

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1. Pendahuluan

Untuk mengetahui kinerja dari mesin refrigerasi yang telah dibuat, maka perlu dilakukan pengujian. Hasil pengujian tersebut kemudian dianalisis sehingga dapat diketahui perbedaan dan penyimpangan-penyimpangan yang terjadi antara siklus ideal dan siklus aktual refrigerant sehingga kekurangan-kekurangan yang masih terdapat pada mesin refrigerasi ini dapat diketahui.

4.2. Persiapan Pengujian

Sebelum melakukan pengujian maka dilakukan terlebih dahulu langkah-langkah persiapan agar pengujian dapat berjalan dengan baik, antara lain:

1. Memeriksa kondisi kompresor, kondenser, alat ekspansi dan evaporator sebagai alat utama pengujian, juga kondisi sambungan pipa hingga tidak terjadi kebocoran.
2. Mengisi tabung kondenser dan tabung evaporator dengan air secukupnya sebagai media yang dipanaskan pada kondenser dan media yang didinginkan pada evaporator.
3. Memeriksa pompa air pada tabung evaporator dan kondenser untuk memastikan pompa tersebut bekerja normal, sehingga sirkulasi air dapat berjalan dengan baik pada kedua tabung.
4. Mempersiapkan alat ukur yang akan digunakan.
5. Mengatur dan instalasi semua alat yang sudah disiapkan sehingga semua alat yang akan digunakan dalam kondisi siap dipakai untuk pengujian.

4.3. Cara Melakukan Pengujian

Setelah persiapan pengujian dilakukan dan semua keperluan pengujian dipenuhi maka pelaksanaan pengujian dapat dilakukan dengan cara-cara sebagai berikut:

1. Sakelar kompresor diposisikan pada kondisi ON
2. Mengamati suhu pada permukaan pipa masuk, permukaan pipa keluar dan air pada tabung evaporator.
3. Mengamati suhu pada permukaan pipa masuk, permukaan pipa keluar dan air pada tabung kondenser.
4. Mengamati alat pengukur tekanan (*pressure gauge*) baik pada tekanan tinggi maupun pada tekanan rendah.
5. Melakukan percobaan tersebut sebanyak 16 kali dengan selang waktu percobaan masing-masing 5 menit untuk tiap satu kali percobaan.
6. Mencatat hasil pengujian.

4.4 Pengujian Alat

Tabel 4.1 Tabel pengambilan data pada tabung evaporator

T (menit)	t evaporator (°C)			P evaporator (bar)
	Air	Masuk	Keluar	
0	29.5	29	28	0.34
5	28	5	25	1.1
10	25.5	7	23	1.4
15	23	8	22	1.72
20	21	8	20	1.72
25	19	7	18	1.8
30	18	6	16	1.8
35	17.5	6	15	1.8
40	17	6	15	1.8
45	17.5	6	14	1.8
50	17.5	6	14	1.8
55	17.5	6	14	1.8
60	18	6	15	1.8
65	18	6	15	1.8
70	18.5	6	15	1.86
75	18.5	6	15	1.86

Tabel 4.2 Tabel pengambilan data pada tabung kondenser

T (menit)	t kondenser (°C)			P kondenser (bar)
	Air	Masuk	Keluar	
0	26	26	28	10.3
5	25	29	29	11.7
10	28	48	31	12.7
15	30	61	32	13.4
20	32	67	33	13.8
25	34	70	35	14.5
30	35	71	36	14.8
35	37	72	37	15.5
40	38	73	38	15.8
45	37	73	39	16.2
50	39	71	39	16.5
55	39	70	39	16.5
60	40	71	40	16.9
65	40	72	40	16.9
70	40	72	40	17.2
75	40	73	41	17.2

Dari hasil percobaan (gambar 4.1 dan 4.2) dapat diketahui bahwa siklus refrigerasi tersebut mulai stabil suhu dan tekanannya pada menit ke 35 maka perhitungan siklus refrigerasi dimulai dari menit tersebut sampai menit ke 75.

4.5 Perhitungan Siklus Refrigerasi Ideal

Diketahui : refrigeran R-22

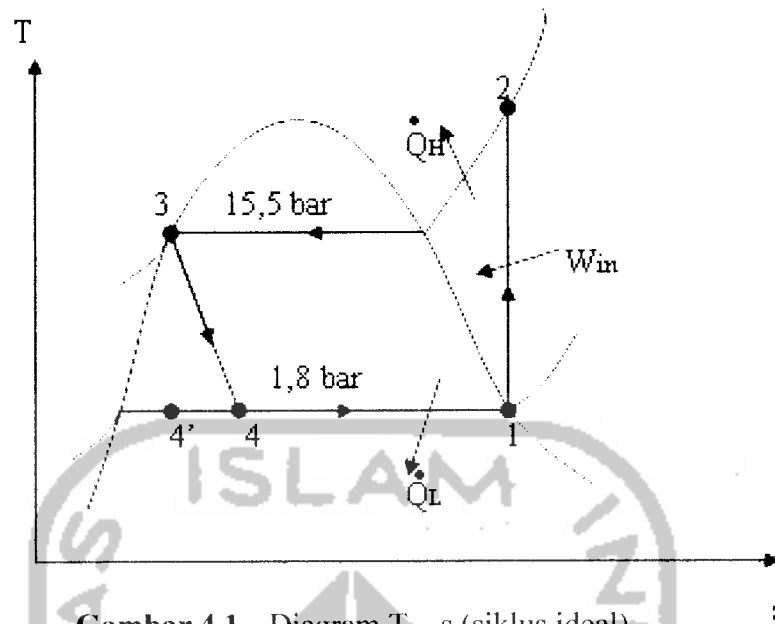
$$m = 0,5 \text{ kg}$$

$$t = 35 \text{ menit} = 2100 \text{ s}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{kond}} &= 225 \text{ psi} \\ &= 225 \cdot 6894,8 \text{ Pa} \\ &= 1.551.330 \text{ Pa} = 15,5 \text{ bar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{evap}} &= 26 \text{ psi} \\ &= 26 \cdot 6894,8 \text{ Pa} \\ &= 179.264,8 \text{ Pa} = 1,8 \text{ bar} \end{aligned}$$

$$m = 0,0123 \text{ kg/s}$$



Gambar 4.1 Diagram T – s (siklus ideal)

4.5.1 Perhitungan

1. Kondisi (4 – 1)

$P =$ Konstan, penyerapan panas pada evaporator (uap jenuh)

$P_1 = 1,8$ bar (lampiran hal.11 tabelA-17)

Interpolasi :

$$\frac{h_1 - 238,47}{239,88 - 238,47} = \frac{1,8 - 1,75}{2 - 1,75}$$

$$\frac{h_1 - 238,47}{1,41} = \frac{0,05}{0,25}$$

$$\frac{h_1 - 238,47}{1,41} = 0,2$$

$$h_1 - 238,47 = 0,282$$

$$h_1 = 238,75 \text{ kJ/kg}$$

Interpolasi :

$$\frac{s_1 - 0,9755}{0,9691 - 0,9755} = \frac{1,8 - 1,75}{2 - 1,75}$$

$$\frac{s_1 - 0,9755}{-0,0064} = \frac{0,05}{0,25}$$

$$s_1 - 0,9755 = -0,00128$$

$$s_1 = 0,9742 \text{ kJ/kg.K}$$

2. Kondisi (1 -2)

Kompresi isentropik, $\Delta s = 0$

$$s_2 = s_1$$

$P = 15,5 \text{ bar}$ (lampiran hal.12 tabel A-18)

