

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Eksperimen

Pengujian eksperimen telah dilakukan terhadap lima variasi refrigeran: R-410A sebagai *baseline* dan empat variasi campuran R-32/R-290 dengan rasio 68/32% pada massa pengisian yang berbeda (54%, 57%, 60%, dan 63% dari massa R-410A).

4.1.1 Data Hasil Pengujian

Berdasarkan data eksperimental yang diperoleh, berikut adalah hasil pengujian sistem refrigerasi untuk kelima variasi refrigeran :

Tabel 4. 1 Data hasil rata-rata pengujian sistem kerja AC

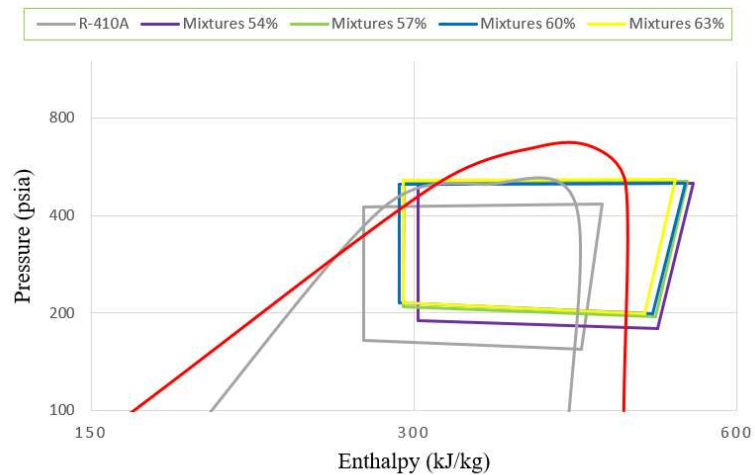
Parameter	Satuan	R-410A	R32/R290 54%	R32/R290 57%	R32/R290 60%	R32/R290 63%
T1 (Masuk Kompresor)	°C	14	19	20	19.1	14.8
T2 (Keluar Kompresor)	°C	63.3	78.3	74.7	73.2	68.9
T3 (Masuk Ekspansi)	°C	41.7	43.9	41.4	40.3	40.9
T4 (Keluar Ekspansi)	°C	12	9.7	11	11.8	12.2
P1 (Tekanan Rendah)	PsiA	155.9	179.8	194	199	198.3
P2 (Tekanan Tinggi)	PsiA	435	504.1	506	501.5	519.7
P3 (Tekanan Tinggi)	PsiA	425.9	501.3	501.3	490.1	516.5
P4 (Tekanan Rendah)	PsiA	166.3	189.3	208.8	213.7	214.1

Temperatur In.	°C	27	27	27	27	27
Evaporator Temperature Out.	°C	6	5	5.5	5	4.5
Evaporator Temperatur In.	°C	35	35	35	35	35
Kondensor Temperatur Out.	°C	39	40	39.5	39	40
Kondensor						
Tegangan	Volt	226.44	227.2	227.59	227.09	226.15
Arus	Ampere	2.38	2.496	2.477	2.493	3.183
Cos φ	-	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
Daya	Watt	548.83	592.11	587.93	582.44	599.31

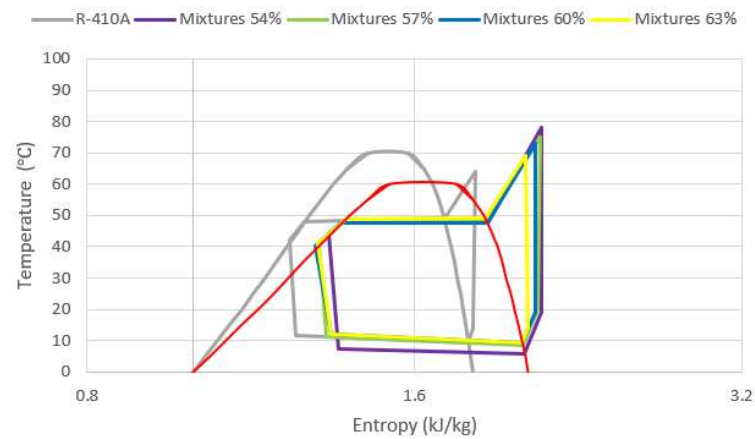
Tabel 4.1 menunjukkan hasil data rata-rata yang telah diambil dari pengujian yang telah dilakukan dengan menggunakan AC Split Merek Haier HSU-05GTO03 5000 BTU R-410A sebagai baseline dan empat variasi campuran R-32/R-290 dengan massa pengisian 54%, 57%, 60%, dan 63% dari massa R-410A. Hasil data tersebut kemudian akan dilakukan pengolahan data dengan menggunakan persamaan yang telah ditentukan.

4.2 Kondisi Kerja Sistem R-410A dan Sistem Campuran R-32/R-290

Nilai kondisi kerja sistem refrigerasi dapat diketahui dari data hasil pengujian pada **Tabel 4.1** dengan parameter suhu dan tekanan. **Gambar 4.1** menunjukan diagram p-H (*pressure – enthalpy*) perbandingan nilai kondisi kerja sistem R-410A dan 4 variasi pengisian campuran R-32/R-290.



Gambar 4. 2 Diagram P-h R-410A dan Campuran R-32/R-290 (54-63%)



Gambar 4. 1 Diagram T-s R-410A dan Campuran R-32/R-290 (54-63%)

Berdasarkan diagram tekanan-entalpi (P-h) pada **Gambar 4.1**, dapat dilihat bahwa refrigeran R-410A beroperasi pada tekanan discharge yang lebih rendah dibandingkan dengan seluruh variasi campuran R-32/R-290. Perbedaan tekanan operasi ini secara langsung mempengaruhi karakteristik termodinamika sistem, di mana tekanan kerja yang lebih tinggi pada campuran R-32/R-290 menyebabkan peningkatan beban kerja kompresor dan mempengaruhi proses perpindahan kalor dalam siklus refrigerasi.

Gambar 4.2 menunjukkan perbedaan efisiensi termodinamika antara berbagai refrigeran. Luas area di bawah kurva R-410A yang lebih kecil mengindikasikan kebutuhan kerja kompresi yang lebih rendah, sementara variasi campuran R-32/R-290 menunjukkan area yang lebih luas dengan variasi 54% mencatat luas area terbesar yang sejalan dengan nilai kerja kompresor tertinggi. Pola distribusi entropi ini merepresentasikan tingkat irreversibilitas dalam sistem, di mana campuran R-32/R-290 mengalami kerugian energi yang lebih signifikan selama proses kompresi dibandingkan dengan R-410A.

Keterangan Warna :

Ungu = Variasi 54%

Hijau = Variasi 57%

Biru = Variasi 60%

Kuning = Variasi 63%

4.3. Perhitungan Sistem Kerja Refrigeran dan Analisis Performa

4.4 Perhitungan Sistem Kerja R-410A

Dari data pengujian **Tabel 4.1** dapat diketahui sistem kerja R-410A, serta dilihat dari diagram p-h maka dapat diketahui nilai enthalpi sistem kerja R-410A dengan aplikasi *REFPROP* pada **gambar 4.3** :

R410A (Final).rpf - REFPROP - NIST Reference Fluid Properties - [1: R410A: Specified state points (50,/50,)]

File Edit Options Substance Calculate Plot Window Help Cautions

	Temperature (°C)	Pressure (psia)	Density (kg/m³)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)
1	14,000	154,70	39,757	429,27	1,8114
2	64,000	434,70	111,45	449,10	1,7854
3	42,000	424,70	969,75	269,53	1,2295
4	11,469	164,70	157,07	269,53	1,2445
5	14,000	154,70	39,757	429,27	1,8114
6					

Gambar 4. 3 Nilai Enthalpy pengujian R410A pada aplikasi REFPROP

- $h_1 = 429,27 \text{ kJ/kg}$
- $h_2 = 449,10 \text{ kJ/kg}$
- $h_3 = h_4 = 269,53 \text{ kJ/kg}$
- Daya Kompresor = 548 Watt atau 0,548 kW

4.4.1 Kerja Kompresor dan Laju Aliran Massa

Kerja Kompresor

Untuk mengetahui kerja kompresor refrigeran maka menggunakan persamaan: (2.3)

$$Q_w = (h_2 - h_1) = 449,10 \text{ kJ/kg} - 429,27 \text{ kJ/kg} = 19,83 \text{ kJ/kg}$$

Keterangan :

q_w = Besarnya kerja kompresor (kJ/kg)

h_2 = *Entalpi* refrigeran saat keluar evaporator dan masuk kompresor (kJ/kg)

h_1 = *Entalpi* refrigeran saat masuk keluar kompresor dan masuk kondensor (kJ/kg)

Laju Aliran Massa

Untuk mengetahui laju aliran massa refrigeran maka menggunakan persamaan: (2.4)

$$\dot{m} = \frac{P_{input}}{Q_w} = \frac{0.548kW}{19.83 \frac{kJ}{kg}} = 0.0276 \frac{kg}{s}$$

Keterangan :

$\dot{m}$ = Massa Laju Aliran (kg/s)

P_{input} = Daya kompresor (kW)

W_k = Kerja Kompresor (kJ/kg)

4.4.2 Efek Refrigrasi dan Kapasitas Refrigrasi

Efek Refrigerasi

Untuk mengetahui nilai efek refrigrasi refrigeran maka menggunakan persamaan (2.2) :

$$Q_{in} = h_1 - h_4 = 429,27 \text{ kJ/kg} - 269,53 \text{ kJ/kg} = 159,74 \text{ kJ/kg}$$

Keterangan :

Q_{in} = Efek refrigrasi (kJ/kg)

h_1 = *Enthalpy* masuk kompresor (kj/kg)

h_4 = *Enthalpy* keluar ekspansi (kj/kg)

Kapasitas Refrigrasi

Untuk mengetahui nilai kapasitas refrigrasi maka menggunakan persamaan (2.5) :

$$Q_{evap} = \dot{m} \times Q_{in} = 0,0276 \text{ kg/s} \times 159,74 \text{ kJ/kg} = 4,40kW$$

Keterangan :

Q_{evap} = Kapasitas refrigrasi (W)

$\dot{m}$ = Laju aliran massa (kg/s)

h_1 = *Entalphy* refrigerant masuk kompresor (kJ/Kg)

h_4 = *Enthalpy* refrigerant keluar ekspansi (kJ/Kg)

4.4.3 Coefficient of Perfomance (COP)

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{evap}}}{Q_w} = \frac{4421}{548,83} = 8,05$$

Keterangan :

β = *Coefficient of Perfomance*

Q_{evap} = Kapasitas refrigrasi (W)

Q_w = Daya kompresor (W)

4.4.4 Temperature Kompresor

Pengukuran temperatur kompresor dilakukan menggunakan alat *Infrared Thermometer (Laser Thermometer)* untuk memperoleh data aktual tanpa kontak langsung dengan permukaan kompresor. Berdasarkan data aktual pada refrigeran R-410A menunjukan **51,1°C**.

4.4.5 Superheating Temperature

Superheating temperature merupakan parameter penting yang menunjukkan kelebihan panas pada refrigeran vapor di atas temperatur saturasi pada tekanan yang sama. Superheating temperature dihitung untuk memastikan refrigeran yang masuk kompresor sudah dalam fase vapor penuh dan mencegah liquid slugging yang dapat merusak kompresor. Pengukuran superheating temperature dilakukan pada titik masuk kompresor (T1) dengan membandingkannya terhadap temperatur saturasi pada tekanan evaporator (P1). Dengan menggunakan persamaan (2.6) :

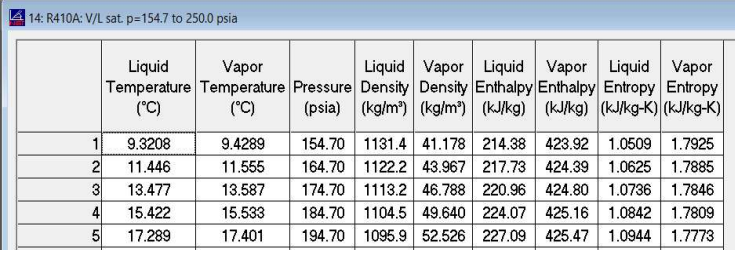
- $T1 = 14^\circ\text{C}$ (temperatur refrigeran masuk kompresor)
- $P1 = 154.7 \text{ psia} \rightarrow T_{\text{saturasi}} = 9.43^\circ\text{C}$ (*vapor temperature* dari tabel saturasi Menggunakan Aplikasi *REFPROP*)
- Superheating Temperature = $T_{\text{aktual}} - T_{\text{saturasi}} = 14^\circ\text{C} - 9.43^\circ\text{C} = 4,57^\circ\text{C}$

Keterangan :

ΔT_{SH} = Temperatur *Superheating* (°C)

T_{aktual} = Temperatur aktual *suction line* (°C)

$T_{saturasi}$ = Temperatur didih pada tekanan tertentu (°C)



	Liquid Temperature (°C)	Vapor Temperature (°C)	Pressure (psia)	Liquid Density (kg/m³)	Vapor Density (kg/m³)	Liquid Enthalpy (kJ/kg)	Vapor Enthalpy (kJ/kg)	Liquid Entropy (kJ/kg-K)	Vapor Entropy (kJ/kg-K)
1	9.3208	9.4289	154.70	1131.4	41.178	214.38	423.92	1.0509	1.7925
2	11.446	11.555	164.70	1122.2	43.967	217.73	424.39	1.0625	1.7885
3	13.477	13.587	174.70	1113.2	46.788	220.96	424.80	1.0736	1.7846
4	15.422	15.533	184.70	1104.5	49.640	224.07	425.16	1.0842	1.7809
5	17.289	17.401	194.70	1095.9	52.526	227.09	425.47	1.0944	1.7773

Gambar 4. 4 Tabel Saturasi pada tekanan 154,7 psia menggunakan Aplikasi REFPROP

Gambar 4.4 menunjukkan nilai *vapor temperature* pada tekanan 154,7 psia *superheating temperature* 4.57°C menunjukkan kondisi operasi yang baik, dimana refrigeran sudah vapor penuh tanpa terlalu berlebihan. *Superheating temperature* normal berkisar antara 5-15°C, sedangkan nilai di bawah 5°C masih dapat diterima selama tidak mendekati 0°C yang berisiko *liquid slugging*.

