

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Data dari hasil pengujian dengan berbagai variasi yang sudah dilakukan selengkapnya dapat dilihat pada lampiran 7. Dari data tersebut diperoleh hasil yang selanjutnya dapat diolah ke dalam perhitungan untuk menghitung nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi refrigeran R-134a di dalam saluran halus vertikal dengan variasi kualitas uap. Untuk satu frekuensi inverter yang digunakan menghasilkan variasi laju aliran massa refrigeran pada debit air pendingin evaporator konstan. Pada saat dilakukan penelitian mengamati perubahan tekanan dan temperatur yang terjadi pada saat sistem berjalan pada kondisi *steady*.

Hasil pengamatan tekanan-tekanan dan temperatur tersebut nantinya akan digunakan sebagai parameter untuk menentukan nilai h (enthalpi) dan dihitung dengan persamaan-persamaan untuk memperoleh nilai kualitas uap dan juga h_{evap} (koefisien perpindahan kalor evaporasi). Hubungan koefisien perpindahan kalor terhadap kualitas uap disajikan dalam gambar 4.1. Variasi laju aliran massa dilakukan dengan variasi pengaturan frekuensi pada inverter. Beda suhu jenuh evaporasi ($T_{\text{wi}} - T_{\text{sat}}$) mempengaruhi kenaikan pada nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi, ditunjukkan dalam gambar 4.2.

4.1.1 Pengolahan Data

1.1.1.1 Perhitungan Laju Aliran Massa Refrigeran R-134a

Laju aliran massa refrigeran R-134a untuk salah satu data pada frekuensi 14 Hz, debit air evaporator konstan 1,4 LPM berkaitan dengan bilangan Re dan koefisien curah dan dapat dicari dengan persamaan dari fungsi regresi linier yang didapat dari hasil kalibrasi *orifice* pada gambar 3.30. dan 3.31. Laju aliran massa refrigeran R-134a dapat dihitung dengan persamaan 3.9, 3.10, dan 3.17, sebagai berikut:

Diketahui:

$$\Delta P_{\text{orifice}} = \rho_{\text{air raksa}} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \Delta z = 4936,39 \text{ Pa} \quad \dots\dots\dots(4.1)$$

Dengan, $\rho_{\text{air raksa}} = 13600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ dan $\Delta z = \frac{\Delta h_{\text{air raksa}}}{100} = 0,037 \text{ m}$

$$Re = \frac{\Delta P_{\text{orifice}} + 50558}{8,1867} = 6778,603 \quad \dots\dots\dots(4.2)$$

$$C = 2,5774 \cdot Re^{-0,126} = 8,48 \times 10^{-1} \quad \dots\dots\dots(4.3)$$

ρ_{R134a} didapat dari pembacaan grafik diagram P-h R-134a, Cengel (2005) dengan $P_{\text{in,Ekspansi}}$ pada 1,2032 MPa (Abs) = 1168,90 kg/m³

$$\dot{V}_{\text{ideal}} = \frac{A_2 \left(\sqrt{\frac{2}{\rho_{R134a}}} \right) \cdot \sqrt{\Delta P_{\text{orifice}}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}} = \frac{3,14 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \left(\sqrt{\frac{2}{1168,90 \text{ kg/m}^3}} \right) \cdot \sqrt{4936,39 \text{ N/m}^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{3,14 \times 10^{-6} \text{ m}^2}{0,000126677} \right)^2}}$$

$$= 9,128 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{V}_{\text{aktual}} = C \cdot \dot{V}_{\text{ideal}} = 8,48 \times 10^{-1} \cdot 9,128 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} = 7,745 \text{ m}^3/\text{s}$$

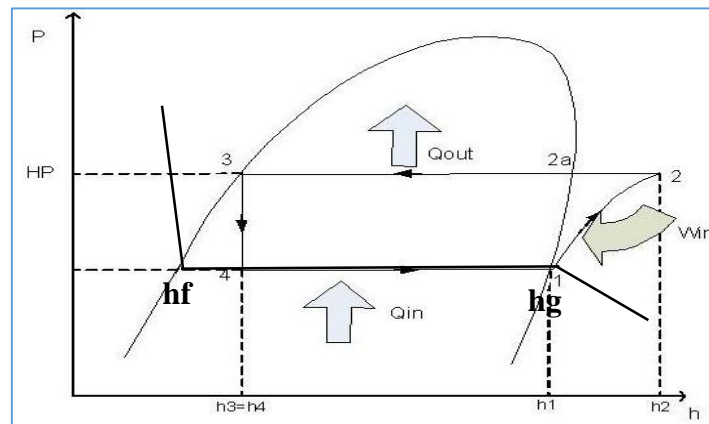
$$\begin{aligned} \dot{m}_{R-134a} &= \rho_{R-134a} \cdot \dot{V}_{R-134a, \text{aktual}} = 1168,90 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 7,745 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \\ &= 9,054 \times 10^{-3} \text{ kg/s} \end{aligned}$$

1.1.1.2 Perhitungan Kualitas Uap

Kualitas uap pada frekuensi 14 Hz, debit air evaporator konstan 1,4 LPM dan laju aliran massa konstan dapat dihitung sebagai berikut:

Diketahui: $P_{3,\text{in Ekspansi}} = 1,2032 \text{ MPa (Abs)}$ dan $T_{3,\text{in Ekspansi}} = 31,74^\circ\text{C}$