Interpolasi pada $P = 14 \text{ bar}$:

$$\frac{h - 290,01}{298,34 - 290,01} = \frac{0,9742 - 0,9703}{0,9942 - 0,9703}$$

$$\frac{h - 290,01}{8,33} = \frac{0,0039}{0,0239}$$

$$h - 290,01 = 1,36$$

$$h = 291,37 \text{ kJ/kg}$$

Interpolasi pada $P = 16 \text{ bar}$:

$$\frac{h - 287,30}{295,93 - 287,30} = \frac{0,9742 - 0,9515}{0,9762 - 0,9515}$$

$$\frac{h - 287,30}{8,63} = \frac{0,0227}{0,0247}$$

$$h - 287,30 = 7,94$$

$$h = 295,24 \text{ kJ/kg}$$

Interpolasi pada $P = 15,5 \text{ bar}$:

$$\frac{T_2 - 36,29}{41,73 - 36,29} = \frac{15,5 - 14}{16 - 14}$$

$$\frac{T_2 - 36,29}{5,44} = \frac{1,5}{2}$$

$$T_2 - 36,29 = 4,08$$

$$T_2 = 40,37^\circ\text{C}$$

Interpolasi pada $P = 15.5$ bar :

$$\frac{h_2 - 291,37}{295,24 - 291,7} = \frac{40,37 - 36,29}{41,73 - 36,29}$$

$$\frac{h_2 - 291,37}{3,87} = \frac{4,08}{5,44}$$

$$h_2 - 291,37 = 2,9025$$

$$h_2 = 294,27 \text{ kJ/kg}$$

3. Kondisi (2-3)

$P =$ Konstan, pelepasan panas pada kondenser (cairjenuh)

$$P_2 = P_3 = 15,5 \text{ bar}$$

P_{sat} pada 15,5 bar = 40,37°C (lampiran hal.11 tabelA-17)

Mencari h_f pada 40,37°C

Interpolasi :

$$\frac{h_3 - 94,53}{101,21 - 94,53} = \frac{40,37 - 40}{45 - 40}$$

$$\frac{h_3 - 94,53}{6,68} = \frac{0,37}{5}$$

$$h_3 - 94,53 = 0,4943$$

$$h_3 = 95,0243 \text{ kJ/kg}$$

4. Kondisi (3-4)

Throttling (katup ekspansi)

$$m(h_3) = m(h_4)$$

$$h_3 = h_4$$

$$h_4 = 95,0243 \text{ kJ/kg}$$

4.5.2 Perhitungan \dot{Q}_1 pada evaporator

$$\begin{aligned} \dot{Q}_1 &= m(h_1 - h_4) \\ &= 1,23 \cdot 10^{-2} (238,75 - 95,0243) \\ &= 1,768 \text{ Watt} \end{aligned}$$

4.5.3 Perhitungan W_{in} pada kompresor

$$\begin{aligned} W_{in} &= m(h_2 - h_1) \\ &= 1,23 \cdot 10^{-2}(294,27 - 238,75) \\ &= 0,683 \text{ Watt} \end{aligned}$$

4.5.4 Perhitungan Q_h pada kondenser

$$\begin{aligned} Q_H &= m(h_2 - h_3) \\ &= 1,23 \cdot 10^{-2}(294,27 - 95,0243) \\ &= 2,451 \text{ Watt} \end{aligned}$$

4.5.5 Perhitungan COP_r

$$\begin{aligned} COP_r &= \frac{Q_L}{W_{in}} \\ &= \frac{1,768}{0,683} \\ &= 2,589 \end{aligned}$$

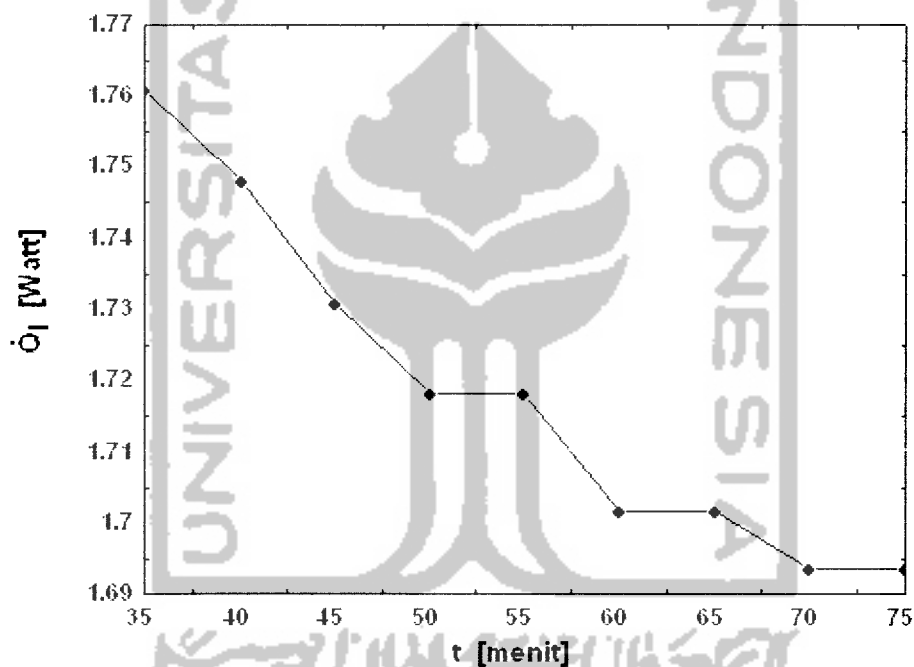
Jadi refrigerator membuang kalor dari ruangan yang didinginkan sebanyak 2,589 kali jumlah energi yang diberikan untuk menjalankan kompresor.

Proses perhitungan siklus refrigerasi ideal selanjutnya dilakukan dengan menggunakan *software* EES (*Engineering Equation Solver*). EES merupakan *software* perhitungan yang didalamnya telah terdapat fungsi-fungsi sebagai solusi untuk persoalan-persoalan termodinamika. EES juga dapat digunakan untuk mencari penyelesaian dari persamaan diferensial dan persamaan integral, memeriksa konsistensi unit, dan melakukan proses perhitungan dengan menggunakan tabel untuk kemudian mengaplikasikannya ke dalam bentuk grafik.

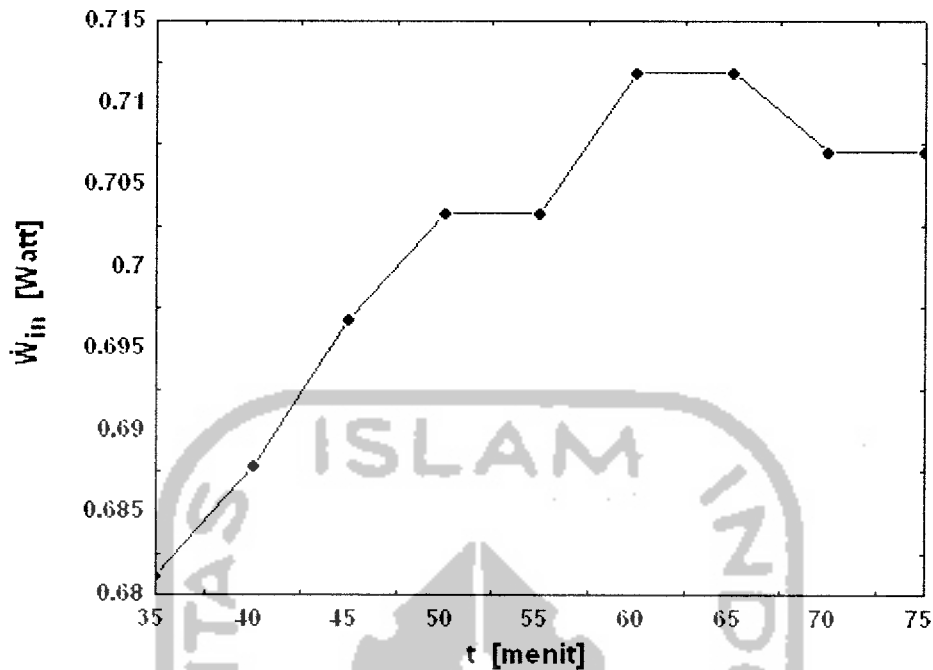
(lampiran hal.13 EES siklus ideal)