4.4.6 Subcooling Temperature

Subcooling temperature merupakan parameter yang menunjukkan kelebihan pendinginan pada refrigeran liquid di bawah temperatur saturasi pada tekanan yang sama. Subcooling temperature dihitung untuk memastikan refrigeran yang keluar dari kondensor sudah dalam fase liquid penuh dan mengindikasikan efektivitas proses kondensasi. Pengukuran subcooling temperature dilakukan pada titik keluar kondensor (T3) dengan membandingkannya terhadap temperatur saturasi pada tekanan kondensor (P3). Dengan menggunakan persamaan (2.7) sehingga memperoleh perhitungan dibawah ini:

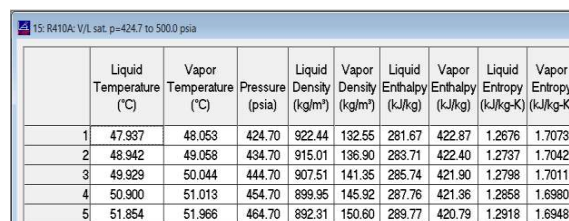
- $T_3 = 42^\circ\text{C}$ (temperatur refrigeran keluar kondensor)
- $P_3 = 424.7 \text{ psia} \rightarrow T_c = 47.937^\circ\text{C}$ (liquid temperature dari tabel saturasi)
- $\text{Subcooling Temperature} = T_{\text{saturasi}} - T_{\text{aktual}} = 47,937^\circ\text{C} - 42^\circ\text{C} = 5.937^\circ\text{C}$

Keterangan :

ΔT_{SH} = Temperatur *Subcooling* ($^\circ\text{C}$)

T_{aktual} = Temperatur aktual *suction line* ($^\circ\text{C}$)

T_{saturasi} = Temperatur *liquid phase* pada tekanan tertentu ($^\circ\text{C}$)



	Liquid Temperature ($^\circ\text{C}$)	Vapor Temperature ($^\circ\text{C}$)	Pressure (psia)	Liquid Density (kg/m^3)	Vapor Density (kg/m^3)	Liquid Enthalpy (kJ/kg)	Vapor Enthalpy (kJ/kg)	Liquid Entropy (kJ/kg-K)	Vapor Entropy (kJ/kg-K)
1	47.937	48.053	424.70	922.44	132.55	281.67	422.87	1.2676	1.7073
2	48.942	49.058	434.70	915.01	136.90	283.71	422.40	1.2737	1.7042
3	49.929	50.044	444.70	907.51	141.35	285.74	421.90	1.2798	1.7011
4	50.900	51.013	454.70	899.95	145.92	287.76	421.36	1.2858	1.6980
5	51.854	51.966	464.70	892.31	150.60	289.77	420.79	1.2918	1.6948

Gambar 4. 5 Tabel Saturasi pada tekanan 424,7 psia menggunakan Aplikasi REFPROP

Gambar 4.5 menunjukkan nilai *liquid temperature* pada tekanan 424,7 psia **subcooling temperature 5.937°C** menunjukkan kondisi kondensasi yang baik, dimana refrigeran sudah liquid penuh dengan pendinginan yang cukup. Subcooling temperature normal berkisar antara $3\text{--}8^\circ\text{C}$ untuk sistem split, nilai ini memastikan tidak ada vapor yang tersisa dalam liquid line dan meningkatkan efisiensi sistem dengan memberikan efek refrigerasi tambahan.

4.5 Perhitungan Sistem Kerja R32/R290 (54% 183,6g)

Dari data pengujian **Tabel 4.1** dapat diketahui sistem kerja R32/R290 (54%) 183,6g, serta dilihat dari diagram p-h maka dapat diketahui nilai enthalpi sistem kerja R32/R290 (54%) 183,6g sebagai berikut :

- $h_1 = 505,53 \text{ kJ/kg}$
- $h_2 = 546,18 \text{ kJ/kg}$
- $h_3 = h_4 = 302,61 \text{ kJ/kg}$
- Daya Kompresor = 592,11 Watt atau 0,592 kW

54%.rpf - REFPROP - NIST Reference Fluid Properties - [1: R32/propane: Specified state points (68, /32,)]

File Edit Options Substance Calculate Plot Window Help Cautions

	Temperature (°C)	Pressure (psia)	Density (kg/m³)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)
1	19,000	179,70	30,628	505,53	2,0938
2	78,000	504,70	80,581	546,18	2,0854
3	44,000	499,70	590,73	302,61	1,3350
4	7,5433	189,70	101,08	302,51	1,3647
5	19,000	179,70	30,628	505,53	2,0938
6					

Gambar 4. 6 Nilai Enthalpy pengujian R32/R290 (54%) pada aplikasi REFPROP

4.5.1 Kerja Kompresor dan Laju Aliran Massa

Kerja Kompresor

Untuk mengetahui kerja kompresor refrigeran maka menggunakan persamaan (2.3) :

$$Q_w = (h_2 - h_1) = 546,18 \text{ kJ/kg} - 505,53 \text{ kJ/kg} = 40,65 \text{ kJ/kg}$$

Keterangan :

Q_w = Kerja kompresor (kJ/kg)

h_2 = *Entalphy* refrigeran keluar kompresor (kJ/kg)

h_1 = *Entalphy* refrigeran masuk kompresor(kJ/kg)

Laju Aliran Massa

Untuk mengetahui laju aliran massa refrigeran maka menggunakan

persamaan (2.4) :

$$\dot{m} = \frac{P_{input}}{Q_w} = \frac{0,592kW}{40,65 \frac{kJ}{kg}} = 0,0145 \frac{kg}{s}$$

Keterangan :

$\dot{m}$ = Massa laju aliran (kg/s)

P_{input} = Daya kompresor (kW)

Q_w = Kerja kompresor (kJ/kg)

4.5.2 Efek Refrigrasi dan Kapasitas Refrigrasi

Efek Refrigerasi

Untuk mengetahui nilai efek refrigrasi refrigeran maka menggunakan persamaan (2.2) :

$$Q_{in} = h_1 - h_4 = 505,53 \text{ kJ/kg} - 302,61 \text{ kJ/kg} = 202.92 \text{ kJ/kg}$$

Keterangan :

Q_{in} = Efek refrigrasi (kJ/kg)

h_1 = *Enthalpy* masuk kompresor (kj/kg)

h_4 = *Enthalpy* keluar ekspansi (kj/kg)

Kapasitas Refrigrasi

Untuk mengetahui nilai kapasitas refrigrasi maka menggunakan persamaan (2.5) :

$$Q_{evap} = \dot{m} \times q_L = 0,0145 \text{ kg/s} \times 202,92 \text{ kJ/kg} = 2,94 \text{ kJ/s atau } 2,94 \text{ kW}$$

Keterangan :

Q_{evap} = Kapasitas refrigrasi (W)

$\dot{m}$ = Laju aliran massa (kg/s)

h_1 = *Entalphy* refrigerant masuk kompresor (kJ/Kg)

h_4 = *Enthalpy* refrigerant keluar ekspansi (kJ/Kg)

4.5.3 Koefisien Kinerja (COP)

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{evap}}}{Q_w} = 202,92 \text{ kJ/kg} / 40,65 \text{ kJ/kg} = 4,99$$

Keterangan :

β = *Coefficient of Perfomance*

Q_{evap} = Kapasitas refrigrasi (W)

Q_w = Daya kompresor (W)

4.5.4 Temperature Kompresor

Pengukuran temperatur kompresor dilakukan menggunakan alat *Infrared Thermometer (Laser Thermometer)* untuk memperoleh data secara cepat dan akurat tanpa kontak langsung dengan permukaan kompresor. Berdasarkan hasil pengukuran, temperatur kompresor tercatat sebesar **75,7°C**.

4.5.5 Superheating Temperature

Superheating temperature merupakan parameter penting yang menunjukkan kelebihan panas pada refrigeran vapor di atas temperatur saturasi pada tekanan yang sama. Superheating temperature dihitung untuk memastikan refrigeran yang masuk kompresor sudah dalam fase vapor penuh dan mencegah liquid slugging yang dapat merusak kompresor. Pengukuran superheating temperature dilakukan pada titik masuk kompresor (T1) dengan membandingkannya terhadap temperatur saturasi pada tekanan evaporator (P1). Dengan menggunakan persamaan (2.6) :

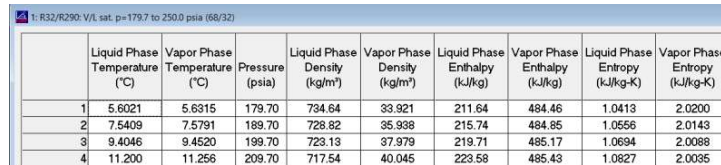
- T1 = 19°C (temperatur refrigeran masuk kompresor)
- P1 = 179,7 psia $\rightarrow T_{\text{saturasi}} = 5,63^\circ\text{C}$ (vapor temperature dari tabel saturasi Menggunakan Aplikasi REFPROP)
- Superheating Temperature = $T_{\text{aktual}} - T_{\text{saturasi}} = 19^\circ\text{C} - 5,63^\circ\text{C} = 13,37^\circ\text{C}$

Keterangan :

ΔT_{SH} = Temperatur *Superheating* (°C)

T_{aktual} = Temperatur aktual *suction line* (°C)

$T_{saturasi}$ = Temperatur *vapor phase* pada tekanan tertentu (°C)



	Liquid Phase Temperature (°C)	Vapor Phase Temperature (°C)	Pressure (psia)	Liquid Phase Density (kg/m³)	Vapor Phase Density (kg/m³)	Liquid Phase Enthalpy (kJ/kg)	Vapor Phase Enthalpy (kJ/kg)	Liquid Phase Entropy (kJ/kg-K)	Vapor Phase Entropy (kJ/kg-K)
1	5.6021	5.6315	179.70	734.64	33.921	211.64	484.46	1.0413	2.0200
2	7.5409	7.5791	189.70	728.82	35.938	215.74	484.85	1.0556	2.0143
3	9.4046	9.4520	199.70	723.13	37.979	219.71	485.17	1.0694	2.0088
4	11.200	11.256	209.70	717.54	40.045	223.58	485.43	1.0827	2.0035

Gambar 4. 7 Tabel Saturasi pada tekanan 179,7 PsiA Meunggunakan Aplikasi REFPROP

Gambar 4.7 menunjukan nilai *vapor temperature* pada tekanan 179,7 psia *superheating temperature* 13,37°C menunjukkan kondisi operasi yang baik, dimana refrigeran sudah vapor penuh tanpa terlalu berlebihan. Superheating temperature normal berkisar antara 5-15°C, sedangkan nilai di bawah 5°C masih dapat diterima selama tidak mendekati 0°C yang berisiko *liquid slugging*.

4.5.6 Subcooling Temperature

Subcooling temperature merupakan parameter yang menunjukkan kelebihan pendinginan pada refrigeran liquid di bawah temperatur saturasi pada tekanan yang sama. *Subcooling temperature* dihitung untuk memastikan refrigeran yang keluar dari kondensor sudah dalam fase liquid penuh dan mengindikasikan efektivitas proses kondensasi. Pengukuran subcooling temperature dilakukan pada titik keluar kondensor (T3) dengan membandingkannya terhadap temperatur saturasi pada tekanan kondensor (P3). Dengan menggunakan persamaan (2.7) sehingga memperoleh perhitungan dibawah ini:

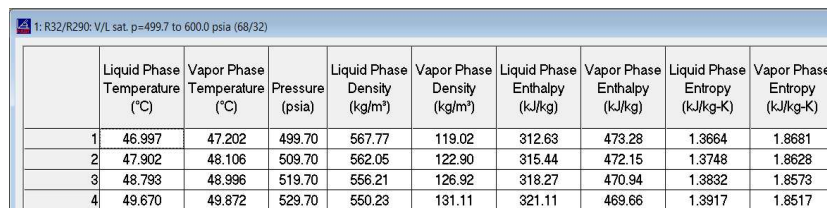
- $T_3 = 44^\circ\text{C}$ (temperatur refrigeran keluar kondensor)
- $P_3 = 499,7 \text{ psia} \rightarrow T_{\text{saturasi}} = 46,997^\circ\text{C}$ (*liquid temperature* dari tabel saturasi)
- $\text{Subcooling Temperature} = T_{\text{saturasi}} - T_3 = 46,997^\circ\text{C} - 44^\circ\text{C} = 2,997^\circ\text{C}$

Keterangan :

ΔT_{SH} = Temperatur *Subcooling* ($^\circ\text{C}$)

T_{aktual} = Temperatur aktual *suction line* ($^\circ\text{C}$)

T_{saturasi} = Temperatur *liquid phase* pada tekanan tertentu ($^\circ\text{C}$)



	Liquid Phase Temperature ($^\circ\text{C}$)	Vapor Phase Temperature ($^\circ\text{C}$)	Pressure (psia)	Liquid Phase Density (kg/m^3)	Vapor Phase Density (kg/m^3)	Liquid Phase Enthalpy (kJ/kg)	Vapor Phase Enthalpy (kJ/kg)	Liquid Phase Entropy (kJ/kg-K)	Vapor Phase Entropy (kJ/kg-K)
1	46.997	47.202	499.70	567.77	119.02	312.63	473.28	1.3664	1.8681
2	47.902	48.106	509.70	562.05	122.90	315.44	472.15	1.3748	1.8628
3	48.793	48.996	519.70	556.21	126.92	318.27	470.94	1.3832	1.8573
4	49.670	49.872	529.70	550.23	131.11	321.11	469.66	1.3917	1.8517

Gambar 4. 8 Tabel Saturasi pada tekanan 499,7 psia menggunakan Aplikasi REFPROP

Gambar 4.8 menunjukkan nilai *liquid temperature* pada tekanan 499,7 psia ***Subcooling temperature 2,997°C*** mengindikasikan bahwa proses kondensasi telah berlangsung dengan baik, dimana refrigeran sudah sepenuhnya dalam fase cair dengan tingkat pendinginan yang cukup. Nilai ini mendekati batas minimum subcooling temperature yang direkomendasikan untuk sistem split ($3\text{-}8^\circ\text{C}$), namun masih dapat menjamin tidak adanya vapor dalam liquid line dan memberikan efek refrigerasi tambahan untuk meningkatkan efisiensi sistem.