Dari grafik diagram P-h Refrigeran R-134a untuk titik *enthalpy* $h_3 = h_4$ (in Ekspansi) = 253,59 kJ/kg. Pada kondisi 4 dapat dilihat pada gambar 4.1 dan dapat dicari sebagai berikut:



Gambar 4.1. Diagram P-h siklus kompresi uap

$P_4 = 0,55 \text{ Mpa (Abs)}$ didapat $h_f = 227,37 \text{ kJ/kg}$ dan untuk $h_g = 413,62 \text{ kJ/kg}$. Maka kualitas uap dasar atau titik awal dapat dihitung dengan persamaan 2.14 dan 2.13 sebagai berikut:

$$h_4 = h_f + x_4 \cdot h_{fg}$$

$$x_4 = \frac{h_4 - h_f}{h_g - h_f} = \frac{253,59 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} - 227,37 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{413,62 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} - 227,37 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}} = 0,141 \rightarrow \text{sebagai } X_0 \text{ (kualitas awal)}$$

1.1.1.3 Perencanaan Voltase dan Arus untuk Penelitian pada Perangkat Pemanas Listrik (*Heater*)

Voltase dan arus pada *heater* untuk kenaikan tiap kualitas uap dapat dicari dengan persamaan dari fungsi regresi linier yang didapat dari hasil kalibrasi heater yang ditunjukkan pada gambar 3.31 dan 3.32. Perhitungan pada kualitas uap $x_0 = 0,141$ sampai kenaikan kualitas (Δx) = 0,5 dengan frekuensi 14 Hz, debit air evaporator konstan 1,4 LPM dan laju aliran massa konstan, sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{R134a} &= \dot{m}_{R134a} \cdot \frac{\Delta x}{1} \cdot h_{fg} \dots\dots\dots (4.5) \\ &= 9,054 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \frac{0,5}{1} \cdot 186,25 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \\ &= 843,16 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Asumsi, $\dot{Q}_{R134a} = \dot{Q}_{air}$, untuk voltase dihitung dari hasil kalibrasi air sebagai berikut:

$$\dot{Q}_{air} = 0,4657 \cdot Voltase^{1,9558} \dots\dots\dots (4.6)$$

$$Voltase (V) = \sqrt[1,9558]{\frac{843,16}{0,4657}}$$

$$= 46,31 \text{ Volt} \rightarrow \text{untuk masing – masing heater}$$

Dan untuk arus dihitung sebagai berikut:

$$I_{1,heater1} = 0,1737 \cdot V^{1,008} \dots\dots\dots (4.7)$$

$$= 0,1737 \cdot 46,31^{1,008} \text{ Volt}$$

$$= 8,30 \text{ Amp}$$

$$I_{2,heater2} = 0,1929 \cdot V^{0,9959} \dots\dots\dots (4.8)$$

$$= 0,1929 \cdot 46,31^{0,9959} \text{ Volt}$$

$$= 8,79 \text{ Amp}$$

$$I_{3,heater3} = 0,1538 \cdot V^{1,0489} \dots\dots\dots (4.9)$$

$$= 0,1538 \cdot 46,31^{1,0489} \text{ Volt}$$

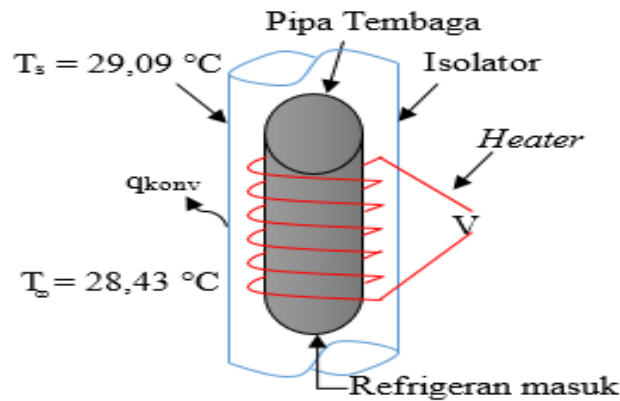
$$= 8,59 \text{ Amp}$$

Setelah voltase dan arus didapatkan, selanjutnya dihitung daya total *heater* ($Q_{total,heater}$) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Q_{total,heater} &= V_{1,heater1} \cdot I_{1,heater1} + V_{2,heater2} \cdot I_{2,heater2} + V_{3,heater3} \cdot I_{3,heater3} \\ &= 1189,47 \text{ Watt} \dots\dots\dots (4.10) \end{aligned}$$

1.1.1.4 Nilai Kualitas untuk tiap Kenaikan Voltase

Nilai kualitas pada setiap kenaikannya berkaitan atau bisa dikatakan bergantung dengan nilai Q_{ref} (energi yang diserap refrigeran), maka dapat dicari nilai kualitas dengan menggunakan persamaan 2.7 sampai 2.12 diambil salah satu pengaturan voltase pertama yaitu ± 20 Volt pada frekuensi 14 Hz, debit air evaporator 1,4 LPM, laju aliran massa konstan, sebagai berikut:



Gambar 4.2. Perpindahan kalor konveksi dan radiasi bebas

Diketahui :

$$\begin{aligned}
 T_{\text{sur}} \text{ (Temperatur permukaan)} &= 29,09 \text{ } ^\circ\text{C} \\
 T_{\infty} \text{ (Temperatur lingkungan)} &= 28,43 \text{ } ^\circ\text{C} \\
 T_f &= \frac{T_s + T_{\infty}}{2} = \frac{(29,09 + 273) + (28,43 + 273) \text{ K}}{2} = 301,76 \text{ K} \\
 g &= 9,81 \text{ m/s}^2 \\
 L &= 1,1 \text{ m} \\
 A_s &= (\pi \cdot D \cdot L) + (r_{\text{selimut}}^2 - r_{\text{tembaga}}^2) \\
 &= (3,14 \times 0,12 \text{ m} \times 1,1 \text{ m}) + (0,05^2 \text{ m} - 0,0093^2 \text{ m}) \\
 &= 0,42 \text{ m}^2 \\
 \varepsilon &= 0,07 \text{ (Emisivitas aluminium foil; Cengel, 2003)} \\
 \sigma &= 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \text{ (Stefan Boltzman Constant)}
 \end{aligned}$$

Maka dari nilai T_f (Temperatur film) didapat nilai dari beberapa parameter yang diperoleh dari Tabel A.4. Propertis Udara, Incropera dan Dewitt (2011) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 k &= 26,43 \times 10^{-3} \text{ W/m.K} \\
 \nu &= 16,07 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\
 \alpha &= 22,76 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\
 Pr &= 0,70675 \\
 \beta &= 0,003314 \text{ K}^{-1} \gg \left(\frac{1}{T_f}\right)
 \end{aligned}$$

Mencari Q_{loss} (energi yang terlepas) untuk mengetahui Q_{ref} (energi yang diserap refrigeran) dapat dihitung dengan persamaan yang diusulkan (Incropera dan Dewitt, 2011), sebagai berikut:

$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_{\infty}) \cdot L^3}{\alpha \cdot \nu} = \frac{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,003314 \text{ K}^{-1} \cdot (29,09 - 28,43) ^\circ\text{C} \cdot 1,1^3 \text{ m}}{22,76 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \cdot 16,07 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 78082798,12$$

$$Nu_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_L^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot (78082798,12)^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{0,70675} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 56,698$$

$$\check{h} = \frac{Nu_L \cdot k}{L} = \frac{56,698 \cdot 26,43 \times 10^{-3} (W/m \cdot k)}{1,1m} = 1,36 W/m^2 \cdot K$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{konv} &= \check{h} \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) = 1,36 (W/m^2 \cdot K) \cdot 0,42m^2 \cdot (29,09 - 28,43)^\circ C \\ &= 0,378 Watt \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{rad} &= \varepsilon \cdot A_s \cdot \sigma \cdot (T_{sur}^4 - T_\infty^4) \\ &= 0,07 \cdot 0,42m^2 \cdot 5,627 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2} \cdot K^4 \cdot (302,09^4 - 301,43^4) \\ &= 0,12 Watt \end{aligned}$$

Sehingga dari perhitungan di atas dapat diketahui Q_{ref} (energi yang diserap refrigeran), sebagai berikut:

$$Q_{loss} = q_{konv} + q_{rad} = (0,378 + 1,71) Watt = 2,09 Watt$$

$$\begin{aligned} Q_{ref} &= P_{heater} - Q_{loss} = (206,6 - 2,09) Watt = 204,51 Watt \\ &= 0,20451 kW = 0,20451 kJ/s \end{aligned}$$

Dari perhitungan mencari Q_{ref} (energi yang diserap refrigeran), selanjutnya diaplikasikan pada persamaan 2.15 sampai 2.18, sebagai berikut:

$$Q_{ref} = (h_x - h_3) \cdot \dot{m}_{ref}$$

$$h_x = \frac{Q_{ref}}{\dot{m}_{ref}} + h_3 = \frac{0,20451 kJ/s}{0,007625 kg/s} + 253,122 \frac{kJ}{kg} = 279,94 \frac{kJ}{kg}$$

Maka x (kualitas) kenaikan awal dapat dicari dengan persamaan berikut:

Diketahui: $P_{in,ekspansi} = 0,962$ Mpa (Abs) dan $T_{in,ekspansi} = 31,35^\circ C$

$$hf = 221,30 kJ/kg \quad hg = 411,69 kJ/kg \quad \dot{m}_{ref} = 0,007625 kg/s$$

$$h_3 = h_4 = 253,122 kJ/kg \quad hfg = 190,38 kJ/kg$$

$$h_x = hf + x \cdot hfg$$

$$x = \frac{h_x - hf}{hfg} = \frac{(279,94 - 221,30) kJ/kg}{190,38 kJ/kg} = 0,31$$

Untuk kenaikan kualitas selanjutnya, dapat mencari masing-masing Q_{loss} dari kenaikan awal dan akhir (nilai paling besar) tiap frekuensi yang kemudian diaplikasikan ke dalam grafik untuk mendapatkan persamaan dari hasil regresi

linier grafik Q_{loss} terhadap Daya Heater. Dari hasil regresi linier tersebut dapat diketahui Q_{loss} masing-masing kenaikan daya, maka Q_{ref} masing-masing daya juga diketahui yang selanjutnya didapatkan nilai masing-masing kenaikan kualitas. Persamaan regresi linier dapat dilihat pada lampiran 5. Hasil perhitungan kualitas uap *real* ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1. Nilai kualitas uap *real* pada beberapa frekuensi inverter