Tabel 4.3 Tabel perhitungan siklus refrigerasi ideal menggunakan EES

t (menit)	P ₁ (bar)	P ₂ (bar)	\dot{m} (kg/s)	\dot{Q}_h (Watt)	\dot{Q}_l (Watt)	\dot{W}_{in} (Watt)	COP _r
35	1.8	15.5	0.0123	2.442	1.761	0.681	2.585
40	1.8	15.8	0.0123	2.436	1.748	0.688	2.541
45	1.8	16.2	0.0123	2.428	1.731	0.697	2.484
50	1.8	16.5	0.0123	2.421	1.718	0.703	2.443
55	1.8	16.5	0.0123	2.421	1.718	0.703	2.443
60	1.8	16.9	0.0123	2.413	1.701	0.712	2.390
65	1.8	16.9	0.0123	2.413	1.701	0.712	2.390
70	1.86	17.2	0.0123	2.400	1.693	0.707	2.395
75	1.86	17.2	0.0123	2.400	1.693	0.707	2.395

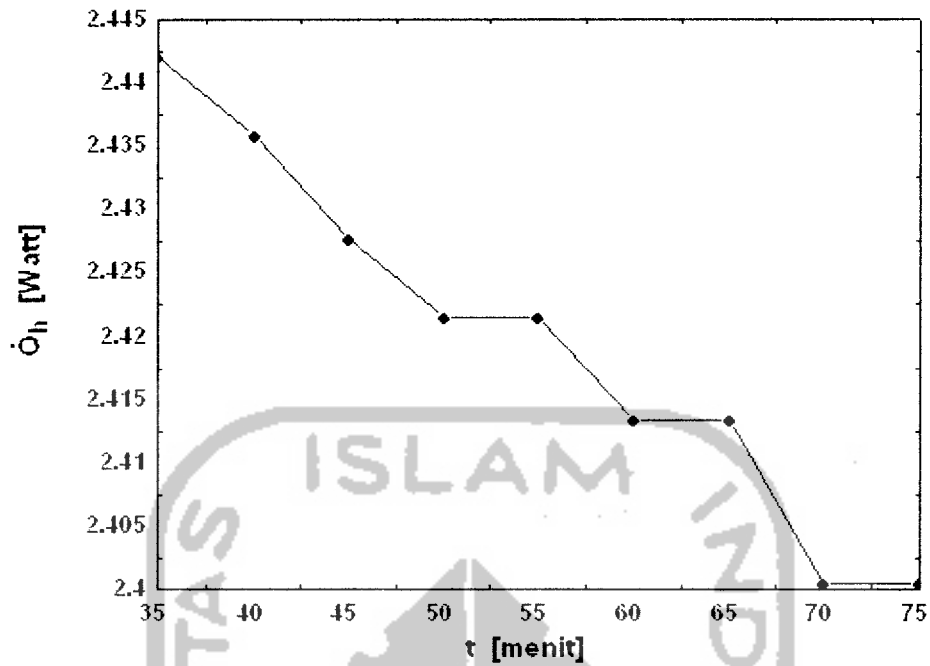
**Gambar 4.2** Grafik hubungan t – Q_l (siklus ideal)

Dari gambar 4.2 menunjukkan hubungan antara waktu (t) dengan perpindahan panas yang terjadi pada evaporator (Q_l) berbanding terbalik, semakin lama waktu yang digunakan dalam siklus refrigerasi maka perpindahan kalor atau penyerapan panas pada evaporator akan semakin turun menurun sampai batas kestabilan. Hal ini disebabkan oleh adanya perbedaan suhu evaporator dan suhu lingkungan yang besar diawal siklus dan perbedaan suhu tersebut akan semakin menurun sampai keadaan *steady*.



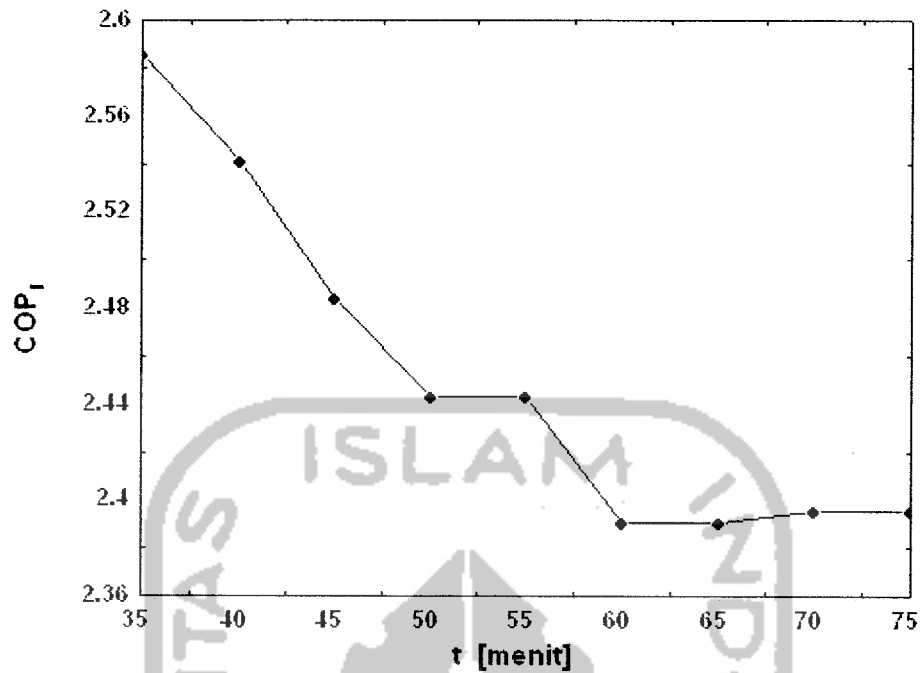
Gambar 4.3 Grafik hubungan $t - W_{in}$ (siklus ideal)

Dari gambar 4.3 menunjukkan hubungan antara waktu (t) dengan unjuk kerja dari kompresor (W_{in}) berbanding lurus, semakin lama waktu yang digunakan dalam siklus refrigerasi maka kinerja kompresor akan semakin naik sampai titik stabil. Karena fungsi kompresor adalah menaikkan tekanan uap super panas refrigeran yang meninggalkan evaporator. Maka kerja yang dilakukan kompresor pada sistem membutuhkan energi yang kecil pada awal kerja sebuah siklus, semakin lama energi yang dibutuhkan akan semakin besar dan dalam waktu tertentu akan mencapai titik *steady*. Karena semakin lama tekanan dan suhu refrigeran yang meninggalkan evaporator kecil, sehingga untuk menaikkan tekanan dan suhu yang kecil tersebut dibutuhkan energi yang cukup besar.