4.6 Perhitungan Sistem Kerja R32/R290 (57% 193,8g)

Dari data pengujian **Tabel 4.1** dapat diketahui sistem kerja R32/R290 (57%) 193,8g, serta dilihat dari diagram p-h maka dapat diketahui nilai enthalpi sistem kerja R32/R290 (57%) 193,8g sebagai berikut :

- $h_1 = 503,72 \text{ kJ/kg}$
- $h_2 = 539,69 \text{ kJ/kg}$
- $h_3 = h_4 = 293,47 \text{ kJ/kg}$
- Daya Kompresor = 587,93 Watt atau 0,587 kW

57%.rfp - REFPROP - NIST Reference Fluid Properties - [1: R32/propane: Specified state points (68,/32,)]

File Edit Options Substance Calculate Plot Window Help Cautions

	Temperature (°C)	Pressure (psia)	Density (kg/m³)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)
1	20,000	194,70	33,696	503,72	2,0767
2	75,000	509,70	83,809	539,69	2,0657
3	41,000	504,70	610,30	293,50	1,3059
4	11,203	209,70	130,22	293,47	1,3285
5	20,000	194,70	33,696	503,72	2,0767
6					

Gambar 4. 9 Nilai Enthalpy pengujian R32/R290 (57%) pada aplikasi REFPROP

4.6.1 Kerja Kompresi dan Laju Aliran Massa

Kerja Kompresi

Untuk mengetahui kerja kompresor refrigeran maka menggunakan persamaan (2.3) :

$$Q_w = (h_2 - h_1) = 539,69 \text{ kJ/kg} - 503,72 \text{ kJ/kg} = 35,97 \text{ kJ/kg}$$

Laju Aliran Massa

Untuk mengetahui laju aliran massa refrigeran maka menggunakan persamaan (2.4) :

$$\dot{m} = \frac{P_{input}}{q_w} = \frac{0.587 kW}{35,97 \frac{kJ}{kg}} = 0,0163 \frac{kg}{s}$$

Keterangan :

$\dot{m}$ = Massa laju aliran (kg/s)

P_{input} = Daya kompresor (kW)

Q_w = Kerja kompresor (kJ/kg)

4.6.2 Efek Refrigrasi dan Kapasitas Refrigrasi

Efek Refrigrasi

Untuk mengetahui nilai efek refrigrasi refrigeran maka menggunakan persamaan (2.2) :

$$Q_{in} = h_1 - h_4 = 503,72 \text{ kJ/kg} - 293,47 \text{ kJ/kg} = 210,25 \text{ kJ/kg}$$

Keterangan :

Q_{in} = Efek refrigrasi (kJ/kg)

h_1 = *Enthalpy* masuk kompresor (kJ/kg)

h_4 = *Enthalpy* keluar ekspansi (kJ/kg)

Kapasitas Refrigrasi

Untuk mengetahui nilai kapasitas refrigrasi maka menggunakan persamaan (2.5) :

$$Q_{evap} = \dot{m} \times Q_{in} = 0,0163 \text{ kg/s} \times 210,25 \text{ kJ/kg} = 3,42 \text{ kJ/s atau } 3,42 \text{ kW}$$

Keterangan :

Q_{evap} = Kapasitas refrigrasi (W)

$\dot{m}$ = Laju aliran massa (kg/s)

h_1 = *Entalphy* refrigerant masuk kompresor (kJ/Kg)

h_4 = *Entalphy* refrigerant keluar ekspansi (kJ/Kg)

4.6.3 Coefficient of Perfomance (COP)

Untuk mengetahui perbandingan antara efek refrigerasi dengan kerja kompresor menggunakan persamaan (2.8) :

$$COP/ \beta = Q_{in} / Q_w = 210,25 \text{ kJ/kg} / 35,97 \text{ kJ/kg} = 5,84$$

Keterangan :

β = *Coefficient of Perfomance*

Q_{evap} = Kapasitas refrigrasi (W)

Q_w = Daya kompresor (W)

4.6.4 Temperature Kompresor

Pengukuran temperatur kompresor dilakukan menggunakan alat *Infrared Thermometer (Laser Thermometer)* untuk memperoleh data secara cepat dan akurat tanpa kontak langsung dengan permukaan kompresor. Berdasarkan hasil pengukuran, temperatur kompresor tercatat sebesar 58,4°C.

4.6.5 Superheating Temperature

Superheating temperature merupakan parameter penting yang menunjukkan kelebihan panas pada refrigeran vapor di atas temperatur saturasi pada tekanan yang sama. *Superheating temperature* dihitung untuk memastikan refrigeran yang masuk kompresor sudah dalam fase vapor penuh dan mencegah liquid slugging yang dapat

merusak kompresor. Pengukuran superheating temperature dilakukan pada titik masuk kompresor (T_1) dengan membandingkannya terhadap temperatur saturasi pada tekanan evaporator (P_1). Dengan menggunakan persamaan (2.6) :

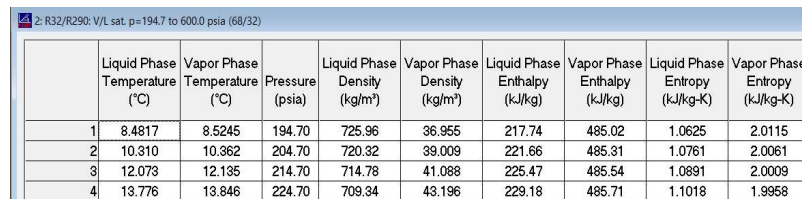
- $T_1 = 20^\circ\text{C}$ (temperatur refrigeran masuk kompresor)
- $P_1 = 194,7 \text{ psia} \rightarrow T_e = 8,52^\circ\text{C}$ (*vapor temperature* dari tabel saturasi Menggunakan Aplikasi *REFPROP*)
- $\text{Superheating Temperature} = T_{\text{aktual}} - T_{\text{saturasi}} = 20^\circ\text{C} - 8,52^\circ\text{C} = 11,48^\circ\text{C}$

Keterangan :

ΔT_{SH} = Temperatur *Superheating* ($^\circ\text{C}$)

T_{aktual} = Temperatur aktual *suction line* ($^\circ\text{C}$)

T_{saturasi} = Temperatur *vapor phase* pada tekanan tertentu ($^\circ\text{C}$)



	Liquid Phase Temperature ($^\circ\text{C}$)	Vapor Phase Temperature ($^\circ\text{C}$)	Pressure (psia)	Liquid Phase Density (kg/m^3)	Vapor Phase Density (kg/m^3)	Liquid Phase Enthalpy (kJ/kg)	Vapor Phase Enthalpy (kJ/kg)	Liquid Phase Entropy (kJ/kg-K)	Vapor Phase Entropy (kJ/kg-K)
1	8.4817	8.5245	194.70	725.96	36.955	217.74	485.02	1.0625	2.0115
2	10.310	10.362	204.70	720.32	39.009	221.66	485.31	1.0761	2.0061
3	12.073	12.135	214.70	714.78	41.088	225.47	485.54	1.0891	2.0009
4	13.776	13.846	224.70	709.34	43.196	229.18	485.71	1.1018	1.9958

Gambar 4. 10 Tabel Saturasi pada tekanan 194,7 psia Menggunakan Aplikasi REFPROP

Gambar 4.10 menunjukkan nilai *vapor temperature* pada tekanan 194,7 psia *Superheating temperature* $11,48^\circ\text{C}$ menunjukkan kondisi operasi yang baik, dimana refrigeran sudah vapor penuh tanpa terlalu berlebihan. Superheating temperature normal berkisar antara $5\text{--}15^\circ\text{C}$, sedangkan nilai di bawah 5°C masih dapat diterima selama tidak mendekati 0°C yang berisiko liquid slugging.

4.6.6 Subcooling Temperature

Subcooling temperature merupakan parameter yang menunjukkan kelebihan pendinginan pada refrigeran *liquid* di bawah temperatur saturasi pada tekanan yang sama. Subcooling temperature dihitung untuk memastikan refrigeran yang keluar dari kondensor sudah dalam fase liquid penuh dan mengindikasikan efektivitas proses kondensasi. Pengukuran subcooling temperature dilakukan pada titik keluar kondensor (T_3) dengan membandingkannya terhadap temperatur saturasi pada tekanan kondensor (P_3). Dengan menggunakan persamaan (2.7) sehingga memperoleh perhitungan dibawah ini:

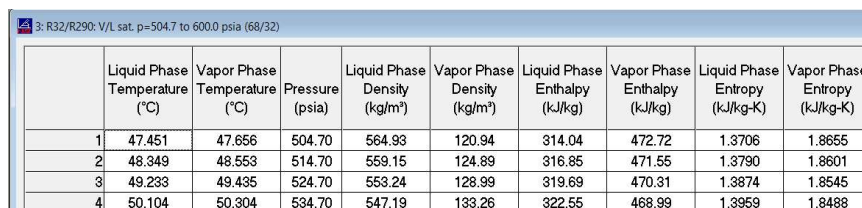
- $T_3 = 41^\circ\text{C}$ (temperatur refrigeran keluar kondensor)
- $P_3 = 504,7 \text{ psia} \rightarrow T_{\text{saturasi}} = 47,451^\circ\text{C}$ (*liquid temperature* dari tabel saturasi)
- $\text{Subcooling Temperature} = T_{\text{saturasi}} - T_{\text{aktual}} = 47,451^\circ\text{C} - 41^\circ\text{C} = 6,451^\circ\text{C}$

Keterangan :

ΔT_{SH} = Temperatur *Subcooling* ($^\circ\text{C}$)

T_{aktual} = Temperatur aktual *suction line* ($^\circ\text{C}$)

T_{saturasi} = Temperatur *liquid phase* pada tekanan tertentu ($^\circ\text{C}$)



	Liquid Phase Temperature ($^\circ\text{C}$)	Vapor Phase Temperature ($^\circ\text{C}$)	Pressure (psia)	Liquid Phase Density (kg/m^3)	Vapor Phase Density (kg/m^3)	Liquid Phase Enthalpy (kJ/kg)	Vapor Phase Enthalpy (kJ/kg)	Liquid Phase Entropy (kJ/kg-K)	Vapor Phase Entropy (kJ/kg-K)
1	47.451	47.656	504.70	564.93	120.94	314.04	472.72	1.3706	1.9655
2	48.349	48.553	514.70	559.15	124.89	316.85	471.55	1.3790	1.9601
3	49.233	49.435	524.70	553.24	128.99	319.69	470.31	1.3874	1.9545
4	50.104	50.304	534.70	547.19	133.26	322.55	468.99	1.3959	1.9488

Gambar 4. 11 Tabel Saturasi pada tekanan 504,7 psia menggunakan Aplikasi REFPROP

Gambar 4.11 menunjukkan nilai *liquid temperature* pada tekanan 504,7 psia *Subcooling temperature* 6,451°C mengindikasikan bahwa proses kondensasi telah berlangsung dengan baik, dimana refrigeran sudah sepenuhnya dalam fase cair dengan tingkat pendinginan yang cukup. Nilai ini mendekati batas minimum subcooling temperature yang direkomendasikan untuk sistem split (3-8°C), namun masih dapat menjamin tidak adanya vapor dalam *liquid line* dan memberikan efek refrigerasi tambahan untuk meningkatkan efisiensi sistem.

4.7 Perhitungan Sistem Kerja R32/R290 (60% 204g)

Dari data pengujian **Tabel 4.1** dapat diketahui sistem kerja R32/R290 (60%) 204g, serta dilihat dari diagram p-h maka dapat diketahui nilai enthalpi sistem kerja R32/R290 (60%) 204g sebagai berikut :

- $h_1 = 501,02 \text{ kJ/kg}$
- $h_2 = 536,63 \text{ kJ/kg}$
- $h_3 = h_4 = 290,76 \text{ kJ/kg}$
- Daya Kompresor = 582,44 Watt atau 0,582 kW

16: R32/R290: Specified state points (68/32)

	Temperature (°C)	Pressure (psia)	Density (kg/m³)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)
1	19.000	199.70	35.085	501.02	2.0640
2	73.000	504.70	84.015	536.63	2.0580
3	40.000	499.70	615.41	290.76	1.2974
4	12.077	214.70	139.69	290.86	1.3184
5	19.000	199.70	35.085	501.02	2.0640
6					

Gambar 4. 12 Nilai Enthalpy pengujian R32/R290 (60%) pada aplikasi REFPROP

4.7.1 Kerja Kompresor dan Laju Aliran Massa

Kerja Kompresor

Untuk mengetahui kerja kompresor refrigeran maka menggunakan persamaan (2.3) :

$$Q_w = (h_2 - h_1) = 536,63 \text{ kJ/kg} - 501,02 \text{ kJ/kg} = 35,61 \text{ kJ/kg}$$

Keterangan :

Q_w = Kerja kompresor (kJ/kg)

h_2 = *Entalphy* refrigeran keluar kompresor (kJ/kg)

h_1 = *Entalphy* refrigeran masuk kompresor (kJ/kg)

Laju Aliran Massa

Untuk mengetahui laju aliran massa refrigeran maka menggunakan persamaan (2.4) :

$$\dot{m} = \frac{P_{input}}{Q_w} = \frac{0,582 \text{ kW}}{35,61 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,0163 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Keterangan :

$\dot{m}$ = Massa laju aliran (kg/s)

P_{input} = Daya kompresor (kW)

Q_w = Kerja kompresor (kJ/kg)

4.7.2 Efek Refrigrasi dan Kapasitas Refrigrasi

Efek Refrigrasi

Untuk mengetahui nilai efek refrigrasi refrigeran maka menggunakan persamaan (2.2) :

$$Q_{in} = h_1 - h_4 = 501,02 \text{ kJ/kg} - 290,76 \text{ kJ/kg} = 210,26 \text{ kJ/kg}$$

Keterangan :

Q_{in} = Efek refrigrasi (kJ/kg)

$h_1 = \text{Enthalpy masuk kompresor (kJ/kg)}$

$h_4 = \text{Enthalpy keluar ekspansi (kJ/kg)}$

Kapasitas Refrigrasi

Untuk mengetahui nilai kapasitas refrigrasi maka menggunakan persamaan

(2.5) :

$$Q_{\text{evap}} = \dot{m} \times Q_{\text{in}} = 0,0163 \text{ kg/s} \times 210,26 \text{ kJ/kg} = 3,42 \text{ kJ/s atau } 3,42 \text{ kW}$$

Keterangan :

Q_{evap} = Kapasitas refrigrasi (W)

$\dot{m}$ = Laju aliran massa (kg/s)

h_1 = *Enthalpy* refrigerant masuk kompresor (kJ/Kg)

h_4 = *Enthalpy* refrigerant keluar ekspansi (kJ/Kg)

4.7.3 Coefficient of Perfomance (COP)

Untuk mengetahui perbandingan antara efek refrigrasi dengan kerja kompresor menggunakan persamaan (2.8) :

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{in}}}{Q_{\text{w}}} = 210,26 \text{ kJ/kg} / 35,61 \text{ kJ/kg} = 5,90$$

Keterangan :

β = *Coefficient of Perfomance*

Q_{evap} = Kapasitas refrigrasi (W)

W_{in} = Daya kompresor (W)

4.7.4 Temperature Kompresor

Pengukuran temperatur kompresor dilakukan menggunakan alat **Infrared**

Thermometer (Laser Thermometer) untuk memperoleh data secara cepat dan

akurat tanpa kontak langsung dengan permukaan kompresor. Berdasarkan hasil pengukuran, temperatur kompresor tercatat sebesar $59,9^{\circ}\text{C}$.

