

# Rancang Bangun dan Studi Eksperimen Alat Penukar Panas untuk Memanfaatkan Energi *Refrigerant* Keluar Kompresor AC sebagai Pemanas Air pada $ST/D=4$ dengan Variasi Volume Air

Binar Kusumah Bagja dan Djatmiko Ichani

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

*e-mail:* djatmiko@me.its.ac.id

**Abstrak**—Sistem referigerasi memiliki energi yang besar dalam melepaskan kalor. Kalor akibat kompresi pada kompresor bisa dimanfaatkan misalnya untuk pemanasan air. Pemanfaatan kalor tersebut dilakukan dengan cara menambahkan *water heater* sebelum aliran fluida referigeran masuk ke kondensor. *Water heater* tersebut dalam keadaan tercelup di dalam sebuah tangki berisi air untuk melepas kalor terhadap air. Perancangan *water heater* dilakukan dengan mencari panjang *tube* ( $L$ ), diameter *tube* ( $D$ ), dan jarak antar *tube*. *Water Heater* ini diletakkan setelah komponen kompresor pada sistem AC. Proses awal untuk mencari rancangan *water heater* adalah dengan mencari temperatur keluaran kompresor dimana untuk mencari potensi panas yang akan dimanfaatkan untuk memanaskan air. Setelah mencari potensi panas yang dihasilkan dari energi keluaran kompresor adalah mencari kapasitas kalor yang akan diberikan *water heater* terhadap air dan kemudian selanjutnya mencari perpindahan panas yang terjadi pada proses pemanasan air tersebut yang kemudian dilakukan perhitungan untuk mencari panjang *tube* ( $L$ ) dan penentuan jarak  $ST/D$  pada *tube*. Setelah diperoleh geometri *water heater*, langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi numerik dengan menggunakan perangkat lunak FLUENT 6.3.2 untuk mengetahui karakteristik perpindahan panas yang terjadi di dalam proses pemanasan air dengan jarak  $ST/D$  yang telah ditentukan sebelumnya. Langkah selanjutnya melakukan eksperimen. Eksperimen dilakukan dengan memvariasikan volume air dalam tangki yaitu sebesar 75 liter; 85 liter; dan 100 liter. Hasil simulasi numerik diperoleh bahwa pola aliran kecepatan dengan nilai tertinggi berada pada daerah sekitaran *tube inlet* dikarenakan temperatur yang paling tinggi dibandingkan *tube* lainnya sehingga menimbulkan perbedaan temperatur dan juga densitas pada sekitaran *tube inlet*. Hasil eksperimen diperoleh bahwa volume air yang besar yaitu sebesar 100 liter memiliki *Coefficient of Performance* (COP) tertinggi yaitu sebesar 4,590. Hasil eksperimen diperoleh bahwa volume air yang rendah yaitu sebesar 75 liter memiliki waktu pemanasan air paling cepat yaitu selama 180 menit.

**Kata Kunci**—*Water Heater*; Jarak *Tube*; Konveksi Alami; *Coefficient of Performance* (COP).

## I. PENDAHULUAN

Pemakaian air panas pada saat ini terbilang cukup banyak. Hal tersebut dapat dilihat dari semakin

berkembangnya teknologi pemanas air. Misalnya saja pemanas air dengan memanfaatkan energi surya atau matahari selain itu pemanas air dengan pemanfaatan energi listrik menjadi energi panas. Namun, jika dilihat dari segi efisiensi, kedua contoh teknologi pemanas tersebut masih kurang efisien. Misalkan saja, pemanas air dengan memanfaatkan energi listrik yang membutuhkan daya sangat besar sedangkan untuk pemanas air dengan pemanfaatan energi surya masih tergolong mahal dari segi biaya konstruksi. Maka dari itu, dibutuhkan suatu teknologi pemanas air yang lebih efisien dan lebih murah dari segi biaya juga konstruksi.