Gambar 4.4 Grafik hubungan antara $t - Q_h$ (siklus ideal)

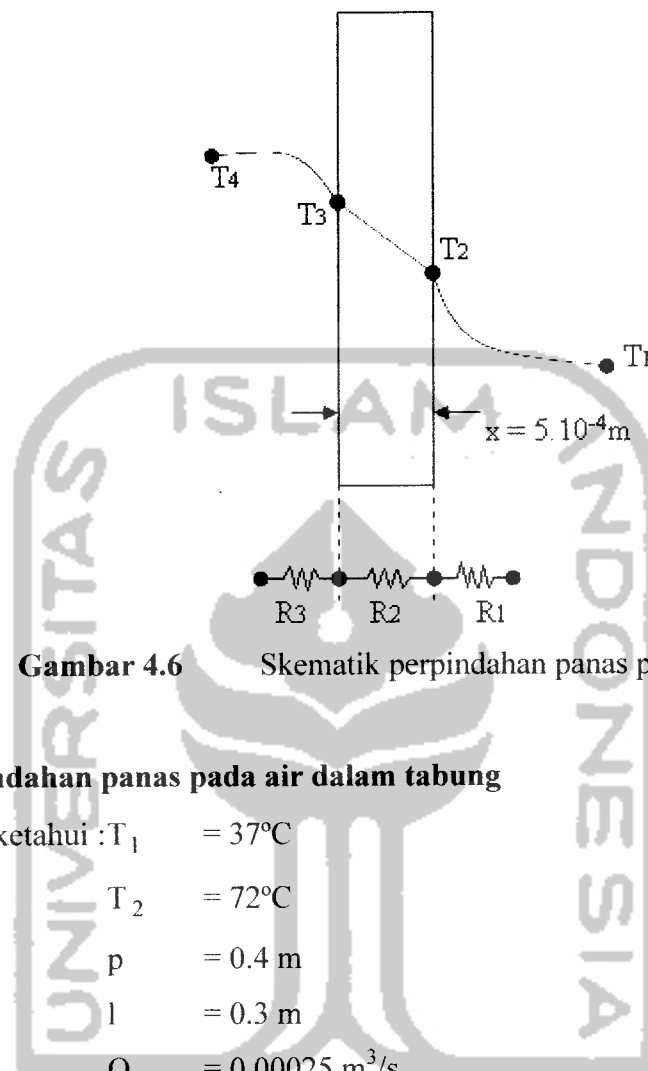
Dari gambar 4.4 menunjukkan hubungan antara waktu (t) dengan perpindahan panas pada kondenser (Q_h) berbanding terbalik, semakin lama waktu yang digunakan dalam siklus refrigerasi maka pelepasan panas dalam kondenser akan semakin turun. Hal ini disebabkan oleh adanya perbedaan suhu pada kondenser dan suhu pada lingkungan yang besar pada awal siklus refrigerasi dan perbedaan suhu tersebut akan semakin menurun sampai keadaan *steady*



Gambar 4.5 Grafik hubungan $t - COP_r$ (siklus ideal)

Dari gambar 4.5 menunjukkan bahwa hubungan antara waktu (t) dengan *Coefficient of performance refrigerant* (COP_r) berbanding terbalik, semakin lama waktu yang dibutuhkan dalam siklus refrigerasi maka kinerja refrigeran akan semakin turun sampai kinerja refrigeran tersebut mencapai titik stabil. Hal ini disebabkan karena refrigeran menyerap kalor dari zat/ruang yang didinginkan (evaporator) dan melepaskan kalor ke lingkungan (kondenser), semakin lama kalor yang diserap oleh refrigeran akan semakin kecil karena suhu dari zat/ruangan lebih rendah dibandingkan pada saat awal siklus, maka COP_r nya akan semakin turun.

4.6 Perhitungan Suhu Di Dalam Pipa Kondenser



Gambar 4.6 Skematik perpindahan panas pada kondenser

4.6.1 Perpindahan panas pada air dalam tabung

Diketahui :

$$T_1 = 37^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 72^\circ\text{C}$$

$$p = 0.4 \text{ m}$$

$$l = 0.3 \text{ m}$$

$$Q = 0.00025 \text{ m}^3/\text{s}$$

Perhitungan :

$$A_1 = \pi r^2$$

$$= 3,14 (0.15\text{m})^2$$

$$= 7,1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$u = \frac{Q}{A}$$

$$= \frac{2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}}{7,1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2} = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$T_f = \frac{37 + 72}{2} = 54,5^\circ \text{C}$$

Dari T_f maka diketahui sifat – sifat fisik air adalah

$$c_p = 4,179 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$$

$$\mu = 5,125 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m.s}$$

$$k = 0,649 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$$

$$\rho = 985,67 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Pr} = 3,30$$

(lampiran hal.1 tabel A-9)

$$\begin{aligned} v &= \frac{\mu}{\rho} \\ &= \frac{5,125 \cdot 10^{-4}}{985,67} = 5,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

$$\text{Re} = \frac{u \cdot d}{v} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3}{5,2 \cdot 10^{-7}} = 2019,23$$

$$\begin{aligned} G_z^{-1} &= \frac{x/d}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \quad [\text{RAK02}] \\ &= \frac{1,33}{2019,23 \cdot 3,30} = \frac{1,33}{6663,46} = 1,99 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

$$\text{Nu} = 22 \text{ (lampiran hal.2 grafik Nu-G}_z \text{)}$$

$$\text{Nu} = \frac{h \cdot d}{k} = 22$$

$$h = 22 \frac{k}{d}$$

$$= 22 \frac{0,649}{0,3} = 47,59 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$R_1 = \frac{1}{47,59 \cdot 0,02826} = \frac{1}{1,34} = 0,746 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Proses perhitungan perpindahan panas pada air dalam tabung kondenser selanjutnya dilakukan dengan menggunakan *software* EES . (lampiran hal.14 EES perpindahan panas pada air)

Tabel 4.4 Tabel hasil perhitungan perpindahan panas air pada tabung kondenser menggunakan EES

A [m ²]	A _{tab} [m ²]	l [m]	p [m]	Q _{air} [m ³ /s]	T _{air} [°C]	T _{pipa} [°C]	k _{air} [W/m.°C]	h _{air} [W/m ² .°C]	R ₁ [°C/W]
0.071	0.02826	0.3	0.4	0.00025	37	72	0.649	47.59	0.7435
0.071	0.02826	0.3	0.4	0.00025	38	73	0.650	47.67	0.7424
0.071	0.02826	0.3	0.4	0.00025	37	73	0.649	47.63	0.7429
0.071	0.02826	0.3	0.4	0.00025	39	71	0.649	47.63	0.7429
0.071	0.02826	0.3	0.4	0.00025	39	70	0.649	47.59	0.7435
0.071	0.02826	0.3	0.4	0.00025	40	71	0.650	47.67	0.7424
0.071	0.02826	0.3	0.4	0.00025	40	72	0.650	47.70	0.7419
0.071	0.02826	0.3	0.4	0.00025	40	72	0.650	47.70	0.7419
0.071	0.02826	0.3	0.4	0.00025	40	73	0.651	47.74	0.7412

4.6.2 Perpindahan panas pada dinding pipa tembaga

Diketahui : k = 386 W/m.°C (lampiran hal.3 tabel A-2)

$$d = 5,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$l = 10,40 \text{ m}$$

$$x = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

$$A = \pi \cdot r^2 \cdot l$$

$$= 3,14 \cdot (2,9 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10,40$$

$$= 2,75 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Perhitungan :

$$R_2 = \frac{x}{k \cdot A} = \frac{5 \cdot 10^{-4}}{386 \cdot 2,75 \cdot 10^{-4}} = \frac{5 \cdot 10^{-4}}{0,153} = 0,00472 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Proses perhitungan perpindahan panas pada dinding pipa kondenser selanjutnya dilakukan dengan menggunakan *software* EES.
(lampiran hal.15 EES perpindahan panas pada dinding pipa)

Tabel 4.5 Tabel hasil perhitungan perpindahan panas pada dinding pipa tembaga menggunakan EES

k [W/m.°C]	x [m]	A [m ²]	R ₂ [°C/W]
386	0.0005	0.000275	0.00471
386	0.0005	0.000275	0.00471
386	0.0005	0.000275	0.00471
386	0.0005	0.000275	0.00471
386	0.0005	0.000275	0.00471
386	0.0005	0.000275	0.00471
386	0.0005	0.000275	0.00471
386	0.0005	0.000275	0.00471
386	0.0005	0.000275	0.00471
386	0.0005	0.000275	0.00471