4.7.5 Superheating Temperature

Superheating temperature merupakan parameter penting yang menunjukkan kelebihan panas pada refrigeran vapor di atas temperatur saturasi pada tekanan yang sama. *Superheating temperature* dihitung untuk memastikan refrigeran yang masuk kompresor sudah dalam fase vapor penuh dan mencegah liquid slugging yang dapat merusak kompresor. Pengukuran *superheating temperature* dilakukan pada titik masuk kompresor (T_1) dengan membandingkannya terhadap temperatur saturasi pada tekanan evaporator (P_1). Dengan menggunakan persamaan (2.6) :

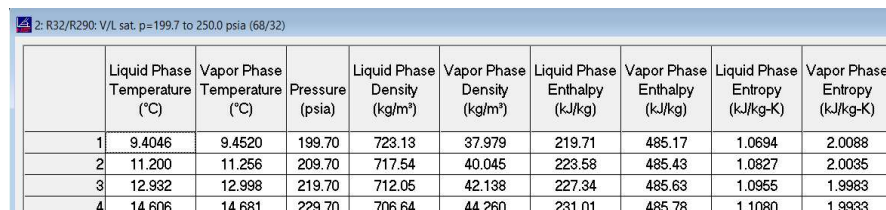
- $T_1 = 19^{\circ}\text{C}$ (temperatur refrigeran masuk kompresor)
- $P_1 = 199,7 \text{ psia} \rightarrow T_{\text{saturasi}} = 9,45^{\circ}\text{C}$ (vapor temperature dari tabel saturasi Menggunakan Aplikasi REFPROP)
- $\text{Superheating Temperature} = T_{\text{aktual}} - T_{\text{saturasi}} = 19^{\circ}\text{C} - 9,45^{\circ}\text{C} = 9,55^{\circ}\text{C}$

Keterangan :

ΔT_{SH} = Temperatur *Superheating* ($^{\circ}\text{C}$)

T_{aktual} = Temperatur aktual *suction line* ($^{\circ}\text{C}$)

T_{saturasi} = Temperatur didih pada tekanan tertentu ($^{\circ}\text{C}$)



	Liquid Phase Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Vapor Phase Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Pressure (psia)	Liquid Phase Density (kg/m^3)	Vapor Phase Density (kg/m^3)	Liquid Phase Enthalpy (kJ/kg)	Vapor Phase Enthalpy (kJ/kg)	Liquid Phase Entropy ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)	Vapor Phase Entropy ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)
1	9.4046	9.4520	199.70	723.13	37.979	219.71	485.17	1.0694	2.0088
2	11.200	11.256	209.70	717.54	40.045	223.58	485.43	1.0827	2.0035
3	12.932	12.998	219.70	712.05	42.138	227.34	485.63	1.0955	1.9983
4	14.606	14.681	229.70	706.64	44.260	231.01	485.78	1.1080	1.9933

Gambar 4. 1 Tabel Saturasi pada tekanan 199,7 psia Menggunakan Aplikasi *REFPROP*

Gambar 4. 11 menunjukkan nilai *vapor temperature* pada tekanan 199,7 psia *Superheating temperature* 9,55°C menunjukkan kondisi operasi yang baik, dimana refrigeran sudah vapor penuh tanpa terlalu berlebihan. Superheating temperature normal berkisar antara 5-15°C, sedangkan nilai di bawah 5°C masih dapat diterima selama tidak mendekati 0°C yang berisiko liquid slugging.

4.7.6 Subcooling Temperature

Subcooling temperature merupakan parameter yang menunjukkan kelebihan pendinginan pada refrigeran *liquid* di bawah temperatur saturasi pada tekanan yang sama. Subcooling temperature dihitung untuk memastikan refrigeran yang keluar dari kondensor sudah dalam fase liquid penuh dan mengindikasikan efektivitas proses kondensasi. Pengukuran subcooling temperature dilakukan pada titik keluar kondensor (T3) dengan membandingkannya terhadap temperatur saturasi pada tekanan kondensor (P3). Dengan menggunakan persamaan (2.7) sehingga memperoleh perhitungan dibawah ini:

- $T_3 = 40^\circ\text{C}$ (temperatur refrigeran keluar kondensor)
- $P_3 = 499,7 \text{ psia} \rightarrow T_{\text{saturasi}} = 46,99^\circ\text{C}$ (liquid temperature dari tabel saturasi)
- $\text{Subcooling Temperature} = T_{\text{saturasi}} - T_{\text{aktual}} = 46,99^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C} = 6,99^\circ\text{C}$

Keterangan :

ΔT_{SH} = Temperatur *Subcooling* (°C)

T_{aktual} = Temperatur aktual *suction line* (°C)

T_{saturasi} = Temperatur didih pada tekanan tertentu (°C)

3: R32/R290: V/L sat. p=499.7 to 550.0 psia (68/32)

	Liquid Phase Temperature (°C)	Vapor Phase Temperature (°C)	Pressure (psia)	Liquid Phase Density (kg/m³)	Vapor Phase Density (kg/m³)	Liquid Phase Enthalpy (kJ/kg)	Vapor Phase Enthalpy (kJ/kg)	Liquid Phase Entropy (kJ/kg-K)	Vapor Phase Entropy (kJ/kg-K)
1	46.997	47.202	499.70	567.77	119.02	312.63	473.28	1.3664	1.8681
2	47.902	48.106	509.70	562.05	122.90	315.44	472.15	1.3748	1.8628
3	48.793	48.996	519.70	556.21	126.92	318.27	470.94	1.3832	1.8573
4	49.670	49.872	529.70	550.23	131.11	321.11	469.66	1.3917	1.8517

Gambar 4. 13 Tabel Saturasi pada tekanan 499,7 psia Menggunakan Aplikasi REFPROP

Gambar 4. 13 menunjukkan nilai *liquid temperature* pada tekanan 499,7 psia *Subcooling temperature* 6,99°C mengindikasikan bahwa proses kondensasi telah berlangsung dengan baik, dimana refrigeran sudah sepenuhnya dalam fase cair dengan tingkat pendinginan yang cukup. Nilai ini mendekati batas minimum subcooling temperature yang direkomendasikan untuk sistem split (3-8°C), namun masih dapat menjamin tidak adanya vapor dalam liquid line dan memberikan efek refrigerasi tambahan untuk meningkatkan efisiensi sistem.

4.8 Perhitungan Sistem Kerja R32/R290 (63% 214,2g)

Dari data pengujian **Tabel 4.1** dapat diketahui sistem kerja R32/R290 (63%) 214,2g, serta dilihat dari diagram p-h maka dapat diketahui nilai enthalpi sistem kerja R32/R290 (63%) 214,2g sebagai berikut:

- $h_1 = 492,94 \text{ kJ/kg}$
- $h_2 = 525,87 \text{ kJ/kg}$
- $h_3 = h_4 = 293,28 \text{ kJ/kg}$
- Daya Kompresor = 599,31 Watt atau 0,599 kW

16: R32/R290: Specified state points (68/32)

	Temperature (°C)	Pressure (psia)	Density (kg/m³)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)
1	14.000	199.70	36.494	492.94	2.0361
2	69.000	519.70	91.368	525.87	2.0233
3	41.000	514.70	611.49	293.28	1.3049
4	12.077	214.70	135.48	293.39	1.3273
5	14.000	199.70	36.494	492.94	2.0361
6					

Gambar 4. 14 Nilai Enthalpy pengujian R32/R290 (63%) pada aplikasi REFPROP

4.8.1 Kerja Kompresor dan Laju Aliran Massa

Kerja Kompresor

Untuk mengetahui kerja kompresor refrigeran maka menggunakan persamaan (2.3):

$$Q_w = (h_2 - h_1) = 525,87 \text{ kJ/kg} - 492,94 \text{ kJ/kg} = 32,93 \text{ kJ/kg}$$

Keterangan :

Q_w = Kerja kompresor (kJ/kg)

h_2 = *Entalphy* refrigeran keluar kompresor (kJ/kg)

h_1 = *Entalphy* refrigeran masuk kompresor(kJ/kg)

Laju Aliran Massa

Untuk mengetahui kerja kompresor refrigeran maka menggunakan persamaan (2.3) :

$$\dot{m} = \frac{P_{input}}{Q_w} = \frac{0,599 \text{ kW}}{32,93 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = \frac{0,0181 \text{ kg}}{\text{s}}$$

Keterangan :

$\dot{m}$ = Massa laju aliran (kg/s)

P_{input} = Daya kompresor (kW)

Q_w = Kerja kompresor (kJ/kg)

4.8.2 Efek Refrigrasi dan Kapasitas Refrigrasi

Efek Refrigerasi

Untuk mengetahui nilai efek refrigrasi refrigeran maka menggunakan persamaan (2.2) :

$$Q_{in} = h_1 - h_4 = 492,24 \text{ kJ/kg} - 293,3 \text{ kJ/kg} = 198,94 \text{ kJ/kg}$$

Keterangan :

Q_{in} = Efek refrigrasi (kJ/kg)

h_1 = *Enthalpy* masuk kompresor (kJ/kg)

h_4 = *Enthalpy* keluar ekspansi (kJ/kg)

Kapasitas Refrigrasi

Untuk mengetahui nilai kapasitas refrigrasi maka menggunakan persamaan (2.5) :

$$Q_{evap} = \dot{m} \times Q_{in} = 0,0181 \text{ kg/s} \times 198,94 \text{ kJ/kg} = 3,6 \text{ kJ/s atau } 3,6 \text{ kW}$$

Keterangan :

Q_{evap} = Kapasitas refrigrasi (W)

$\dot{m}$ = Laju aliran massa (kg/s)

h_1 = *Enthalpy* refrigerant masuk kompresor (kJ/Kg)

h_4 = *Enthalpy* refrigerant keluar ekspansi (kJ/Kg)

4.8.3 Coefficient of Performance (COP)

$$\text{COP} / \beta = Q_{in} / Q_w = 198,94 \text{ kJ/kg} / 32,93 \text{ kJ/kg} = 6,04$$

Keterangan :

β = Coefficient of Performance

Q_{evap} = Kapasitas refrigrasi (W)

Q_w = Daya kompresor (W)

4.8.4 Temperature Kompresor

Pengukuran temperatur kompresor dilakukan menggunakan alat Infrared Thermometer (Laser Thermometer) untuk memperoleh data secara cepat dan akurat tanpa kontak langsung dengan permukaan kompresor. Berdasarkan hasil pengukuran, temperatur kompresor tercatat sebesar Temp.Kompresor 59°C.

4.8.5 Superheating Temperature

Superheating temperature merupakan parameter penting yang menunjukkan kelebihan panas pada refrigeran vapor di atas temperatur saturasi pada tekanan yang sama. *Superheating temperature* dihitung untuk memastikan refrigeran yang masuk kompresor sudah dalam fase vapor penuh dan mencegah *liquid slugging* yang dapat merusak kompresor. Pengukuran superheating temperature dilakukan pada titik masuk kompresor (T1) dengan membandingkannya terhadap temperatur saturasi pada tekanan evaporator (P1). Dengan menggunakan persamaan (2.6) :

- T1 = 14°C (temperatur refrigeran masuk kompresor)
- P1 = 199,7 psia → Te = 9,45°C (*vapor temperature* dari tabel saturasi Menggunakan Aplikasi REFPROP)
- *Superheating Temperature* = $T_{aktual} - T_{saturasi} = 14^\circ\text{C} - 9,45^\circ\text{C} = 4,55^\circ\text{C}$

Keterangan :

ΔT_{SH} = Temperatur *Superheating* (°C)

T_{aktual} = Temperatur aktual *suction line* (°C)

$T_{saturasi}$ = Temperatur *vapor phase* pada tekanan tertentu (°C)

2: R32/R290: V/L sat. p=199.7 to 250.0 psia (68/32)

	Liquid Phase Temperature (°C)	Vapor Phase Temperature (°C)	Pressure (psia)	Liquid Phase Density (kg/m³)	Vapor Phase Density (kg/m³)	Liquid Phase Enthalpy (kJ/kg)	Vapor Phase Enthalpy (kJ/kg)	Liquid Phase Entropy (kJ/kg-K)	Vapor Phase Entropy (kJ/kg-K)
1	9.4046	9.4520	199.70	723.13	37.979	219.71	485.17	1.0694	2.0088
2	11.200	11.256	209.70	717.54	40.045	223.58	485.43	1.0827	2.0035
3	12.932	12.998	219.70	712.05	42.138	227.34	485.63	1.0955	1.9983
4	14.606	14.681	229.70	706.64	44.260	231.01	485.78	1.1080	1.9933

Gambar 4. 15 Tabel Saturasi pada tekanan 199,7 psia menggunakan Aplikasi REFPROP

Gambar 4. 15 menunjukkan nilai *vapor temperature* pada tekanan 199,7 psia *Superheating temperature* 4,55°C menunjukkan kondisi operasi yang baik, dimana refrigeran sudah vapor penuh tanpa terlalu berlebihan. *Superheating temperature* normal berkisar antara 5-15°C, sedangkan nilai di bawah 5°C masih dapat diterima selama tidak mendekati 0°C yang berisiko *liquid slugging*.