Inverter (Hz)	ṁ _{R-134a} (kg/s)	X		Daya Heater Aktual (Watt)	Q _{loss} (Watt)	Q _{ref} (kW)	h ₃ =h ₄ [kJ/kg]	hf R-134a [kJ/kg]	hfg R-134a [kJ/kg]	hg R-134a [kJ/kg]	hx [kJ/kg]
14	0,0090542	x ₀	0,14	0	0	0	253,592	227,371	186,247	413,618	253,592
	0,0076245	x ₁	0,31	206,595	0,50	0,206	253,122	221,303	190,384	411,687	280,152
	0,0080213	x ₂	0,45	447,752	2,34	0,445	254,298	224,337	188,316	412,653	309,828
	0,0086363	x ₃	0,58	669,148	4,02	0,665	255,946	224,843	187,971	412,814	332,961
	0,0090760	x ₄	0,69	903,935	5,80	0,898	257,773	229,393	184,868	414,261	356,730
	0,0098267	x ₅	0,77	1130,04	7,52	1,123	258,754	232,932	182,455	415,388	372,985
16	0,0093844	x ₀	0,15	0	0	0	255,392	226,865	186,592	413,457	255,392
	0,0077129	x ₁	0,32	205,981	1,53	0,204	248,287	211,270	199,453	410,722	274,794
	0,0082490	x ₂	0,43	431,618	2,38	0,429	250,198	220,292	191,074	411,366	302,233
	0,0087401	x ₃	0,57	695,41	3,39	0,692	252,063	222,314	189,695	412,009	331,241
	0,0093165	x ₄	0,70	966,22	4,42	0,962	253,357	224,337	188,316	412,653	356,594
	0,0098374	x ₅	0,80	1191,88	3,47	1,188	255,122	225,348	187,626	412,974	375,928
18	0,0099224	x ₀	0,17	0	0	0	256,712	225,348	187,626	412,974	256,712
	0,0084561	x ₁	0,32	217,95	0,75	0,217	254,063	219,281	191,763	411,044	279,749
	0,0090523	x ₂	0,44	447,48	1,39	0,446	255,240	221,303	190,384	411,687	304,519
	0,0097038	x ₃	0,57	731,36	2,18	0,729	256,769	223,326	189,005	412,331	331,913
	0,0100910	x ₄	0,70	1007,43	2,96	1,004	258,263	226,359	186,937	413,296	357,805
	0,0107461	x ₅	0,81	1295,97	3,76	1,292	259,734	230,404	184,179	414,583	379,983
20	0,0108096	x ₀	0,17	0	0	0	258,744	226,865	186,592	413,457	258,744
	0,0090837	x ₁	0,33	251,9	2,41	0,249	255,004	219,281	191,763	411,044	282,470
	0,0095196	x ₂	0,50	570,29	4,10	0,566	256,299	221,303	190,384	411,687	315,774
	0,0100356	x ₃	0,63	864,95	5,66	0,859	257,577	223,326	189,005	412,331	343,201
	0,0105201	x ₄	0,75	1148,46	7,16	1,141	258,558	226,359	186,937	413,296	367,044
	0,0113336	x ₅	0,89	1518,32	9,13	1,509	259,930	229,393	184,868	414,261	393,092
22	0,0117790	x ₀	0,19	0	0	0	261,144	225,348	187,626	412,974	261,144
	0,0088934	x ₁	0,36	288,84	1,13	0,288	254,063	217,258	193,142	410,400	286,414
	0,0096846	x ₂	0,52	620,04	3,52	0,617	255,593	219,281	191,763	411,044	319,253
	0,0103012	x ₃	0,66	941,2	5,83	0,935	256,887	222,314	189,695	412,009	347,688
	0,0108650	x ₄	0,76	1201,93	7,71	1,194	258,263	225,348	187,626	412,974	368,179
	0,0118403	x ₅	0,89	1589,59	10,50	1,579	259,440	228,382	185,558	413,940	392,806

1.1.1.5 Perhitungan Koefisien Perpindahan Kalor Evaporasi

Perpindahan kalor yang diberikan udara dan parameter temperatur yang ada pada seksi uji menentukan hasil dari nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi. Perpindahan kalor yang diterima udara pada kualitas uap (0,14), frekuensi 14 Hz, debit air evaporator konstan 1,4 LPM, dan laju aliran massa konstan dapat dihitung dengan persamaan 3.18 sampai 3.20 sebagai berikut:

Diketahui:

$$CP_{udara} = 1,005 \text{ kJ/kg.K (Dari Tabel Properties A - 2, Cengel (2005))}$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{udara} &= \rho_{udara} \cdot \dot{V}_{udara} \\ &= 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot (27,5 \times 10^{-3})^2 \cdot 3,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \\ &= 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,002078 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \\ &= 0,002493 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned}$$

$$T_{udara,in_{SU}} = T_6 \left(T_{udara_{sebelum_{SU}}} \right) = 33,72^\circ\text{C}$$

$$T_{udara,out_{SU}} = T_5 \left(T_{udara_{sesudah_{SU}}} \right) = 24,11^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} Q_{evap,SU} &= \dot{m}_{udara} \cdot CP_{udara} \cdot \Delta T_{SU} \\ &= 0,002493 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot \text{K} \cdot (33,72^\circ\text{C} - 24,11^\circ\text{C}) \\ &= 24,09 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Hasil nilai perpindahan kalor yang diberikan udara pada variasi kualitas uap dengan laju aliran massa konstan, ditunjukkan pada tabel 4.2.