4.6.3 Perpindahan panas pada refrigeran di dalam pipa

Diketahui : $T_4 = 76,47 \text{ }^\circ\text{C}$

$P = 15,5 \text{ bar}$

$T_3 = 72,003 \text{ }^\circ\text{C}$

$\dot{m} = 0,0123 \text{ kg/s}$

$d = 5,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

$A_1 = 2,29 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

Dari suhu $76,47 \text{ }^\circ\text{C}$ maka dapat diketahui sifat – sifat fisik refrigeran adalah

$k = 0,01524 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$

$\rho_4 = 53,91 \text{ kg/m}^3$

$\nu_4 = 1,567 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

$Pr = 0,8769$

$\rho_3 = 55,1 \text{ kg/m}^3$

$\nu_3 = 1,551 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

(lampiran hal. 4 EES)

Perhitungan :

$$\dot{m} = \rho_4 \cdot A_2 \cdot u$$

$$0,0123 = 53,91 (2,2 \cdot 10^{-5}) u$$

$$u = \frac{0,0123}{0,001186} = 10,37 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu_4} = \frac{10,37 \cdot 0,0053}{1,567 \cdot 10^{-5}} = 3507,40$$

$$\nu_4 = \frac{\mu_4}{\rho_4}$$

$$1,567 \cdot 10^{-5} = \frac{\mu_4}{53,91}$$

$$\mu_4 = 8,45 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m.s}$$

$$\nu_3 = \frac{\mu_3}{\rho_3}$$

$$1,551 \cdot 10^{-5} = \frac{\mu_3}{55,1}$$

$$\mu_3 = 8,54 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m.s}$$

$$Nu = 0,027 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_4}{\mu_3} \right)^{0,14} \text{ [RAK02]}$$

$$= 0,027 (3507,40)^{0,8} \cdot (0,8769)^{1/3} \left(\frac{8,45}{8,54} \right)^{0,14}$$

$$= 0,027 (685,47)(0,957)(0,998)$$

$$= 17,68$$

$$h = Nu \frac{k}{d}$$

$$= 17,68 \cdot \frac{0,01524}{0,0053} = 50,84 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$R_3 = \frac{1}{h \cdot A_1} = \frac{1}{50,84 \cdot 2,29 \cdot 10^{-4}} = \frac{1}{0,01164} = 86,21 ^\circ\text{C/W}$$

Tabel 4.6 Tabel perhitungan perpindahan panas refrigeran

T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	P [bar]	m [kg/s]	D [m]	A ₁ [m ²]	A ₂ [m ²]
76.47	72	15.5	0.0123	0.0053	0.000022	0.000229
77.56	73	15.8	0.0123	0.0053	0.000022	0.000229
78.98	73	16.2	0.0123	0.0053	0.000022	0.000229
80.03	71	16.5	0.0123	0.0053	0.000022	0.000229
80.03	70	16.5	0.0123	0.0053	0.000022	0.000229
81.41	71	16.9	0.0123	0.0053	0.000022	0.000229
81.41	72	16.9	0.0123	0.0053	0.000022	0.000229
81.79	72	17.2	0.0123	0.0053	0.000022	0.000229
81.79	73	17.2	0.0123	0.0053	0.000022	0.000229

Proses perhitungan perpindahan panas pada refrigeran di dalam pipa kondenser selanjutnya dilakukan dengan menggunakan *software* EES.

(lampiran hal.16 EES perpindahan panas pada refrigerant di dalam pipa)

Tabel 4.7 Tabel hasil perhitungan perpindahan panas refrigerant menggunakan EES

Visc ₁ [Kg/m.s] x 10 ⁻⁵	Visc ₂ [Kg/m.s] x 10 ⁻⁵	ρ ₁ [kg/m ³]	ρ ₂ [kg/m ³]	k [W/m.°C]	Pr	Nu	h [W/m ² .°C]	R ₃ [°C/W]
1.567	1.551	53.91	55.10	0.01524	0.8769	17.69	50.86	86.24
1.573	1.556	54.87	56.11	0.01533	0.8779	17.39	50.31	87.19
1.580	1.558	56.15	57.84	0.01544	0.8792	17.01	49.57	88.48
1.586	1.552	57.11	59.77	0.01553	0.8801	16.72	49.00	89.51
1.586	1.549	57.11	60.09	0.01553	0.8801	16.71	48.98	89.55
1.593	1.555	58.38	61.57	0.01564	0.8814	16.37	48.31	90.79
1.593	1.558	58.38	61.24	0.01564	0.8814	16.37	48.33	90.75
1.596	1.560	59.52	62.59	0.01569	0.8839	16.11	47.70	91.94
1.596	1.564	59.52	62.26	0.01569	0.8839	16.12	47.72	91.90

$$\begin{aligned}
 R_{\text{total}} &= R_1 + R_2 + R_3 \\
 &= 0,746 + 0,00327 + 86,21 \\
 &= 86,96 \text{ } ^\circ\text{C/W}
 \end{aligned}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_4 - T_1}{R_{\text{total}}} = \frac{76,47 - 37}{86,96} = \frac{39,47}{86,96} = 0,454 \text{ W}$$

4.6.4. Perhitungan suhu refrigeran di dalam pipa

$$\begin{aligned} T_3 &= T_4 - \dot{Q} \cdot R_{\text{conv.3}} \\ 72 \text{ }^\circ\text{C} &= T_4 - 0,454 \text{ W} (86,21 \text{ }^\circ\text{C/W}) \\ T_4 &= 72^\circ\text{C} + 39,1^\circ\text{C} \\ T_4 &= 111,1^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Proses perhitungan selanjutnya dilakukan dengan menggunakan *software* EES (lampiran hal.17 EES perpindahan panas)

Tabel 4.8 Tabel hasil perhitungan suhu refrigeran di dalam pipa pada kondenser menggunakan EES

T_1 [$^\circ\text{C}$]	T_2 [$^\circ\text{C}$]	T_{air} [$^\circ\text{C}$]	R_1 [$^\circ\text{C/W}$]	R_2 [$^\circ\text{C/W}$]	R_3 [$^\circ\text{C/W}$]	R_{total} [$^\circ\text{C/W}$]	\dot{Q} [W]	T_{ref} [$^\circ\text{C}$]
76.47	72	37	85.87	0.00471	0.7435	86.62	0.4557	111.1
77.56	73	38	86.81	0.00471	0.7424	87.56	0.4518	112.2
78.98	73	37	88.09	0.00471	0.7429	88.84	0.4725	114.6
80.03	71	39	89.12	0.00471	0.7429	89.87	0.4566	111.7
80.03	70	39	89.16	0.00471	0.7435	89.91	0.4564	110.7
81.41	71	40	90.39	0.00471	0.7424	91.14	0.4544	112.1
81.41	72	40	90.35	0.00471	0.7419	91.10	0.4546	113.1
81.79	72	40	91.54	0.00471	0.7419	92.29	0.4528	113.5
81.79	73	40	91.50	0.00471	0.7412	92.25	0.4530	114.5