4.8.6 Subcooling Temperature

Subcooling temperature merupakan parameter yang menunjukkan kelebihan pendinginan pada refrigeran liquid di bawah temperatur saturasi pada tekanan yang sama. Subcooling temperature dihitung untuk memastikan refrigeran yang keluar dari kondensor sudah dalam fase liquid penuh dan mengindikasikan efektivitas proses kondensasi. Pengukuran subcooling temperature dilakukan pada titik keluar kondensor (T3) dengan membandingkannya terhadap temperatur saturasi pada tekanan kondensor (P3). Dengan menggunakan persamaan (2.7) :

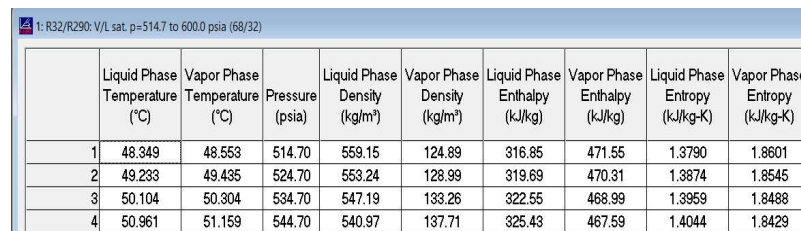
- $T_3 = 41^\circ\text{C}$ (temperatur refrigeran keluar kondensor)
- $P_3 = 514,7 \text{ psia} \rightarrow T_{\text{satursasi}} = 48,349^\circ\text{C}$ (*liquid temperature* dari tabel saturasi)
- $\text{Subcooling Temperature} = T_{\text{satursasi}} - T_{\text{aktual}} = 48,349^\circ\text{C} - 41^\circ\text{C} = 7,349^\circ\text{C}$

Keterangan :

ΔT_{SH} = Temperatur *Subcooling* ($^\circ\text{C}$)

T_{aktual} = Temperatur aktual *suction line* ($^\circ\text{C}$)

$T_{\text{satursasi}}$ = Temperatur *liquid phase* pada tekanan tertentu ($^\circ\text{C}$)



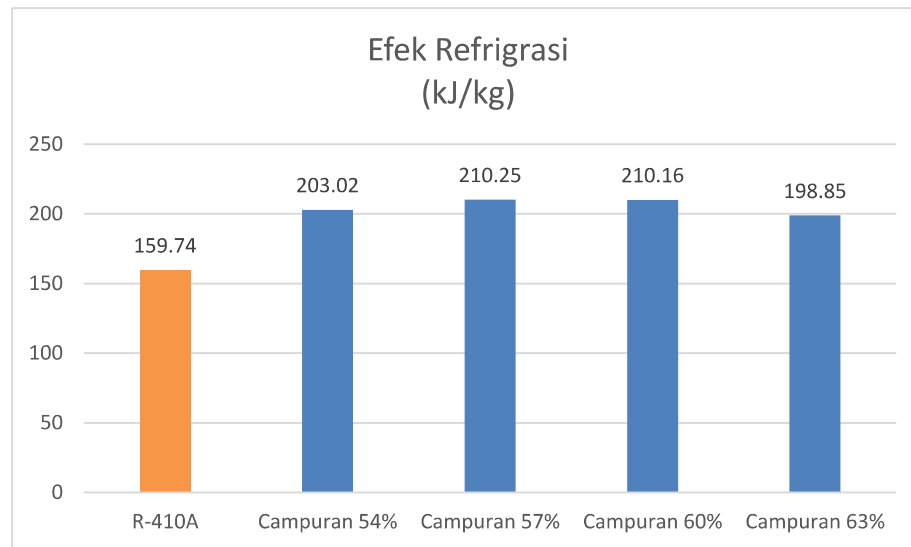
	Liquid Phase Temperature ($^\circ\text{C}$)	Vapor Phase Temperature ($^\circ\text{C}$)	Pressure (psia)	Liquid Phase Density (kg/m^3)	Vapor Phase Density (kg/m^3)	Liquid Phase Enthalpy (kJ/kg)	Vapor Phase Enthalpy (kJ/kg)	Liquid Phase Entropy (kJ/kg-K)	Vapor Phase Entropy (kJ/kg-K)
1	48.349	48.553	514.70	559.15	124.89	316.85	471.55	1.3790	1.8601
2	49.233	49.435	524.70	553.24	128.99	319.69	470.31	1.3874	1.8545
3	50.104	50.304	534.70	547.19	133.26	322.55	468.99	1.3959	1.8488
4	50.961	51.159	544.70	540.97	137.71	325.43	467.59	1.4044	1.8429

Gambar 4. 16 Tabel Saturasi pada tekanan 514,7 psia Menggunakan Aplikasi REFPROP

Gambar 4. 16 menunjukkan nilai *liquid temperature* pada tekanan 514,7 psia *Subcooling temperature* $7,349^\circ\text{C}$ mengindikasikan bahwa proses kondensasi telah berlangsung dengan baik, dimana refrigeran sudah sepenuhnya dalam fase cair dengan tingkat pendinginan yang cukup. Nilai ini mendekati batas minimum subcooling temperature yang direkomendasikan untuk sistem split ($3\text{-}8^\circ\text{C}$), namun masih dapat menjamin tidak adanya vapor dalam liquid line dan memberikan efek refrigerasi tambahan untuk meningkatkan efisiensi sistem.

4.9 Perbandingan Kinerja R-410A dengan 4 variasi campuran R-32/R-290

4.9.1 Efek Refrigrasi dan Kapasitas Refrigrasi



Gambar 4. 17 Perbandingan grafik efek refrigrasi

Grafik perbandingan efek refrigrasi pada **Gambar 4.17** menunjukkan bahwa refrigeran R-410A memiliki nilai efek refrigrasi sebesar **159,74 kJ/kg**, sedangkan campuran R-32/R-290 pada seluruh variasi massa pengisian menunjukkan nilai yang lebih tinggi. Hal ini menandakan bahwa campuran refrigeran memiliki kemampuan penyerapan kalor yang lebih baik dibandingkan refrigeran R-410A.

Pada variasi **54%**, nilai efek refrigrasi yang diperoleh sebesar **203,02 kJ/kg**. Nilai ini jauh lebih tinggi dibandingkan R-410A, dengan selisih peningkatan sebesar **43,28 kJ/kg** atau sekitar **27%**. Peningkatan tersebut dipengaruhi oleh panas laten penguapan pada komponen R-290 yang bernilai **425 kJ/kg** pada tekanan atmosfer, sehingga memberikan kontribusi besar dalam penyerapan kalor di evaporator. Namun, karena jumlah refrigeran masih relatif kecil, laju aliran massa ke evaporator juga lebih rendah, sehingga proses penyerapan kalor belum mencapai

kondisi paling optimal meskipun lebih baik dari R-410A.

Pada variasi **57%**, efek refrigerasi mencapai nilai tertinggi yaitu **210,25 kJ/kg**. Kondisi ini terjadi karena pada komposisi tersebut terdapat keseimbangan optimal antara karakteristik termodinamika campuran dan laju aliran massa refrigeran. Kontribusi R-290 dengan panas laten penguapan yang tinggi membuat kapasitas penyerapan kalor meningkat signifikan, sehingga proses perpindahan kalor di evaporator menjadi lebih efektif. Hal inilah yang menyebabkan variasi 57% mampu mencapai nilai tertinggi dibandingkan variasi massa lainnya maupun R-410A.

Pada variasi **60%**, nilai efek refrigerasi sedikit menurun menjadi **210,16 kJ/kg**. Walaupun perbedaannya sangat kecil dibandingkan variasi 57%, kondisi ini menunjukkan bahwa jumlah massa refrigeran yang lebih besar mulai menekan kinerja sistem. Karena katup ekspansi tidak berubah ukurannya, refrigeran yang lebih banyak ini dipaksa melewati lubang yang sama, sehingga laju alirannya meningkat dan waktu kontak dengan pipa evaporator berkurang. Akibatnya, distribusi energi di dalam sistem menjadi kurang seimbang meskipun kalor yang diserap tetap tinggi. Selisih peningkatan terhadap R-410A tetap signifikan yaitu **50,42 kJ/kg** atau sekitar **31,57%**, tetapi kestabilan sistem sedikit berkurang dibandingkan kondisi 57%.

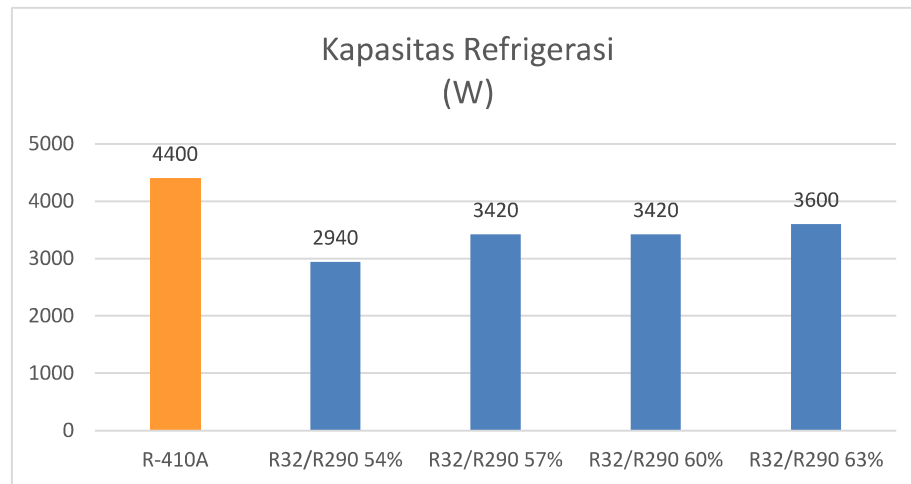
Sementara itu, pada variasi **63%** terjadi penurunan nilai efek refrigerasi menjadi **198,85 kJ/kg**. Nilai ini memang masih lebih tinggi dibandingkan R-410A dengan selisih **39,11 kJ/kg** atau sekitar **24,48%**, tetapi lebih rendah dibandingkan variasi lainnya. Penurunan ini disebabkan oleh jumlah massa refrigeran yang terlalu besar sehingga menimbulkan ketidakseimbangan sirkulasi. Karena katup ekspansi

tidak berubah ukurannya, refrigeran dalam jumlah berlebih dipaksa melewati jalur yang sama sehingga laju alirannya meningkat tajam. Kondisi ini membuat sebagian refrigeran tidak sempat menguap sempurna di evaporator dan menimbulkan gejala *liquid carryover* ke kompresor. Akibatnya, efektivitas perpindahan kalor menurun dan nilai efek refrigerasi lebih rendah dibandingkan variasi sebelumnya.

Jika dibandingkan langsung dengan R-410A, maka seluruh variasi campuran R-32/R-290 memberikan peningkatan efek refrigerasi antara **24,48% hingga 31,62%**. Performa terbaik ditunjukkan oleh variasi 57%, sedangkan variasi 63% menjadi yang paling rendah di antara campuran.

Secara keseluruhan, hasil ini membuktikan bahwa campuran R-32/R-290 memiliki potensi besar untuk menggantikan R-410A dari sisi efek refrigerasi. Namun demikian, pemilihan variasi pengisian sangat penting, karena tidak semua kondisi campuran memberikan hasil optimal. Variasi **57%** dapat dianggap sebagai kondisi terbaik, diikuti variasi **60%** dan **54%**, sementara variasi **63%** cenderung menurunkan performa akibat laju aliran massa yang terlalu tinggi, ketidakseimbangan sirkulasi, serta risiko *liquid carryover* dalam sistem.

4.9.2 Kapasitas Refrigrasi



Gambar 4. 18 Perbandingan grafik Kapasitas Refrigrasi

Grafik pada **Gambar 4.18** memperlihatkan perbandingan kapasitas refrigrasi antara R-410A dan empat variasi campuran R-32/R-290. Refrigeran R-410A memiliki kapasitas terbesar yaitu **4400 W**, sedangkan seluruh variasi campuran menghasilkan kapasitas yang lebih rendah. Kondisi ini menunjukkan bahwa kapasitas sistem tidak hanya ditentukan oleh efek refrigrasi per satuan massa, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh jumlah massa refrigeran yang bersirkulasi, densitas uap, serta kondisi penguapan di evaporator.

Pada variasi **54%**, kapasitas refrigrasi hanya mencapai **2940 W**, atau mengalami penurunan sebesar **33,18%** dibandingkan R-410A. Nilai ini menjadi yang terendah di antara seluruh variasi campuran. Hal ini terjadi karena jumlah massa refrigeran yang masuk ke evaporator lebih sedikit, sehingga energi kalor total yang dipindahkan juga lebih rendah, meskipun efek refrigrasi per kilogram meningkat.

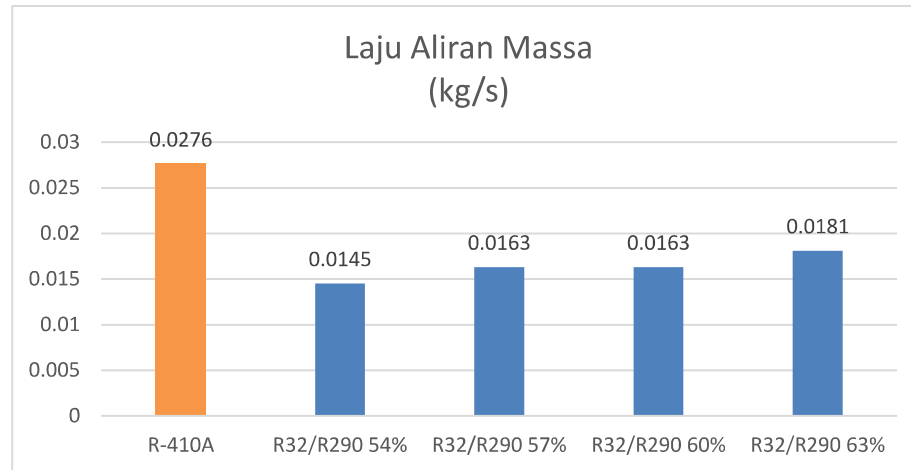
Pada variasi **57%**, kapasitas meningkat menjadi **3420 W**, atau menurun **22,27%** dibandingkan R-410A. Kenaikan ini menunjukkan adanya keseimbangan

yang lebih baik antara jumlah massa refrigeran yang mengalir dan energi yang dapat diserap. Namun, keterbatasan densitas uap campuran dibandingkan dengan R-410A membuat total energi yang dipindahkan per siklus masih lebih rendah, sehingga kapasitas pendinginan belum dapat menyamai refrigeran standar.

Pada variasi **60%**, kapasitas refrigerasi tetap sebesar **3420 W**, sama dengan variasi 57%. Tidak adanya kenaikan kapasitas pada titik ini menunjukkan bahwa penambahan jumlah refrigeran tidak secara otomatis meningkatkan performa sistem. Faktor pembatas seperti ukuran pipa kapiler dan luas penampang evaporator menyebabkan sistem mencapai kondisi jenuh, sehingga kapasitas pendinginan tidak bertambah meskipun efek refrigerasi tinggi.

