,5	9	7,7	9	7,7	5,5	3,9	5,4	3,9	5,6	3,8	1	2,1		
35	8,5	5,2	8,7	5,4	8,6	5,3	3,8	2,1	3,7	2,2	3,7	2,1	-0,8	1,5		
40	7,8	4,8	7,7	4,8	7,9	5	1,8	0,8	1,9	1	1,8	0,8	-1,1	0,8		

Tabel 4.3 Hasil Pengujian 1 Lapis Kaca

Waktu (Menit ke-)	Titik 1		Titik 2		Titik 3		Titik 4		Titik 5		Titik 6		Temperatur evap (°C)		Massa tisu (gram)	
	Db (°C)	Wb (°C)	Db (°C)	Wb (°C)	Db (°C)	Wb (°C)	Db (°C)	Wb (°C)	Db (°C)	Wb (°C)	Db (°C)	Wb (°C)	inlet	outlet	1 lapis kaca	2 lapis kaca
0	22,4	20,3	21,8	20,4	21,2	19,8	22,4	20,1	22,4	20	22	19,7	18,9	19		
5	2,4	20	21,6	19	21,5	18,9	18,6	18,5	18,4	17,4	18,2	17,3	15	16,8		
10	18,2	17,2	18,5	16,6	18,7	15,3	15,4	14,2	15,2	14,1	15,2	14,3	9,5	10,3		
15	15,4	13,7	15,5	13,2	15,8	11,7	14,1	12,8	14	12,4	13,9	8,8	6,3	8,7		
20	13,7	12,1	13,7	11,8	13,4	10,1	11,8	10,7	11,4	10,9	11,8	10,9	4,1	6,4	2	1
25	11,5	10	11,1	9,6	12,4	9,6	8,1	9,2	8,6	7,8	8,4	7,9	1	3		
30	9,8	8,8	9,8	7,8	10,9	7,7	7,2	8,9	7,4	6,2	7,6	6,7	0,4	2,8		
35	8,5	7,1	8,7	6,2	8,6	5,3	6,5	7,8	6,7	5,9	6,7	5,8	-0,3	1,9		
40	8	6,1	8,1	5,9	8	6,3	4,3	3,8	4,2	3,4	4,8	3,7	-0,8	1		

Tabel 4.4 Hasil Pengujian 2 Lapis Kaca Setelah Kipas dipindahkan

Waktu	Titik 1		Titik 2		Titik 3		Titik 4		Titik 5		Titik 6		Temperatur evap (°C)	
(Menit ke-)	Db (°C)	Wb (°C)	Db (°C)	Wb (°C)	Db (°C)	Wb (°C)	Db (°C)	Wb (°C)	Db (°C)	Wb (°C)	Db (°C)	Wb (°C)	inlet	outlet
0	22	19,3	22,1	19	22,2	19,4	21,7	20,4	21,8	20	21,7	20	19	18,6
5	21,6	18,8	21,1	18,7	21,3	18,8	18,9	18,7	19,1	18,5	19	18,4	15	16,9
10	17,5	14,8	17,4	14,9	17,4	15	14,3	12,4	15	12,3	14,8	12,3	10	12
15	14,9	11,8	14,2	11,4	14,5	11,6	13,1	11,3	13	11,5	13,2	11,2	8	9,7
20	13,8	10	13,5	10,1	13,2	10	12,3	10,2	12,4	10,2	12,3	10,4	6	7,4
25	11,3	9,3	11,5	9,2	11,3	9,1	11	9,1	10,9	9,3	11,1	9,1	4,4	5,7
30	10,8	8,4	10,6	8,6	10,6	8,6	9,7	8	9,4	8,1	9,8	8	3,7	4,8
35	9,8	8	9,9	8,1	9,6	8	8,1	7,4	8,2	7,5	8,4	7,4	2,1	3
40	9,2	7,4	9,3	7,5	9,3	7,4	7,8	6	7,9	6,2	7,8	6,1	1,8	2,8
45	8,8	6,2	8,9	6,2	9	6,4	6,5	5,1	6,7	5	6,6	5,1	1	2,2
50	8,3	5	8,5	5	8,5	5,1	5,2	4	5,1	3,9	5,1	4	0,1	1,4
55	7,7	4,4	7,8	4,6	7,9	4,6	4,5	3	4,6	3,1	4,6	3	-0,2	0,5
60	7,1	4	7,2	4,1	7,1	4	3,1	1,8	3	1,8	3,1	1,9	-1	1

Tabel 4.4 merupakan data rata-rata hasil pengujian setelah kipas *cold showcase* dipindah pada bagian dalam ruangan *showcase* karena untuk alat penyimpanan makanan tidak boleh diberikan udara *fresh*. Hal tersebut dikarenakan udara *fresh* akan menghilangkan aroma dari makanan yang sedang disimpan.

Pengujian kedua adalah pengujian embun pada kaca *cold showcase*. Pengujian ini mengukur massa uap air pada embun yang ada pada kaca *cold showcase*. Massa 1 helai tisu adalah 1 gram. Massa tisu setelah mengusap embun dari 1 lapisan kaca adalah 2 gram. Kemudian massa tisu setelah mengusap embun dari *double pane* kaca adalah 1 gram.

Gambar 4.15 Berat tisu setelah mengusap *double pane* kaca

Gambar 4.16 Berat tisu setelah mengusap 1 lapisan kaca

4.15. Analisa Data Hasil Pengujian

Berdasarkan data pengujian temperatur ruangan *cold showcase*, didapatkan temperatur akhir ruangan *cold showcase* adalah 1,8°C pada lantai 1 dan 7,8°C pada lantai 2. Temperatur tersebut tercapai ketika *cold showcase* dijalankan setelah 40 menit, sedangkan pada perancangan seharusnya temperatur 7 derajat dapat tercapai setelah 30 menit. Temperatur tersebut tidak tercapai dikarenakan terdapat beberapa celah kecil pada engsel pintu dan yang menyebabkan udara dingin menerobos keluar. Celah kecil tersebut tidak bisa ditutupi dengan *insulation foam*, selain itu terdapat celah kecil pada bagian bawah evaporator yang meyebabkan udara menerobos keluar.

Hal lain yang menyebabkan temperatur tidak tercapai adalah kecepatan kipas yang kurang besar. Kipas yang digunakan telah disesuaikan dengan perhitungan laju aliran massa udara, tetapi pada kenyataannya diperlukan kecepatan kipas yang lebih besar karena terdapat udara dingin yang bocor.

Pada pengujian embun didapatkan bahwa embun pada kaca yang memiliki 2 lapisan lebih sedikit dibandingkan embun pada kaca yang memiliki 1 lapisan saja. Hal ini dibuktikan dengan massa tisu setelah mengusap embun pada kaca 1

lapisan lebih berat dibandingkan massa tisu setelah mengusap embun pada kaca 2 lapis.