4.7 Perhitungan Siklus Refrigerasi Aktual

Diketahui : refrigeran R-22

$$m = 0,5 \text{ kg}$$

$$t = 35 \text{ menit} = 2100 \text{ s}$$

$$P_{\text{kond}} = 225 \text{ psi}$$

$$= 225 \cdot 6894,8 \text{ Pa}$$

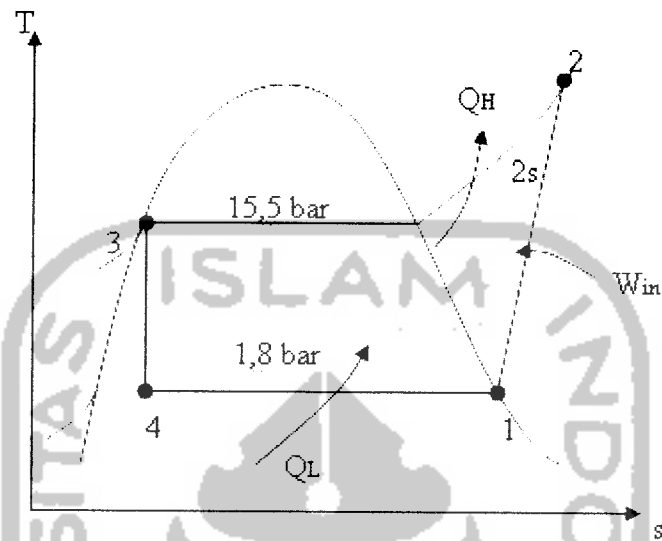
$$= 1.551.330 \text{ Pa} = 15,5 \text{ bar}$$

$$P_{\text{evap}} = 26 \text{ psi}$$

$$= 26 \cdot 6894,8 \text{ Pa}$$

$$= 179.264,8 \text{ Pa} = 1,8 \text{ bar}$$

$$m = 0,0123 \text{ kg/s}$$



Gambar 4.7 Diagram T – s (siklus aktual)

4.7.1 Perhitungan

1. Kondisi (4 – 1)

$P =$ Konstan, penyerapan panas pada evaporator (uap jenuh)

$P_1 = 1,8 \text{ bar}$ (lampiran hal.11 tabelA-17)

Interpolasi :

$$\frac{h_1 - 238,47}{239,88 - 238,47} = \frac{1,8 - 1,75}{2 - 1,75}$$

$$\frac{h_1 - 238,47}{1,41} = \frac{0,05}{0,25}$$

$$\frac{h_1 - 238,47}{1,41} = 0,2$$

$$h_1 - 238,47 = 0,282$$

$$h_1 = 238,75 \text{ kJ/kg}$$

Interpolasi :

$$\frac{s_1 - 0,9755}{0,9691 - 0,9755} = \frac{1,8 - 1,75}{2 - 1,75}$$

$$\frac{s_1 - 0,9755}{-0,0064} = \frac{0,05}{0,25}$$

$$s_1 - 0,9755 = -0,00128$$

$$s_1 = 0,9742 \text{ kJ/kg.K}$$

2. Kondisi (1 - 2)

Kompresi isentropis

(lampiran hal.12 tabel A-18)

$$P_2 = 15,5 \text{ bar}$$

$$T_2 = 111,1^\circ\text{C}$$

Iterpolasi pada $P = 14 \text{ bar}$

$$\frac{h - 323}{331,19 - 323} = \frac{111,1 - 110}{120 - 110}$$

$$\frac{h - 323}{8,19} = \frac{1,1}{10}$$

$$h - 323 = 0,901$$

$$h = 323,901 \text{ kJ/kg}$$

Interpolasi pada $P = 16 \text{ bar}$:

$$\frac{h - 321,17}{329,51 - 321,17} = \frac{111,1 - 110}{120 - 110}$$

$$\frac{h - 321,17}{8,34} = \frac{1,1}{10}$$

$$h - 321,17 = 0,917$$

$$h = 322,087 \text{ kJ/kg}$$

Interpolasi pada $P = 15,5 \text{ bar}$:

$$\frac{h_2 - 323,901}{322,087 - 323,901} = \frac{15,5 - 14}{16 - 14}$$

$$\frac{h_2 - 323,901}{-1,814} = \frac{1,5}{2}$$

$$h_2 - 323,901 = -1,3605$$

$$h_2 = 322,541 \text{ kJ/kg}$$

Kondisi h_{2s} pada $P = 15,5$ bar

Dimana $s_{2s} = s_1 = 0,9742$ kJ/kg.

Interpolasi pada $P = 14$ bar :

$$\frac{h - 290,01}{298,34 - 290,01} = \frac{0,9742 - 0,9703}{0,9942 - 0,9703}$$

$$\frac{h - 290,01}{8,33} = \frac{0,0039}{0,0239}$$

$$h - 290,01 = 1,36$$

$$h = 291,37 \text{ kJ/kg}$$

Interpolasi pada $P = 16$ bar :

$$\frac{h - 287,30}{295,93 - 287,30} = \frac{0,9742 - 0,9515}{0,9762 - 0,9515}$$

$$\frac{h - 287,30}{8,63} = \frac{0,0227}{0,0247}$$

$$h - 287,30 = 7,94$$

$$h = 295,24 \text{ kJ/kg}$$

Interpolasi pada $P = 15,5$ bar :

$$\frac{15,5 - 14}{16 - 14} = \frac{h_{2s} - 291,37}{295,24 - 291,37}$$

$$\frac{1,5}{2} = \frac{h_{2s} - 291,37}{3,87}$$

$$0,75 = \frac{h_{2s} - 291,37}{3,87}$$

$$h_{2s} - 291,37 = 2,903$$

$$h_{2s} = 294,27 \text{ kJ/kg}$$

Interpolasi pada $P = 15,5$ bar

$$\frac{T_{2s} - 70}{80 - 70} = \frac{294,27 - 291,37}{295,24 - 291,37}$$

$$\frac{T_{2s} - 70}{10} = \frac{2,9}{3,87}$$

$$T_{2s} - 70 = 7,49$$

$$T_{2s} = 77,49^\circ\text{C}$$

3. Kondisi (2 - 3)

Kondisi saturasi $P_3 = 15,5$ bar (lampiran hal.11 tabelA-17)

Interpolasi pada $P = 15,5$ bar :

$$\frac{T_3 - 36,29}{41,73 - 36,29} = \frac{15,5 - 14}{16 - 14}$$

$$\frac{T_3 - 36,29}{5,44} = \frac{1,5}{2}$$

$$T_3 - 36,29 = 4,08$$

$$T_3 = 40,37^\circ\text{C}$$

Interpolasi :

$$\frac{h_3 - 89,68}{96,83 - 89,68} = \frac{40,37 - 36,29}{41,73 - 36,29}$$

$$\frac{h_3 - 89,68}{7,15} = \frac{4,08}{5,44}$$

$$h_3 - 89,29 = 5,36$$

$$h_3 = 95,04 \text{ kJ/kg}$$

4. Kondisi (3 - 4)

Throttling pada katup ekspansi

$$h_3 = h_4 = 95,04 \text{ kJ/kg}$$

4.7.2 Perhitungan \dot{Q}_1 pada evaporator

$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_1 - h_4)$$

$$= 1,23 \cdot 10^{-2} (238,75 - 95,04)$$

$$\begin{aligned}
 &= 1,23 \cdot 10^{-2} (143,71) \\
 &= 1,77 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

4.7.3 Perhitungan W_{in} pada kompresor

$$\begin{aligned}
 W_{in} &= m(h_2 - h_1) \\
 &= 1,23 \cdot 10^{-2} (322,541 - 238,75) \\
 &= 1,23 \cdot 10^{-2} (83,79) \\
 &= 1,03 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

4.7.4 Perhitungan Q_h pada kondenser

$$\begin{aligned}
 Q_H &= m(h_2 - h_3) \\
 &= 1,23 \cdot 10^{-2} (322,541 - 95,04) \\
 &= 1,23 \cdot 10^{-2} (227,50) \\
 &= 2,80 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