Tabel 4.2. Nilai Q_{evap} (perpindahan kalor yang diterima udara) pada beberapa kualitas uap

Inverter	Debit air, evap	X		\dot{m}_{udara}	$C_{p,\text{udara}}$	T_5	T_6	ΔT	Q_{evap}
(Hz)	LPM			(kg/s)	kJ/kg.K	(°C)	(°C)	(°C)	(Watt)
14	1,4	x_0	0,14	0,00249	1,005	24,11	33,72	9,62	24,09
		x_1	0,31	0,00249	1,005	21,68	32,25	10,57	26,50
		x_2	0,45	0,00249	1,005	23,75	34,02	10,27	25,75
		x_3	0,58	0,00249	1,005	25,62	34,71	9,09	22,78
		x_4	0,69	0,00249	1,005	26,51	34,81	8,30	20,81
		x_5	0,77	0,00249	1,005	27,59	35,10	7,51	18,83
16	1,4	x_0	0,15	0,00249	1,005	24,31	34,92	10,62	26,60
		x_1	0,32	0,00249	1,005	21,58	32,16	10,57	26,50
		x_2	0,43	0,00249	1,005	22,57	32,65	10,08	25,26
		x_3	0,57	0,00249	1,005	23,45	33,04	9,59	24,02
		x_4	0,70	0,00249	1,005	24,34	33,34	9,00	22,54
		x_5	0,80	0,00249	1,005	25,23	33,53	8,31	20,81
18	1,4	x_0	0,17	0,00249	1,005	24,51	35,92	11,42	28,61
		x_1	0,32	0,00249	1,005	23,16	34,32	11,16	27,96
		x_2	0,44	0,00249	1,005	23,65	34,61	10,96	27,47
		x_3	0,57	0,00249	1,005	24,54	34,61	10,08	25,25
		x_4	0,70	0,00249	1,005	25,32	34,51	9,19	23,03
		x_5	0,81	0,00249	1,005	26,60	34,71	8,11	20,31
20	1,4	x_0	0,17	0,00249	1,005	24,91	35,92	11,02	27,60
		x_1	0,33	0,00249	1,005	24,44	34,81	10,37	25,99
		x_2	0,50	0,00249	1,005	24,73	35,01	10,27	25,74
		x_3	0,63	0,00249	1,005	25,13	35,30	10,17	25,49
		x_4	0,75	0,00249	1,005	25,72	35,60	9,88	24,75
		x_5	0,89	0,00249	1,005	26,80	35,69	8,89	22,28
22	1,4	x_0	0,19	0,00249	1,005	25,41	35,52	10,12	25,35
		x_1	0,36	0,00249	1,005	22,96	35,20	12,24	30,67
		x_2	0,52	0,00249	1,005	23,65	35,79	12,14	30,42
		x_3	0,66	0,00249	1,005	24,64	35,99	11,35	28,45
		x_4	0,76	0,00249	1,005	25,72	36,28	10,56	26,47
		x_5	0,89	0,00249	1,005	26,60	36,87	10,27	25,73

Untuk temperatur dinding dalam saluran udara pada kualitas uap (0,14), frekuensi 14 Hz, debit air evaporator konstan 1,4 LPM, dan laju aliran massa konstan dapat dihitung dengan persamaan 3.22 sampai 3.25 sebagai berikut:

Diketahui:

Untuk temperatur dinding seksi uji saluran masuk:

$$T_2 = 16,98^\circ\text{C}$$

$$T_3 = 17^\circ\text{C}$$

$$T_4 = 17,25^\circ\text{C}$$

Untuk temperatur dinding seksi uji keluar:

$$T_{10} = 17,80^{\circ}\text{C}$$

$$T_{11} = 18,06^{\circ}\text{C}$$

$$T_{12} = 18,04^{\circ}\text{C}$$

Dari perhitungan mencari nilai T_{wi} menggunakan persamaan 3.22 sampai 3.25 didapat:

$$T_{wi} = \frac{T_{wi\text{in}SU} + T_{wi\text{out}SU}}{2} = \frac{16,41^{\circ}\text{C} + 17,50^{\circ}\text{C}}{2} = 16,95^{\circ}\text{C}$$

Sedangkan untuk T_{sat} dengan menggunakan persamaan 3.26 sebagai berikut:

$$\begin{aligned} T_{sat} &= \frac{T_1 + T_9}{2} \\ &= \frac{15,47^{\circ}\text{C} + 17,71^{\circ}\text{C}}{2} = 16,59^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

Dimana, $T_1 = 15,47^{\circ}\text{C}$ (temperatur dalam pipa seksi uji saluran masuk) dan $T_9 = 17,71^{\circ}\text{C}$ (temperatur dalam pipa seksi uji saluran keluar)