Pada variasi **63%**, kapasitas refrigerasi meningkat menjadi **3600 W**, atau menurun **18,18%** dibandingkan R-410A. Nilai ini merupakan yang tertinggi di antara seluruh variasi campuran, menunjukkan bahwa pada titik ini jumlah kalor total yang dipindahkan lebih besar dibandingkan variasi sebelumnya. Namun, kapasitas ini tetap belum mampu menyamai R-410A, karena karakteristik fisik campuran menghasilkan debit massa yang lebih rendah daripada refrigeran standar.

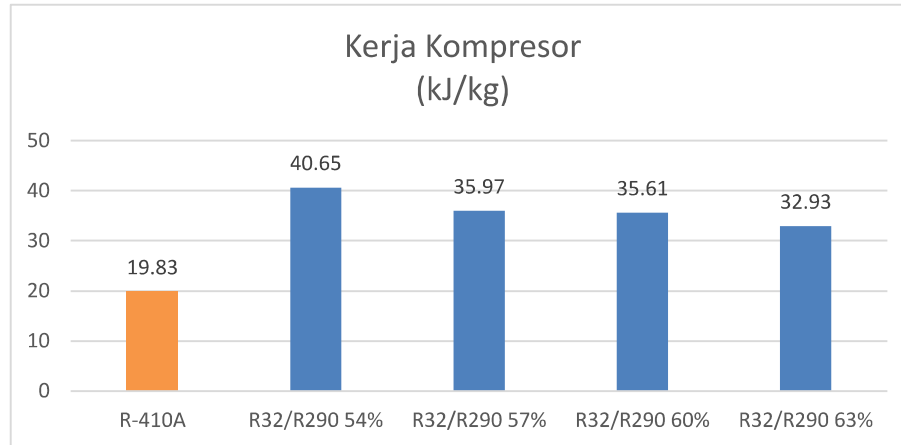
Secara keseluruhan, kapasitas refrigerasi campuran R-32/R-290 lebih rendah dibandingkan R-410A, meskipun ada tren peningkatan dari variasi 54% hingga 63%. Variasi **63%** memberikan kapasitas tertinggi di antara campuran, sementara **57% dan 60%** menunjukkan kestabilan performa meskipun tetap di bawah kapasitas R-410A. Hasil ini membuktikan bahwa pemilihan komposisi campuran sangat memengaruhi kinerja sistem, namun R-410A masih unggul dalam hal kapasitas pendinginan total.



Gambar 4. 19 Perbandingan Laju Aliran Massa

Gambar 4.19 menunjukkan bahwa laju aliran massa refrigeran R-410A sebesar **0,0276 kg/s**, jauh lebih tinggi dibandingkan seluruh variasi campuran R-32/R-290. Pada campuran 54% nilai laju aliran massa hanya **0,0145 kg/s**, kemudian meningkat pada variasi 57% dan 60% sebesar **0,0163 kg/s**, dan mencapai nilai tertinggi pada variasi 63% yaitu **0,0181 kg/s**. Rendahnya laju aliran massa pada campuran dibandingkan R-410A disebabkan oleh perbedaan sifat termodinamika dan tekanan kerja refrigeran, sehingga meskipun efek refrigerasi campuran lebih besar, kapasitas total yang dihasilkan tetap lebih rendah karena massa refrigeran yang bersirkulasi di dalam sistem lebih sedikit.

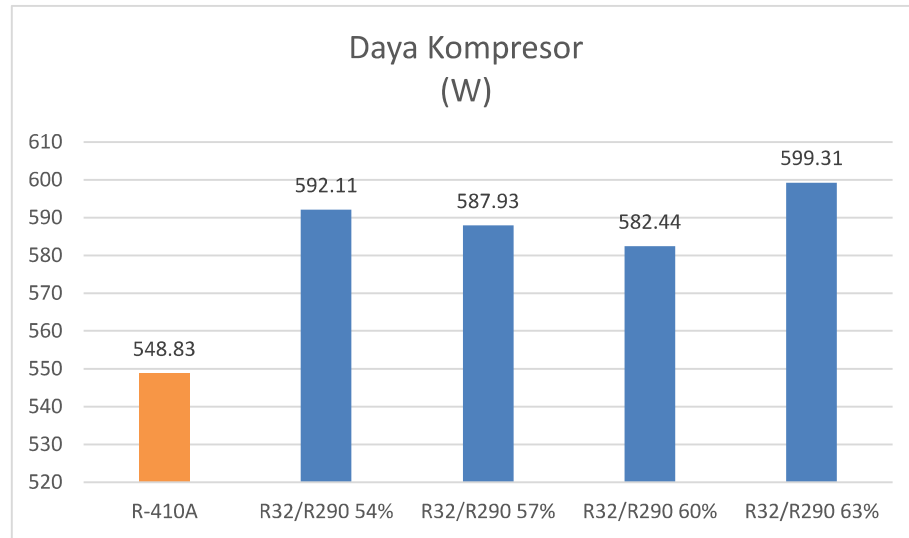
4.9.3 Kerja Kompresor dan Daya Kompresor



Gambar 4. 20 Perbandingan Kerja Kompresor

Gambar 4.20 menunjukkan bahwa kerja kompresor R-410A memiliki nilai paling rendah yaitu **19,83 kJ/kg**, sedangkan campuran R-32/R-290 menunjukkan nilai yang lebih tinggi pada semua variasi. Nilai tertinggi terdapat pada variasi **54%** sebesar **40,65 kJ/kg** akibat rasio kompresi yang lebih besar sehingga beban kerja kompresor meningkat signifikan. Pada variasi **57%** dan **60%**, nilai kerja kompresor menurun menjadi sekitar **35,97 kJ/kg** dan **35,61 kJ/kg**, menandakan adanya perbaikan keseimbangan tekanan dalam sistem. Sementara itu, variasi **63%** menghasilkan nilai terendah di antara campuran yaitu **32,93 kJ/kg**, namun tetap lebih tinggi dibandingkan R-410A.

Secara keseluruhan, penggunaan campuran R-32/R-290 membutuhkan usaha kompresi lebih besar dibandingkan R-410A, dengan kecenderungan beban kerja tertinggi pada komposisi rendah (54%) dan menurun seiring peningkatan proporsi campuran.



Gambar 4. 21 Perbandingan Daya Kompresor

Gambar 4.21 memperlihatkan perbandingan daya kompresor antara R-410A dan campuran R-32/R-290. Nilai daya terendah ditunjukkan oleh R-410A sebesar **548,83 W**, sedangkan seluruh variasi campuran menghasilkan daya yang lebih tinggi. Hal ini menandakan bahwa penggunaan campuran R-32/R-290 meningkatkan beban energi kompresor dibandingkan refrigeran standar.

Pada variasi **54%**, daya kompresor mencapai **592,11 W**, menjadi salah satu nilai tertinggi di antara campuran. Kenaikan ini dipengaruhi oleh **kerja kompresor per satuan massa yang besar (40,65 kJ/kg)** serta laju aliran massa yang masih cukup tinggi (**0,0145 kg/s**). Kombinasi keduanya menyebabkan kebutuhan energi listrik meningkat signifikan dibandingkan R-410A.

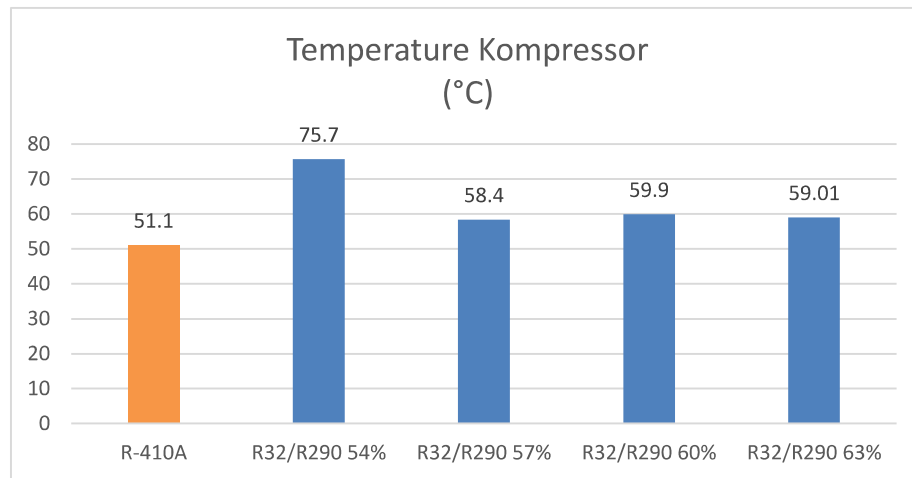
Pada variasi **57%**, daya kompresor menurun menjadi **587,93 W**, seiring dengan turunnya kerja kompresor menjadi **35,97 kJ/kg**. Meskipun laju aliran massa bertambah menjadi **0,0163 kg/s**, nilai kerja per satuan massa yang lebih rendah membuat kebutuhan daya sedikit berkurang. Kondisi ini menunjukkan adanya keseimbangan antara sifat termodinamika campuran dan debit massa refrigeran.

Pada variasi **60%**, daya kompresor kembali turun menjadi **582,44 W**. Penurunan ini dipengaruhi oleh nilai kerja kompresor yang semakin kecil (**35,61 kJ/kg**) dengan laju aliran massa yang relatif sama seperti variasi 57%. Hal ini menandakan bahwa penambahan komposisi campuran tidak meningkatkan beban kompresor secara signifikan, melainkan membuat sistem cenderung stabil pada titik ini.

Sedangkan pada variasi **63%**, daya kompresor meningkat menjadi **599,31 W**, nilai tertinggi di antara semua campuran. Kenaikan ini terjadi karena meskipun kerja kompresor lebih rendah (**32,93 kJ/kg**), laju aliran massa naik hingga **0,0181 kg/s**, sehingga total energi listrik yang dibutuhkan lebih besar. Dengan kata lain, peningkatan debit massa pada komposisi ini menambah beban daya meskipun beban kerja per satuan massa berkurang.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa campuran R-32/R-290 cenderung meningkatkan daya kompresor dibandingkan R-410A. Nilai tertinggi pada variasi 63% mengindikasikan bahwa laju aliran massa menjadi faktor dominan yang memengaruhi daya, sedangkan variasi 57% dan 60% lebih seimbang karena kombinasi antara kerja kompresor yang lebih rendah dan laju aliran massa yang stabil.

4.9.4 Temperature Kompresor



Gambar 4. 22 Perbandingan Temperature Kompresor

Gambar 4.22 memperlihatkan perbandingan temperatur kompresor antara R-410A dan campuran R-32/R-290. Temperatur kompresor pada **R-410A** tercatat sebesar **51,1 °C**, sedangkan seluruh variasi campuran menunjukkan nilai yang lebih tinggi. Kondisi ini menandakan bahwa penggunaan campuran menyebabkan beban termal kompresor meningkat dibandingkan R-410A.

Pada variasi **54%**, temperatur kompresor mencapai nilai tertinggi yaitu **75,7 °C**. Peningkatan yang signifikan ini dipengaruhi oleh **rasio kompresi yang lebih tinggi** dan **kerja kompresor per satuan massa terbesar (40,65 kJ/kg)**. Tekanan kondensasi yang lebih besar membuat gas keluar dari kompresor pada temperatur lebih tinggi. Akibatnya, temperatur buang naik drastis dan berpotensi mempercepat degradasi oli pelumas serta meningkatkan risiko keausan komponen.

Pada variasi **57%**, temperatur menurun tajam menjadi **58,4 °C**. Penurunan ini terjadi karena **kerja kompresor menurun menjadi 35,97 kJ/kg** dan laju aliran massa lebih stabil (**0,0163 kg/s**), sehingga proses pemampatan tidak terlalu berat. Kondisi ini membuat panas buang lebih terkendali dibandingkan variasi 54%.

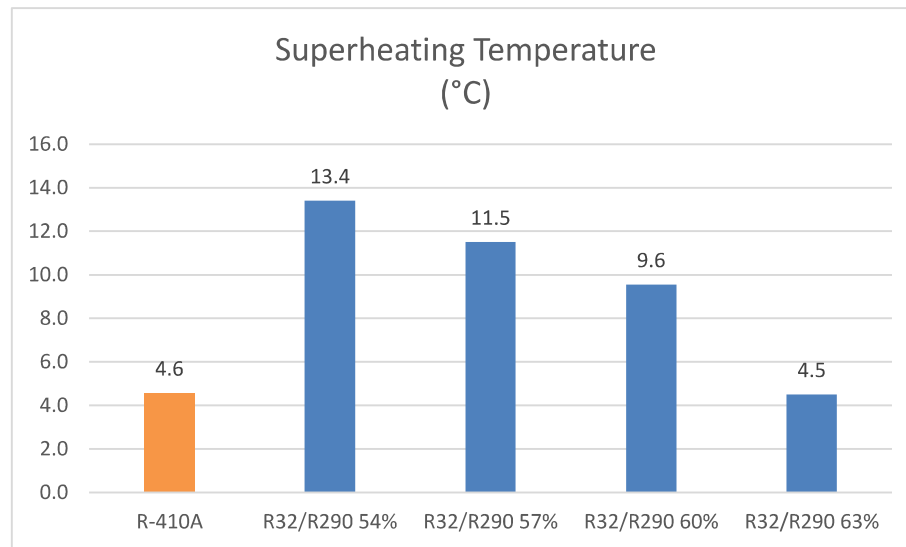
Pada variasi **60%**, temperatur kompresor tercatat **59,9 °C**, hampir sama dengan

variasi 57%. Perbedaan yang kecil ini menunjukkan bahwa sistem sudah berada pada kondisi yang relatif stabil, sehingga kenaikan komposisi campuran tidak lagi membuat kompresor bekerja lebih berat.

Pada variasi 63%, temperatur kompresor sedikit menurun menjadi **59,01 °C**. Nilai ini lebih rendah dibandingkan 54%, namun tetap lebih tinggi daripada R-410A. Penurunan ini disebabkan oleh **kerja kompresor yang semakin rendah (32,93 kJ/kg)**, meskipun laju aliran massa meningkat menjadi **0,0181 kg/s**. Dengan kata lain, beban kerja kompresor lebih ringan, sehingga panas buang tidak terlalu tinggi.

Secara keseluruhan, tren ini menunjukkan bahwa penggunaan campuran R-32/R-290 meningkatkan temperatur kompresor dibandingkan R-410A. Variasi 54% memberikan temperatur tertinggi akibat rasio kompresi yang besar, sedangkan 57% hingga 63% lebih stabil dengan temperatur di kisaran **58–60 °C**. Dari sisi operasional, temperatur kompresor yang tinggi dapat menurunkan efisiensi pendinginan, mempercepat degradasi pelumas, dan mengurangi umur pakai kompresor. Oleh karena itu, variasi **57% hingga 63%** lebih direkomendasikan karena memberikan temperatur yang lebih terkendali, walaupun tetap di atas R-410A.