4.4.5 Perhitungan COP_r

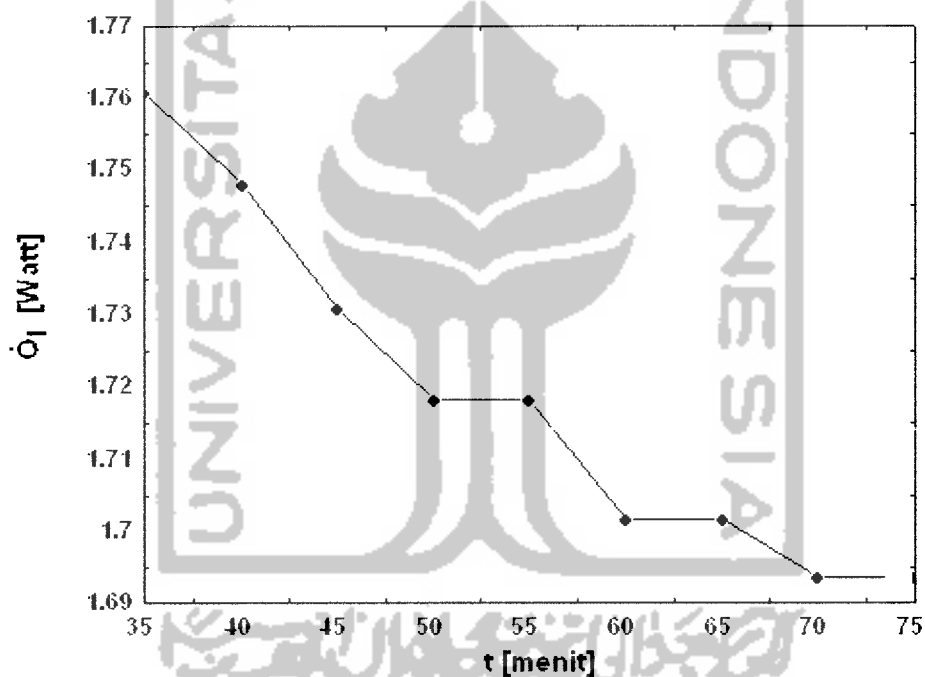
$$COP_r = \frac{Q_L}{W_{in}} = \frac{1,77}{1,03} = 1,72$$

Jadi refrigerator membuang kalor dari ruangan yang didinginkan sebanyak 1,72 kali jumlah energi yang diberikan untuk menjalankan kompresor.

Proses perhitungan siklus refrigerasi aktual selanjutnya dilakukan dengan menggunakan *software* EES (lampiran hal.19 EES siklus aktual)

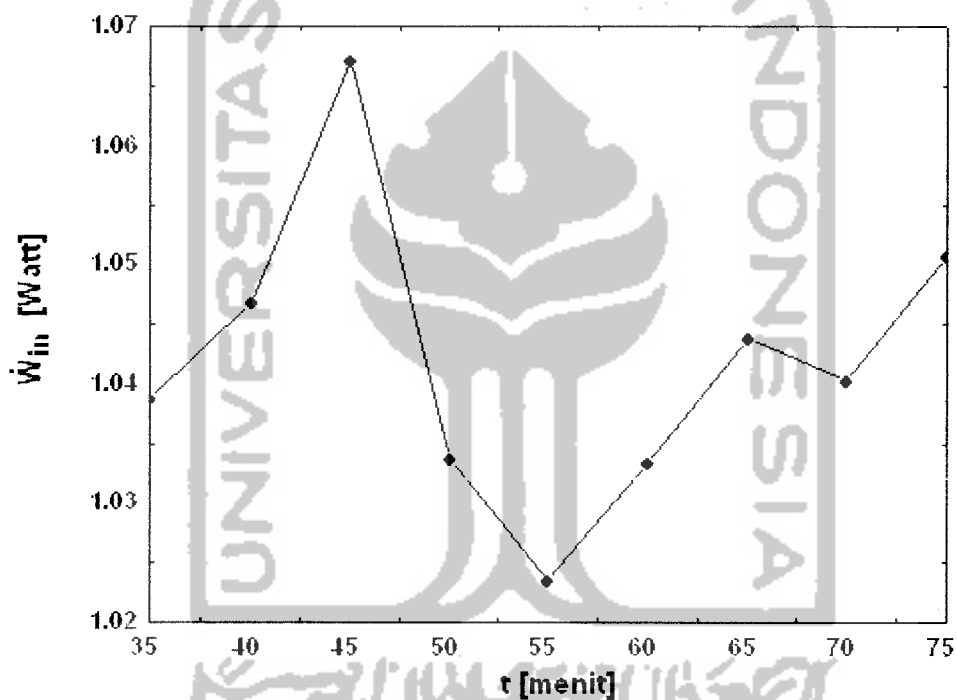
Tabel 4.9 Tabel perhitungan siklus refrigerasi actual menggunakan EES

t (menit)	P1 (bar)	P2 (bar)	\dot{m} (kg/s)	\dot{Q}_h (Watt)	\dot{Q}_l (Watt)	\dot{W}_{in} (Watt)	COP _R
35	1.8	15.5	0.0123	2.800	1.761	1.039	1.695
40	1.8	15.8	0.0123	2.795	1.748	1.047	1.670
45	1.8	16.2	0.0123	2.798	1.731	1.067	1.622
50	1.8	16.5	0.0123	2.752	1.718	1.034	1.662
55	1.8	16.5	0.0123	2.742	1.718	1.023	1.679
60	1.8	16.9	0.0123	2.735	1.701	1.033	1.646
65	1.8	16.9	0.0123	2.745	1.701	1.044	1.630
70	1.86	17.2	0.0123	2.734	1.693	1.040	1.628
75	1.86	17.2	0.0123	2.744	1.693	1.051	1.612

**Gambar 4.8** Grafik hubungan $t - \dot{Q}_l$ (siklus aktual)

Dari gambar 4.8 menunjukkan hubungan antara waktu (t) dengan perpindahan panas yang terjadi pada evaporator (\dot{Q}_l) berbanding terbalik, semakin lama waktu yang digunakan dalam siklus refrigerasi maka perpindahan kalor atau penyerapan panas di lingkungan (air) pada evaporator akan semakin turun. Hal ini disebabkan oleh adanya perbedaan suhu pada evaporator dan suhu pada lingkungan yang besar pada awal siklus refrigerasi dan perbedaan suhu

tersebut akan semakin menurun sampai keadaan *steady*. Apabila dibandingkan dengan gambar 4.2 (grafik \dot{Q}_1-t siklus ideal) maka untuk mencapai keadaan *steadynya* grafik pada siklus aktual cenderung sama stabil. Hal ini disebabkan karena $enthalpy_1(h_1)$ dan $enthalpy_2(h_2)$ yang merupakan komponen persamaan (7) : $\dot{Q}_1 = \dot{m}(h_1 - h_4)$ diperoleh dari suhu saturasi dan kualitas uap $(x) = 1$ untuk h_1 dan kualitas uap $(x) = 0$ untuk h_4 karena dalam siklus aktual dianggap mendekati siklus ideal maka $h_3 = h_4$.