Tabel 4.3. Data input perhitungan $T_{wi}-T_{sat}$

Inverter	Debit air, evap (Hz)	X	Temperatur (°C)								
			T ₂	T ₃	T ₄	T ₁₀	T ₁₁	T ₁₂	T ₁	T ₉	
14	1,4	x ₀	0,14	16,98	17,00	17,25	17,80	18,06	18,04	15,47	17,71
		x ₁	0,31	12,38	12,19	13,88	14,05	13,82	12,72	12,76	12,89
		x ₂	0,45	14,13	14,13	15,44	16,00	15,96	14,75	14,73	14,79
		x ₃	0,58	15,98	16,37	17,77	18,23	17,81	17,08	16,79	17,14
		x ₄	0,69	18,03	17,34	19,71	19,98	19,85	19,22	18,31	19,34
		x ₅	0,77	19,20	19,77	21,27	21,44	21,60	21,16	19,79	21,41
16	1,4	x ₀	0,15	16,28	16,30	16,45	17,70	17,76	17,74	16,85	17,80
		x ₁	0,32	10,05	8,40	9,12	10,84	11,29	8,83	9,30	9,51
		x ₂	0,43	10,24	8,79	9,51	13,08	13,43	10,00	11,12	11,15
		x ₃	0,57	12,19	11,22	11,36	15,22	14,89	11,94	13,02	13,04
		x ₄	0,70	13,75	12,68	12,91	16,87	11,10	15,24	13,32	14,55
		x ₅	0,80	15,50	14,72	14,86	18,33	14,70	17,76	15,86	16,39
18	1,4	x ₀	0,17	15,48	15,50	15,85	17,00	16,96	17,04	16,38	16,95
		x ₁	0,32	9,95	9,18	9,12	12,98	12,36	11,16	11,16	11,02
		x ₂	0,44	11,31	10,63	10,68	13,95	14,11	12,81	12,43	12,59
		x ₃	0,57	12,97	12,29	12,43	15,70	15,96	14,95	14,10	14,40
		x ₄	0,70	15,30	14,52	14,66	17,94	18,00	16,99	16,35	16,45
		x ₅	0,81	17,64	16,66	16,80	20,08	20,24	19,61	18,14	19,13
20	1,4	x ₀	0,17	16,28	16,40	16,55	17,30	17,46	17,74	16,78	17,55
		x ₁	0,33	9,56	8,21	8,54	11,23	12,27	10,48	10,06	10,57
		x ₂	0,50	10,14	9,66	9,80	12,98	14,31	12,42	11,39	12,16
		x ₃	0,63	12,19	11,31	11,75	15,02	14,79	14,46	13,01	13,87
		x ₄	0,75	14,43	13,65	13,98	16,97	17,61	16,60	15,28	16,11
		x ₅	0,89	16,76	16,27	16,51	19,01	19,37	18,64	17,32	18,46
22	1,4	x ₀	0,19	17,28	17,30	17,75	16,80	18,46	18,54	15,76	17,48
		x ₁	0,36	8,98	7,72	7,67	9,77	10,71	8,25	8,61	8,48
		x ₂	0,52	9,76	8,40	8,44	12,01	12,27	8,44	9,50	10,73
		x ₃	0,66	10,14	10,15	10,77	13,27	14,70	11,06	10,38	13,37
		x ₄	0,76	13,26	12,48	12,52	16,68	16,74	13,69	13,30	15,47
		x ₅	0,89	15,40	14,62	14,56	18,72	18,78	16,31	15,25	17,82

Dari hasil perhitungan di atas maka dapat dihitung nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi dengan menggunakan persamaan 3.21 dan hasil ditunjukkan pada tabel 4.4, sebagai berikut:

$$h_{evap} = \frac{Q_{evap} \cdot SU}{A_i \cdot (T_{wi} - T_{sat})} = \frac{29,04 \text{ Watt}}{0,065155 \text{ m}^2 (16,95^\circ\text{C} - 16,59^\circ\text{C})} = 1015,021 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Dengan, $\Delta T = T_{wi} - T_{sat} \rightarrow \text{jika } T_{wi} > T_{sat}$

$\Delta T = T_{sat} - T_{wi} \rightarrow \text{jika } T_{wi} < T_{sat}$

Tabel 4.4. Hasil perhitungan nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi

Inverter	Debit air, $evap$	X		Q_{evap}	T_{wi}	T_{sat}	$\Delta T_{wi, T_{sat}}$	h_{evap}
(Hz)	LPM			(Watt)	($^\circ\text{C}$)	($^\circ\text{C}$)	($^\circ\text{C}$)	($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)
14	1,4	x_0	0,14	24,09	16,95	16,59	0,36	1015,02
		x_1	0,31	26,50	13,17	12,83	0,35	1171,14
		x_2	0,45	25,75	15,07	14,76	0,31	1278,39
		x_3	0,58	22,78	17,21	16,96	0,24	1441,88
		x_4	0,69	20,81	19,02	18,82	0,20	1606,32
		x_5	0,77	18,83	20,74	20,60	0,14	2015,58
16	1,4	x_0	0,15	26,60	17,69	17,33	0,36	1127,45
		x_1	0,32	26,50	9,76	9,41	0,35	1173,57
		x_2	0,43	25,26	10,84	11,14	0,30	1309,06
		x_3	0,57	24,02	12,80	13,03	0,23	1608,02
		x_4	0,70	22,54	13,76	13,93	0,17	1983,11
		x_5	0,80	20,81	15,98	16,12	0,15	2160,71
18	1,4	x_0	0,17	28,61	17,04	16,67	0,37	1181,04
		x_1	0,32	27,96	10,79	11,09	0,30	1423,41
		x_2	0,44	27,47	12,25	12,51	0,26	1607,75
		x_3	0,57	25,25	14,05	14,25	0,20	1909,09
		x_4	0,70	23,03	16,24	16,40	0,17	2126,40
		x_5	0,81	20,31	18,50	18,64	0,13	2323,60
20	1,4	x_0	0,17	27,60	17,52	17,17	0,35	1197,78
		x_1	0,33	25,99	10,05	10,32	0,27	1479,71
		x_2	0,50	25,74	11,55	11,77	0,22	1784,67
		x_3	0,63	25,49	13,25	13,44	0,19	2084,60
		x_4	0,75	24,75	15,54	15,70	0,16	2376,60
		x_5	0,89	22,28	17,76	17,89	0,13	2674,44
22	1,4	x_0	0,19	25,35	16,30	16,62	0,32	1225,26
		x_1	0,36	30,67	8,85	8,55	0,30	1559,74
		x_2	0,52	30,42	9,88	10,11	0,23	2032,81
		x_3	0,66	28,45	11,68	11,88	0,19	2264,20
		x_4	0,76	26,47	14,23	14,39	0,16	2545,34
		x_5	0,89	25,73	16,40	16,53	0,13	2925,46