4.9.5 Superheating Temperature



Gambar 4. 23 Perbandingan Superheating Temperature

Gambar 4.23 memperlihatkan perbandingan nilai *superheating temperature* antara R-410A dan campuran R-32/R-290. Pada R-410A, *superheating* tercatat paling rendah yaitu **4,6 °C**, sedangkan seluruh variasi campuran menunjukkan nilai yang lebih tinggi kecuali pada komposisi 63% yang justru kembali mendekati nilai R-410A.

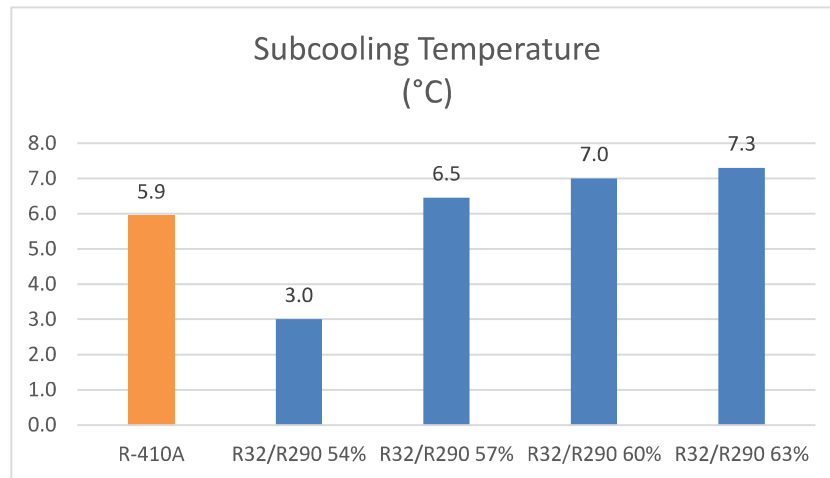
Pada variasi **54%**, *superheating* mencapai nilai tertinggi sebesar **13,4 °C**. Nilai yang tinggi ini menunjukkan bahwa refrigeran uap di sisi hisap kompresor jauh lebih panas dibandingkan titik jenuhnya. Kondisi ini terjadi karena jumlah cairan yang masuk evaporator relatif sedikit sehingga proses penguapan lebih cepat selesai, dan sisa panjang pipa evaporator hanya dilalui uap yang terus bertambah panas. Akibatnya, temperatur hisap kompresor meningkat dan risiko beban termal kompresor juga bertambah.

Pada variasi **57%**, *superheating* turun menjadi **11,5 °C**, dan kembali menurun pada variasi **60%** menjadi **9,6 °C**. Penurunan ini disebabkan oleh jumlah cairan refrigeran yang lebih seimbang dengan kapasitas perpindahan kalor di evaporator. Dengan demikian, sebagian besar panjang pipa evaporator digunakan untuk proses penguapan, sehingga uap yang masuk ke kompresor tidak terlalu panas.

Pada variasi **63%**, nilai *superheating* turun drastis menjadi **4,5 °C**, hampir sama dengan R-410A. Kondisi ini terjadi karena jumlah cairan refrigeran yang masuk ke evaporator jauh lebih besar, sementara laju aliran massa juga meningkat hingga **0,0181 kg/s**. Hal ini menyebabkan penguapan berlangsung hampir di sepanjang pipa evaporator, sehingga refrigeran uap yang keluar mendekati kondisi jenuh. Akibatnya, selisih suhu antara titik jenuh dan suhu hisap menjadi sangat kecil. Walaupun kondisi ini mendekati nilai ideal, *superheating* yang terlalu rendah tetap perlu diwaspadai karena meningkatkan risiko refrigeran cair ikut terbawa ke kompresor (*liquid carryover*) bila terjadi ketidakseimbangan aliran.

Secara keseluruhan, *superheating temperature* pada campuran R-32/R-290 cenderung lebih tinggi dibandingkan R-410A, terutama pada variasi 54% dan 57%. Nilai yang lebih tinggi menunjukkan bahwa kompresor bekerja dengan gas hisap yang lebih panas, sehingga meningkatkan risiko beban termal. Sementara itu, variasi **63%** memberikan nilai yang paling mendekati kondisi normal R-410A, namun karakteristiknya berbeda karena disebabkan oleh dominasi refrigeran cair yang masuk evaporator, sehingga kontrol *superheating* perlu diperhatikan agar sistem tetap stabil dan aman.

4.9.6 Subcooling Temperature



Gambar 4. 24 Perbandingan Subcooling Temperature

Grafik **Gambar 4.24** memperlihatkan perbandingan nilai *subcooling temperature* antara R-410A dan campuran R-32/R-290. Pada R-410A, nilai *subcooling* tercatat sebesar **5,9 °C**. Sementara itu, variasi campuran menunjukkan tren yang berbeda, di mana nilai *subcooling* dapat lebih rendah maupun lebih tinggi dibandingkan R-410A tergantung pada komposisi campurannya.

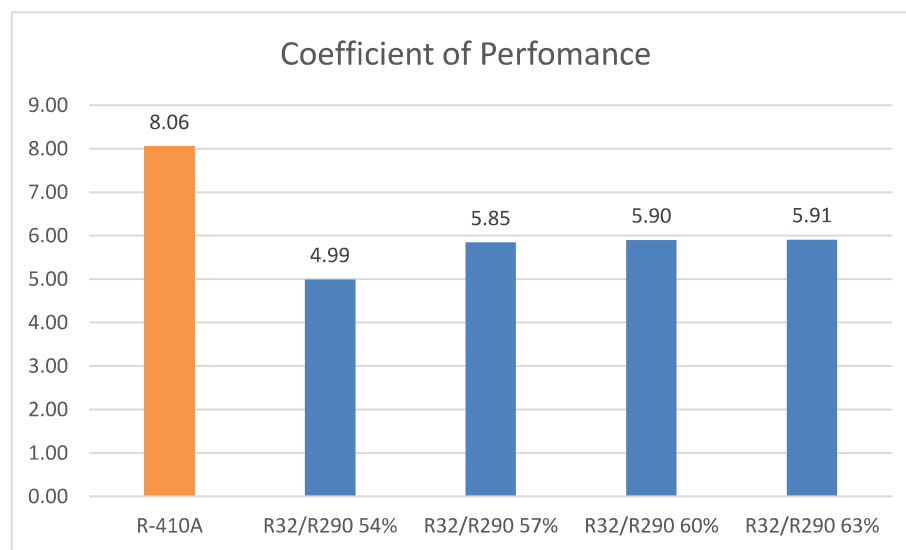
Pada variasi **54%**, *subcooling* turun drastis menjadi **3,0 °C**. Nilai yang rendah ini menandakan bahwa cairan bertekanan tinggi di kondensor hanya mengalami sedikit pendinginan setelah mencapai titik jenuhnya. Hal ini menunjukkan proses pelepasan panas kurang optimal, sehingga refrigeran cair yang masuk ke pipa kapiler lebih dekat dengan kondisi jenuh dan berpotensi menurunkan kestabilan proses ekspansi.

Pada variasi **57%**, nilai *subcooling* meningkat menjadi **6,5 °C**, lebih tinggi dibandingkan R-410A. Peningkatan ini menunjukkan bahwa kondensor bekerja lebih efektif dalam mendinginkan refrigeran, sehingga cairan yang masuk ke pipa kapiler memiliki kondisi yang lebih stabil.

Selanjutnya, pada variasi **60%** dan **63%**, nilai *subcooling* terus meningkat masing-masing menjadi **7,0 °C** dan **7,3 °C**. Nilai yang lebih tinggi ini menunjukkan pendinginan cairan di kondensor berlangsung lebih maksimal, sehingga kemungkinan terbentuknya gelembung uap saat melewati pipa kapiler dapat diminimalkan. Kondisi ini bermanfaat untuk menjaga proses ekspansi tetap konsisten dan mendukung kestabilan efek refrigerasi.

Secara keseluruhan, variasi 54% menunjukkan kelemahan karena nilai *subcooling* terlalu rendah, sedangkan variasi 57% hingga 63% memberikan kinerja yang lebih baik dengan pendinginan cairan bertekanan tinggi yang lebih efektif. Nilai *subcooling* yang tinggi membantu menjaga keandalan sistem, meskipun jika terlalu berlebihan juga dapat meningkatkan beban kerja kondensor. Oleh karena itu, variasi **60% dan 63%** dapat dianggap lebih unggul dari sisi kestabilan *subcooling*.

4.9.7 Coefficient of Performance



Gambar 4. 25 Perbandingan COP

Gambar 4.25 menunjukkan perbandingan nilai *Coefficient of Performance* (*COP*) antara R-410A dan campuran R-32/R-290. Nilai *COP* diperoleh dari hasil pembagian kapasitas refrigerasi dengan daya kompresor, sehingga parameter ini menjadi indikator utama efisiensi sistem pendingin.

Pada refrigeran **R-410A**, nilai *COP* tercatat paling tinggi yaitu **8,06**. Nilai ini menunjukkan bahwa R-410A mampu menghasilkan pendinginan yang lebih besar dengan konsumsi energi listrik yang relatif lebih kecil. Kondisi ini didukung oleh kapasitas refrigerasi yang tinggi (**4400 W**) serta daya kompresor yang rendah (**548,83 W**), sehingga sistem lebih efisien dalam menghasilkan efek refrigerasi.

Pada campuran **R-32/R-290 54%**, *COP* turun signifikan menjadi **4,99**. Penurunan ini dipengaruhi oleh kapasitas refrigerasi yang rendah (**2940 W**) sementara daya kompresor meningkat (**592,11 W**). Kondisi ini menyebabkan efisiensi sistem menurun drastis karena energi listrik yang dikonsumsi kompresor tidak sebanding dengan kapasitas pendinginan yang dihasilkan.

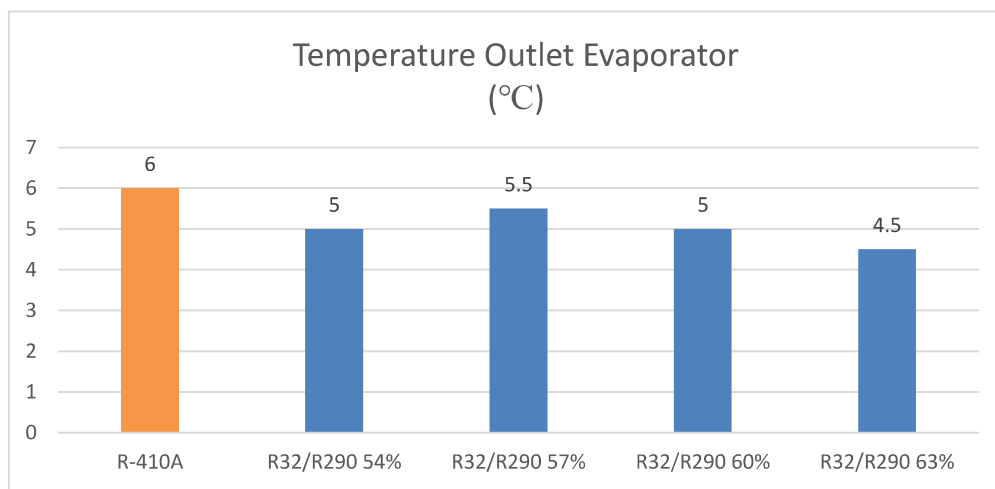
Pada variasi **57%** dan **60%**, nilai *COP* meningkat menjadi **5,85** dan **5,90**. Kenaikan ini dipengaruhi oleh bertambahnya kapasitas refrigerasi (**3420 W**) dengan daya kompresor yang relatif lebih rendah dibandingkan variasi 54% (sekitar **582–588 W**). Meskipun demikian, nilai *COP* ini masih jauh lebih rendah dibandingkan R-410A, menandakan efisiensi sistem belum mampu menyamai refrigeran standar.

Sedangkan pada variasi **63%**, nilai *COP* sedikit lebih tinggi yaitu **5,91**, didukung oleh kapasitas refrigerasi yang meningkat (**3600 W**), meskipun daya kompresor juga naik menjadi **599,31 W**. Kondisi ini menunjukkan adanya keseimbangan yang lebih baik dibandingkan variasi campuran lainnya, walaupun

tetap belum melampaui efisiensi R-410A.

Secara keseluruhan, hasil ini memperlihatkan bahwa seluruh variasi campuran R-32/R-290 memiliki COP yang lebih rendah dibandingkan R-410A. Penurunan COP ini terutama dipengaruhi oleh meningkatnya daya kompresor akibat rasio kompresi yang lebih besar, serta kapasitas refrigerasi yang tidak mampu menutupi konsumsi energi. Dari sisi efisiensi energi, **R-410A masih unggul**, sedangkan variasi **60% dan 63%** merupakan campuran yang paling mendekati kinerja R-410A.

4.9.8 Perbandingan Temperatur *Outlet Evaporator*



Gambar 4. 26 Perbandingan Temperatur Outlet Evaporator

Gambar 4.26 menunjukkan bahwa R-410A menghasilkan temperatur outlet evaporator 6°C pada tekanan evaporasi 154,7 psia sebagai baseline pengujian. Sementara itu, seluruh variasi massa campuran R32/R290 menghasilkan temperatur yang lebih rendah. Massa 54% dan 60% menghasilkan temperatur 5°C, massa 57% menghasilkan 5,5°C, dan massa 63% menghasilkan temperatur terendah yaitu 4,5°C.

Campuran R32/R290 massa 54% terukur pada temperatur 5°C, turun 1°C dari R-410A meski tekanan evaporasinya lebih tinggi yaitu 179,7 psia. Penurunan ini terjadi karena kehadiran R290 sebesar 32% dalam campuran memberikan kontribusi kalor laten penguapan yang tinggi (425 kJ/kg), sehingga efek pendinginan menjadi lebih baik.

Ketika massa dinaikkan ke 57%, temperatur outlet naik ke 5,5°C dengan tekanan evaporasi 194,7 psia. Penambahan massa refrigeran dari 184 gram menjadi 193,8 gram membuat volume refrigeran dalam sistem bertambah. Akibatnya, kompresor harus memompa lebih banyak refrigeran per siklusnya. Karena katup ekspansi tidak berubah ukurannya, refrigeran yang lebih banyak ini dipaksa melewati lubang yang sama, sehingga laju alirannya meningkat dan waktu kontak dengan pipa evaporator berkurang.