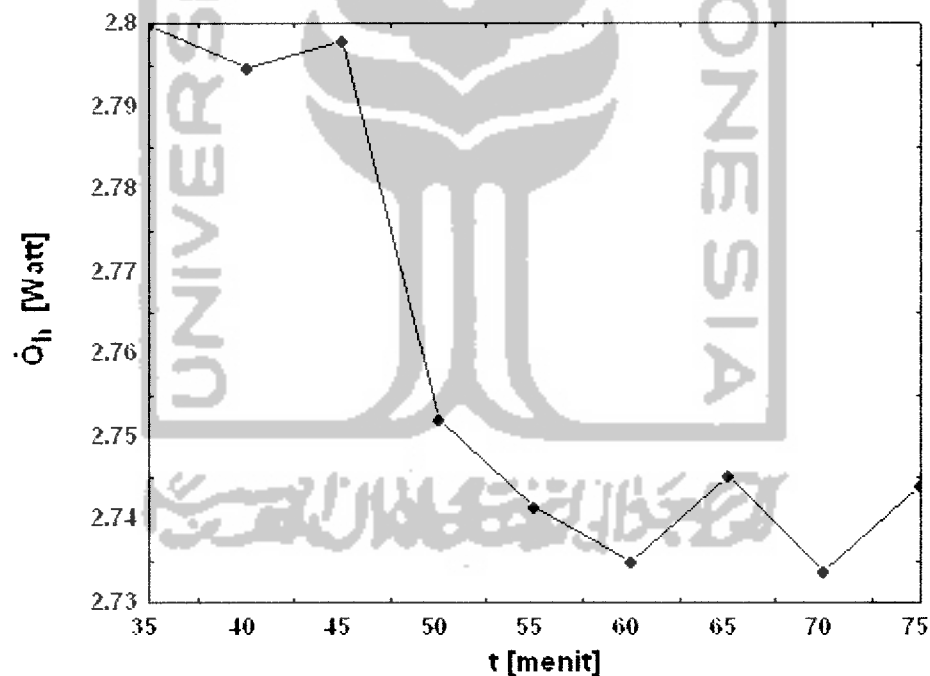
Gambar 4.9 Grafik hubungan $t - \dot{W}_{in}$ (siklus aktual)

Dari gambar 4.9 dapat dilihat hubungan antara waktu (t) dengan unjuk kerja dari kompresor (\dot{W}_{in}) berbanding lurus, semakin lama waktu yang digunakan dalam siklus refrigerasi maka kinerja kompresor akan semakin naik sampai titik stabil. Karena fungsi kompresor adalah menaikkan tekanan uap super panas refrigeran yang meninggalkan evaporator. Maka kerja yang dilakukan kompresor pada sistem membutuhkan energi yang kecil pada awal kerja sebuah siklus, semakin lama energi yang dibutuhkan akan semakin besar dan dalam

waktu tertentu akan mencapai titik *steady*. Karena semakin lama tekanan dan suhu refrigeran yang meninggalkan evaporator kecil, sehingga untuk menaikkan tekanan dan suhu yang kecil tersebut dibutuhkan energi yang cukup besar. Apabila dibandingkan dengan gambar 4.3 (grafik W_{in} - t siklus ideal) maka untuk mencapai keadaan *steadynya* pada grafik siklus aktual kurang stabil. Hal ini disebabkan karena adanya variasi suhu pada proses *superheat* yang akan berpengaruh pada proses $enthalpy_2$ (h_2) dan untuk $enthalpy_1$ (h_1) cenderung tidak berpengaruh, karena $enthalpy_1$ diketahui pada suhu saturasi atau x (kualitas uap) = 1.

Dan untuk mengetahui kinerja kompresor digunakan persamaan (2) :

$$W_{in} = m(h_2 - h_1)$$

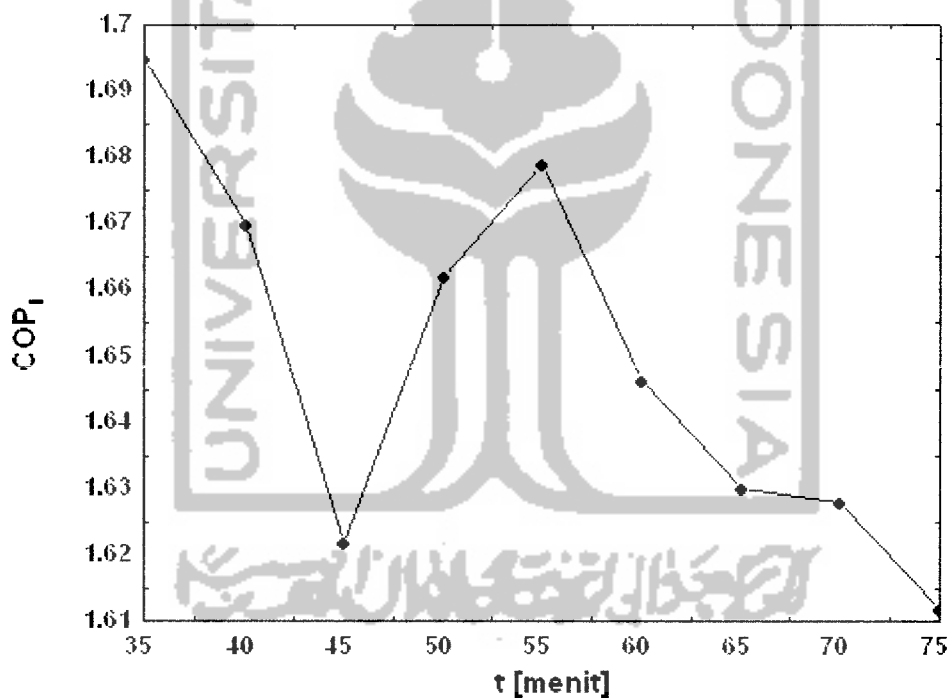


Gambar 4.10 Grafik hubungan t – Q_h (siklus aktual)

Dari gambar 4.10 menunjukkan hubungan antara waktu (t) dengan perpindahan panas pada kondenser (Q_h) berbanding terbalik, semakin lama waktu yang digunakan dalam siklus refrigerasi maka pelepasan panas dalam kondenser

akan cenderung semakin turun dan akan mencapai titik stabil. Apabila dibandingkan dengan gambar 4.4 (grafik $\dot{Q}_h - t$ siklus ideal), grafik pada siklus ini kurang stabil untuk mencapai keadaan *steady*-nya. Hal ini disebabkan karena ada variasi suhu pada proses *superheat* sehingga akan berpengaruh pada proses *enthalpy*₂(h_2) dan untuk proses *enthalpy*₃(h_3) cenderung tidak berpengaruh karena pada proses ini diketahui pada suhu saturasi atau x (kualitas uap) = 0. Dan tidak diketahuinya suhu dan laju aliran refrigeran didalam pipa yang sebenarnya. Untuk mengetahui laju perpindahan panas pada kompresor digunakan persamaan (4):

$$\dot{Q}_h = \dot{m}(h_2 - h_3)$$



Gambar 4.11 Grafik hubungan $t - COP_r$ (siklus aktual)

Dari gambar 4.11 menunjukkan bahwa hubungan antara waktu (t) dengan *Coefficient of performance refrigerant* (COP_r) berbanding terbalik, semakin lama waktu yang dibutuhkan dalam siklus refrigerasi maka kinerja refrigeran akan semakin turun sampai kinerja refrigeran tersebut mencapai titik stabil. Hal ini disebabkan karena refrigeran menyerap kalor dari zat/ruang yang didinginkan

(evaporator) dan melepaskan kalor ke lingkungan (kondenser), semakin lama kalor yang diserap oleh refrigeran akan semakin kecil karena suhu dari air/ruangan lebih rendah dibandingkan pada saat awal siklus, maka COP_r nya akan semakin turun. Apabila dibandingkan gambar 4.5 (grafik $t - COP_r$ siklus ideal), grafik pada siklus ini kurang stabil untuk mencapai keadaan *steadynya*. Hal ini disebabkan karena W_{in} pada siklus ini kurang stabil. Karena W_{in} merupakan salah satu komponen untuk mengetahui COP_r , bila W_{in} kurang stabil maka COP_r juga kurang stabil. Untuk mengetahui COP_r digunakan persamaan (3) :

$$COP_r = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{Q_1}{W_{in}}$$