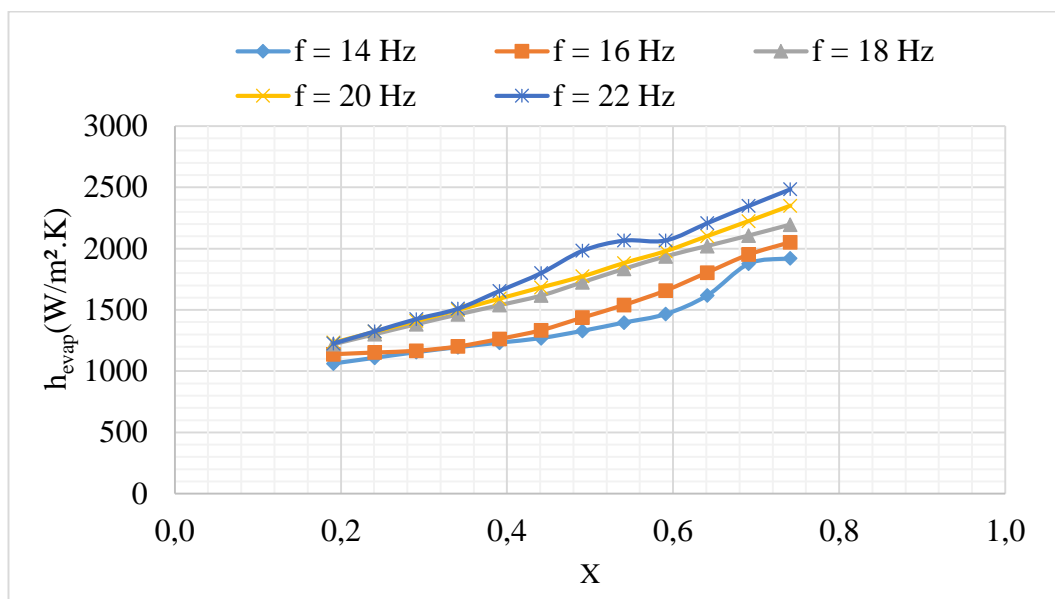
Selanjutnya agar kualitas uap sama rata untuk tiap variasi frekuensi inverter maka dilakukan penambahan 0,05 mulai dari kualitas uap awal yaitu 0,14 kemudian dilakukan interpolasi. Hasil dari perhitungan interpolasi dengan kualitas uap sama rata pada tiap variasi frekuensi inverter, ditunjukkan pada tabel 4.5 sebagai berikut:

Tabel 4.5. Nilai kualitas uap dengan koefisien perpindahan kalor evaporasi pada variasi frekuensi inverter

$X_{,real}$	14 Hz	16 Hz	18 Hz	20 Hz	22 Hz
	h_{evap}	h_{evap}	h_{evap}	h_{evap}	h_{evap}
	(W/m ² .K)	(W/m ² .K)	(W/m ² .K)	(W/m ² .K)	(W/m ² .K)
0,19	1061,43	1138,04	1219,77	1233,11	1225,28
0,24	1107,83	1152,01	1301,75	1321,68	1325,29
0,29	1154,24	1165,97	1383,72	1410,25	1425,30
0,34	1194,65	1201,39	1462,38	1499,53	1509,80
0,39	1231,79	1262,68	1538,24	1591,77	1655,52
0,44	1268,77	1333,80	1616,48	1683,63	1800,63
0,49	1328,38	1436,89	1725,66	1773,81	1983,22
0,54	1395,94	1539,98	1834,85	1882,48	2065,86
0,59	1464,96	1657,83	1936,26	1979,09	2067,39
0,64	1616,68	1804,36	2021,14	2101,77	2207,97
0,69	1875,70	1950,88	2106,02	2224,46	2348,54
0,74	1921,15	2051,69	2195,15	2349,52	2484,53

1.2 Pembahasan

Dari hasil penelitian yang dilakukan dan pengolahan data koefisien perpindahan kalor evaporasi disajikan dalam bentuk grafik, ditunjukkan pada gambar 4.3. Variasi kualitas uap 0,19-0,74 untuk beberapa frekuensi inverter yaitu 14, 16, 18, 20, dan 22 Hz dengan diatur laju aliran massa refrigeran dan juga debit air pendingin evaporator konstan.