Variasi massa 60% memberikan hasil menarik dimana temperatur kembali turun ke 5°C walau tekanan evaporasinya mencapai 199,7 psia. Pada kondisi ini, penambahan massa hingga 204 gram menciptakan keseimbangan antara laju aliran dan distribusi refrigeran. Volume refrigeran yang lebih besar mengisi seluruh bagian evaporator secara merata, sehingga area kontak untuk perpindahan panas menjadi optimal.

Massa 63% menghasilkan temperatur outlet paling rendah yaitu 4,5°C dengan tekanan evaporasi tetap di 199,7 psia. Pada massa 214,2 gram ini, jumlah refrigeran cair yang masuk evaporator lebih banyak dibanding variasi lainnya. Refrigeran yang lebih banyak ini membuat proses penguapan berlangsung lebih lambat dan menyeluruh. Ditambah lagi, dengan massa yang lebih besar, bagian cair refrigeran memiliki waktu lebih lama untuk menyerap panas sebelum berubah

menjadi uap, sehingga temperatur keluar evaporator menjadi lebih rendah.

Penurunan temperatur yang konsisten pada campuran R32/R290 dibanding R-410A terjadi karena kombinasi sifat kedua komponennya. R32 memberikan tekanan operasi yang tinggi sementara R290 menyumbang kalor laten penguapan yang besar. Kombinasi ini membuat campuran mampu menyerap lebih banyak panas pada setiap kilogram refrigeran yang bersirkulasi. Pada massa pengisian yang lebih tinggi, efek ini semakin terlihat karena ada lebih banyak refrigeran yang tersedia untuk proses penguapan di evaporator.

Dalam penggunaan *AC Split* rumah tangga, temperatur outlet $4,5^{\circ}\text{C}$ pada massa 63% perlu diperhatikan lebih lanjut. Temperatur serendah ini dapat menyebabkan *frosting* atau pembekuan pada pipa evaporator. Ketika pipa evaporator membeku, es yang terbentuk akan menghalangi aliran udara dan menghambat proses penyerapan panas. Kondisi ini justru membuat AC bekerja lebih berat namun pendinginan ruangan menjadi tidak efektif.

Dari semua variasi yang diuji, massa 54% dan 60% dengan temperatur outlet evaporator 5°C paling cocok untuk aplikasi praktis. Cukup dingin untuk memberikan kenyamanan tapi tidak terlalu rendah sampai menimbulkan masalah *frosting*. Hasil ini sesuai dengan tujuan penelitian untuk menemukan komposisi campuran R32/R290 yang optimal sebagai pengganti R-410A pada *AC split* rumah tangga.

4.10 Analisis Performa Refrigeran Menggunakan Metode *TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)*

Metode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) merupakan metode pengambilan keputusan multikriteria yang

dikembangkan oleh Hwang & Yoon (Hwang & Yoon, 1981). Metode ini bekerja berdasarkan konsep bahwa alternatif terbaik harus memiliki jarak terpendek dari solusi ideal positif dan jarak terjauh dari solusi ideal negatif.

4.10.1 Data dan Kriteria Evaluasi

Tabel 4. 2 Data Eksperimental Lima Alternatif Refrigeran

Kriteria	Satuan	Jenis	R-410A	Campuran R32/R290 54%			
				54%	57%	60%	63%
Temperatur Evaporator	°C	Cost	6,0	5,0	5,5	5,0	4,5
Kapasitas Pendinginan	W	Benefit	4400	2940	3420	3420	3600
COP	-	Benefit	8,06	4,99	5,85	5,90	6,04
Daya Kompresor	W	Cost	548,83	592,11	587,93	582,44	599,31
Temperatur Kompresor	°C	Cost	51,1	75,7	58,4	59,9	59,0
Superheating	°C	Cost	4,57	13,37	11,48	9,55	4,55
Subcooling	°C	Benefit	5,94	3,00	6,45	6,99	7,35
Efek Refrigerasi	kJ/kg	Benefit	159,74	202,92	210,25	210,26	198,94
Kerja Kompresor	kJ/kg	Cost	19,83	40,65	35,97	35,61	32,93

4.10.2 Bobot Kriteria Evaluasi

Tabel 4. 3 Bobot Kriteria Evaluasi

No	Kriteria	Bobot (w)	Persentase	Jenis
1	Temperatur Evaporator	0,1923	19,23%	Cost
2	Kapasitas Pendinginan	0,1923	19,23%	Benefit
3	COP	0,1538	15,38%	Benefit
4	Daya Kompresor	0,1154	11,54%	Cost
5	Temperatur Kompresor	0,1154	11,54%	Cost

6	Superheating	0,0769	7,69%	Cost
7	Subcooling	0,0769	7,69%	Benefit
8	Efek Refrigerasi	0,0385	3,85%	Benefit
9	Kerja Kompresor	0,0385	3,85%	Cost

4.10.3 Tahap 1: Normalisasi Matriks Keputusan

Normalisasi dilakukan menggunakan rumus:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^5 x_{ij}^2} \quad (3.1)$$

Contoh perhitungan untuk kriteria Temperatur Evaporator:

- Data: 6,00; 5,15; 5,75; 4,85; 4,70
- $\sum x_{ij}^2 = 6,0^2 + 5,15^2 + 5,75^2 + 4,85^2 + 4,70^2 = 36 + 25 + 30,25 + 25 + 20,25 = 141,1975$
- $\sqrt{\sum x_{ij}^2} = \sqrt{141,1975} = 11,8827$
- Nilai ternormalisasi:
 - R-410A: $6,00/11,8827 = 0,5049$
 - R32/R290 54%: $5,15/11,8827 = 0,4334$
 - R32/R290 57%: $5,75/11,8827 = 0,4839$
 - R32/R290 60%: $4,85/11,8827 = 0,4082$
 - R32/R290 63%: $4,70/11,8827 = 0,3955$

Perhitungan dilakukan untuk semua kriteria. Hasil lengkap matriks ternormalisasi:

Tabel 4. 4 Matriks Ternormalisasi (R)

Kriteria	R-410A	R32/R290			
		54%	57%	60%	63%
Temperatur Evaporator	0,5049	0,4334	0,4839	0,4082	0,3955
Kapasitas Pendinginan	0,5482	0,3663	0,4273	0,4261	0,4485
COP	0,5763	0,3572	0,4181	0,4224	0,4324
Daya Kompresor	0,4213	0,4546	0,4513	0,4471	0,4601
Temperatur Kompresor	0,3725	0,5518	0,4257	0,4366	0,4301
Superheating	0,2171	0,6350	0,5452	0,4536	0,2161
Subcooling	0,4323	0,2182	0,4698	0,5091	0,5352
Efek Refrigerasi	0,3621	0,4599	0,4766	0,4766	0,4509
Kerja Kompresor	0,2644	0,5420	0,4796	0,4747	0,4257

4.10.4 Tahap 2: Pembobotan Matriks Ternormalisasi

Nilai ternormalisasi dikalikan dengan bobot masing-masing kriteria:

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij} \quad (3.2)$$

Keterangan:

- v_{ij} = nilai terbobot untuk alternatif ke-i pada kriteria ke-j
- w_j = bobot kriteria ke-j
- r_{ij} = nilai ternormalisasi untuk alternatif ke-i pada kriteria ke-j

Tabel 4. 5 Matriks Terbobot (V)

Kriteria	Bobot	R-410A	R32/R290			
			54%	57%	60%	63%
Temperatur Evaporator	0,1923	0,0971	0,0833	0,0931	0,0785	0,0761
Kapasitas Pendinginan	0,1923	0,1054	0,0704	0,0822	0,0819	0,0862
COP	0,1538	0,0886	0,0549	0,0643	0,0650	0,0665
Daya Kompresor	0,1154	0,0486	0,0525	0,0521	0,0516	0,0531

Temperatur Kompresor	0,1154	0,0430	0,0637	0,0491	0,0504	0,0496
Superheating	0,0769	0,0167	0,0488	0,0419	0,0349	0,0166
Subcooling	0,0769	0,0332	0,0168	0,0361	0,0392	0,0412
Efek Refrigerasi	0,0385	0,0139	0,0177	0,0183	0,0183	0,0174
Kerja Kompresor	0,0385	0,0102	0,0209	0,0185	0,0183	0,0164

4.10.5 Tahap 3: Penentuan Solusi Ideal

Solusi ideal positif (A^+) dan negatif (A^-) ditentukan berdasarkan jenis kriteria:

- Benefit: A^+ = nilai maksimum, A^- = nilai minimum
- Cost: A^+ = nilai minimum, A^- = nilai maksimum

Tabel 4. 6 Solusi Ideal Positif (A^+) dan Negatif (A^-)

Kriteria	Jenis	A^+	A^-
Temperatur Evaporator	Cost	0,0761	0,0971
Kapasitas Pendinginan	Benefit	0,1054	0,0704
COP	Benefit	0,0886	0,0549
Daya Kompresor	Cost	0,0486	0,0531
Temperatur Kompresor	Cost	0,0430	0,0637
Superheating	Cost	0,0166	0,0488
Subcooling	Benefit	0,0412	0,0168
Efek Refrigerasi	Benefit	0,0183	0,0139
Kerja Kompresor	Cost	0,0102	0,0209

4.10. 6 Tahap 4: Perhitungan Jarak Euclidean

Jarak Euclidean setiap alternatif ke solusi ideal positif (D^+) dan negatif (D^-)

dihitung dengan rumus:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^+)^2} \quad (3.4)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^-)^2} \quad (3.5)$$

➤ **Perhitungan Untuk R-410A:**

Untuk D^+ :

D^+

$$= \sqrt{(0,0971 - 0,0761)^2 + (0,1054 - 0,1054)^2 + (0,0886 - 0,0886)^2 + (0,0486 - 0,0486)^2 + (0,0430 - 0,0430)^2 + (0,0167 - 0,0166)^2 + (0,0332 - 0,0412)^2 + (0,0139 - 0,0183)^2 + (0,0102 - 0,0102)^2}$$

Hitung selisih kuadrat:

- $(0,0210)^2 = 0,00044100$
- $(0,0000)^2 = 0,00000000$
- $(0,0000)^2 = 0,00000000$
- $(0,0000)^2 = 0,00000000$
- $(0,0000)^2 = 0,00000000$
- $(0,0001)^2 = 0,00000001$
- $(-0,0080)^2 = 0,00006400$
- $(-0,0044)^2 = 0,00001936$
- $(0,0000)^2 = 0,00000000$

Jumlah = 0,00052437

$$D^+ = \sqrt{0,00052437} = 0,02290$$

Untuk D^- :

D^-

$$= \sqrt{\frac{(0,0971 - 0,0971)^2 + (0,1054 - 0,0704)^2 + (0,0886 - 0,0549)^2 + (0,0486 - 0,0531)^2 + (0,0430 - 0,0637)^2 + (0,0167 - 0,0488)^2 + (0,0332 - 0,0168)^2 + (0,0139 - 0,0139)^2 + (0,0102 - 0,0209)^2}{10}}$$

Hitung selisih kuadrat:

- $(0,0000)^2 = 0,00000000$
- $(0,0350)^2 = 0,00122500$
- $(0,0337)^2 = 0,00113569$
- $(-0,0045)^2 = 0,00002025$
- $(-0,0207)^2 = 0,00042849$
- $(-0,0321)^2 = 0,00103041$
- $(0,0164)^2 = 0,00026896$
- $(0,0000)^2 = 0,00000000$
- $(-0,0107)^2 = 0,00011449$

Jumlah = 0,00422329

$$D^- = \sqrt{0,00422329} = 0,06499$$

➤ **Perhitungan untuk R32/R290 54%:**

- **D⁺:** 0,06785
- **D⁻:** 0,01433

➤ **Perhitungan untuk R32/R290 57%:**

1. **D⁺:** 0,04693
2. **D⁻:** 0,03005

➤ **Perhitungan untuk R32/R290 60%:**

1. **D⁺:** 0,03979
2. **D⁻:** 0,03848

➤ **Perhitungan untuk R32/R290 63%:**

- D^+ : 0,03099
- D^- : 0,05185

Tabel 4. 7 Hasil Perhitungan Jarak Euclidean

Alternatif	D^+	D^-
R-410A	0,02290	0,06499
R32/R290 54%	0,06785	0,01433
R32/R290 57%	0,04693	0,03005
R32/R290 60%	0,03979	0,03848
R32/R290 63%	0,03099	0,05185

4.10.7 Tahap 5: Perhitungan Nilai Preferensi

Nilai Preferensi (C) dihitung dengan rumus:

$$C_i = \frac{D^-}{D^+ - D^-}$$

- **R-410A:**

$$C = \frac{0,06499}{0,02290 - 0,06499} = \frac{0,06499}{0,08789} = 0,7395$$

- **R-32/R-290 54%:**

$$C = \frac{0,01433}{0,06785 - 0,01433} = \frac{0,01433}{0,08218} = 0,1744$$

- **R-32/R-290 57%:**

$$C = \frac{0,03005}{0,04693 - 0,03005} = \frac{0,03005}{0,07698} = 0,3904$$

- **R-32/R290 60%:**

$$C = \frac{0,03848}{0,03979 - 0,03848} = \frac{0,03848}{0,07827} = 0,4918$$

- **R-32/R-290 63%:**

$$C = \frac{0,05185}{0,03099 - 0,05185} = \frac{0,05185}{0,08284} = 0,6259$$

Tabel 4. 8 Hasil Nilai Preferensi dan Peringkat

Peringkat	Alternatif	D⁺	D⁻	Nilai Preferensi (C)
1	R-410A	0,02290	0,06499	0,7395
2	R32/R290 63%	0,03099	0,05185	0,6259
3	R32/R290 60%	0,03979	0,03848	0,4918
4	R32/R290 57%	0,04693	0,03005	0,3904
5	R32/R290 54%	0,06785	0,01433	0,1744

4.10.8 Interpretasi Hasil

Berdasarkan analisis TOPSIS:

- **R-410A** memiliki nilai preferensi tertinggi (**0,7395**), menunjukkan kinerja terbaik dan paling mendekati solusi ideal.
- **R32/R290 63%** menempati peringkat kedua dengan nilai **0,6259**, merupakan campuran terbaik di antara alternatif pengganti.
- **R32/R290 60%** peringkat ketiga (**0,4918**).
- **R32/R290 57%** peringkat keempat (**0,3904**).
- **R32/R290 54%** peringkat terakhir (**0,1744**), kinerja paling jauh dari ideal.