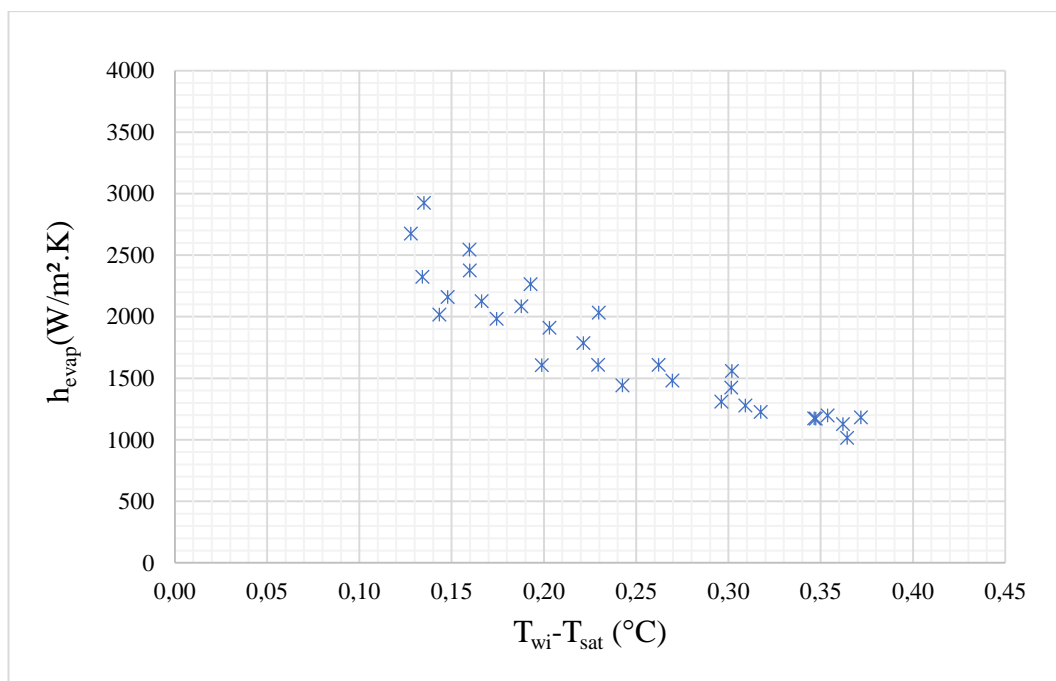
Gambar 4.3. Grafik hubungan antara koefisien perpindahan kalor evaporasi (h_{evap}) dengan kualitas uap (x) pada berbagai frekuensi dan laju aliran massa konstan

Pada grafik yang ditunjukkan dalam gambar 4.3 yaitu hasil pengujian hubungan antara koefisien perpindahan kalor evaporasi dengan kualitas uap, seiring meningkatnya kualitas uapnya maka nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi (h_{evap}) juga semakin meningkat. Hal ini sesuai dengan hasil analisa penelitian Dalkilic (2016), yang menunjukkan peningkatan nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi terhadap naiknya kualitas uap.

Dari data grafik yang diperoleh didapatkan nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi (h_{evap}) yang terjadi pada frekuensi inverter 22 Hz dengan laju aliran massa 0,0107089 kg/s memiliki nilai yang tinggi 2484,53 W/m².K dengan kualitas uap 0,74. Selain itu pada gambar 4.3 menunjukkan bahwa semakin besar fluks massa antara 40,23 – 48,80 kg/m².s yang terjadi maka koefisien perpindahan kalor evaporasi juga mengalami peningkatan yang signifikan. Hasil ini sesuai dengan penelitian Yen (1997) bahwa koefisien perpindahan kalor evaporasi untuk R-134 pada kualitas uap tinggi, fluks massa menunjukkan efek signifikan pada koefisien perpindahan kalor. Bertentangan dengan efek fluks massa, fluks kalor tidak memiliki efek signifikan pada perpindahan kalor pada kualitas tinggi namun menunjukkan beberapa pengaruh pada kualitas rendah.

Perpindahan kalor pada saluran vertikal dengan aliran ke bawah, naiknya kualitas dengan tingkat turbulensi naik menimbulkan perpindahan kalor meningkat. Pemanasan yang terus dinaikkan akan terjadi penguapan dan menimbulkan butir-butir uap menyatu (slug). Laju aliran massa refrigeran yang semakin besar juga menimbulkan turbulensi meningkat sehingga perpindahan kalor tinggi. Perpindahan kalor yang terus meningkat juga diikuti meningkatnya koefisien perpindahan kalor evaporasi.

Nilai-nilai yang diperoleh tersebut juga dipengaruhi pada parameter temperatur yang terdapat pada sistem seperti temperatur dalam seksi uji saluran masuk dan keluar, temperatur udara sebelum dan sesudah seksi uji dan temperatur dinding dalam saluran seksi uji. Beda temperatur jenuh evaporasi ditunjukkan dalam gambar 4.4.



Gambar 4.4. Hubungan koefisien perpindahan kalor evaporasi terhadap beda temperatur jenuh

Beda temperatur jenuh evaporasi ($T_{wi} - T_{sat}$) mempengaruhi kenaikan pada nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi dengan temperatur jenuh yang nilainya kecil, sebaliknya nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi yang rendah apabila nilai dari temperatur jenuh tinggi. Pada aliran fluida kerja dalam saluran perangkat

pemanas listrik (*heater*) semakin besar kualitas uapnya maka cenderung lebih ke fasa gas yang mana kecepatan fluida tersebut semakin cepat dan sirkulasi fluida juga lebih cepat. Hal ini mengakibatkan penyerapan kalor yang dilepas oleh *heater* akan lebih cepat, sehingga koefisien perpindahan kalor evaporasi akan mengalami peningkatan yang tinggi. Sebaliknya pada kualitas uap yang rendah maka kecepatan fluida juga ikut rendah, sehingga nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi tidak begitu tinggi seperti pada kualitas yang tinggi.