Pada sistem mesin pendingin terdapat energi panas yang terbuang cukup besar. Hal tersebut dapat dimanfaatkan menjadi pemanas air. Elemen pemanas air tersebut berupa *heat exchanger*. *Heat Exchanger* tersebut tidak membutuhkan suplai daya tambahan, tetapi hanya ditambahkan saja pada sistem mesin pendingin tersebut. *Heat Exchanger* tersebut secara skematis diletakkan diantara kompresor dan kondensor. *Heat Exchanger* tersebut dialiri oleh referigeran dalam kondisi *superheated* yang berasal dari keluaran kompresor sehingga dapat dimanfaatkan sebagai pemanas melalui panas yang dipancarkan dari pipa-pipa pada *heat exchanger*. *Heat Exchanger* tersebut dalam mekanismenya dicelupkan ke dalam bak yang berisikan air (sebagai fluida dingin). Air tersebut dibiarkan tidak mengalir atau disebut *unsteady flow*.

*Heat Exchanger* yang digunakan untuk pemanas air sebagai pemanfaatan energi panas yang tak terpakai dari mesin pendingin ini adalah dengan susunan secara vertikal. Karakteristik *heat exchanger* salah satunya dipengaruhi oleh adanya *gap ratio* yaitu perbandingan antara jarak *transverse tube* dengan diameter *tube*.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian ini dilakukan dengan tiga tahap yaitu tahap perancangan *water heater* dimana dilakukan perhitungan panjang *water heater* dengan analisa perpindahan panas, tahap simulasi numerik untuk mengetahui karakteristik perpindahan panas yang terjadi akibat pengaruh dari jarak  $ST/D$ , dan terakhir adalah tahap eksperimen untuk mengetahui performa dari *water heater* yang telah dirancang dan pengaruh terhadap sistem AC.

A. Tahap Perancangan

Tahap perancangan *water heater* ini dimulai dari dengan mencari potensi energi panas keluaran kompresor yang dapat dimanfaatkan untuk memanaskan air. Berikut adalah data yang diperoleh:

- Temperatur keluar kompresor = 90,2°C
- Tekanan *Discharge* = 233 psi

Langkah selanjutnya adalah menentukan kapasitas kalor yang akan diberikan *water heater* terhadap air. Pada perencanaan ini bahwa temperatur keluar dari *water heater* yang diharapkan adalah pada temperatur 50°C agar referigerant tetap dalam kondisi *superheated*. Berikut adalah perencanaanya:

$$Q_{water\ heater} = \dot{m}_{ref} \cdot (h_{out\ kompresor} - h_{out\ water\ heater}) \quad (1)$$

dimana:  
 $Q_{water\ heater}$  = kapasitas kalor *water heater* (W)  
 $\dot{m}_{ref}$  = laju alir massa refrigerant (kg/s)  
 $h_{out\ kompresor}$  = entalpi keluaran kompresor (kJ/kg)  
 $h_{out\ water\ heater}$  = entalpi keluaran *water heater* (kJ/kg)

Selanjutnya adalah menentukan waktu pemanasan air untuk mencapai temperatur 45°C dengan kapastias *water heater* yang telah ditentukan. Berikut adalah perhitungannya:

$$t = \frac{m \cdot C_p \cdot (\Delta T)}{Q} \quad (2)$$

dimana:  
 $t$  = waktu pemanasan air (s)  
 $m$  = jumlah air yang dipanaskan (kg)  
 $C_p$  = kalor jenis air (J/kg K)  
 $Q$  = kapasitas kalor *water heater* (J/s)  
 $\Delta T$  = selisih temperatur air yang ingin dicapai dan temperatur awal air (K)

Langkah berikutnya adalah menentukan panjang *water heater*. Analisa perpindahan panas yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1) *Perpindahan Panas Konveksi pada Aliran Internal Pipa*

Tahapan untuk mencari koefisien konveksi aliran internal pipa adalah sebagai berikut:

- Mencari Properties Referigerant  
 Properties referigerant diperoleh dengan dari temperatur film yaitu temperatur masuk dan temperatur keluar, dimana temperatur masuk adalah 90°C dan temperatur keluar adalah 50°C sehingga temperatur film *tube* adalah 70°C.

TABEL 1. PROPERTIES REFERIGERANT

Temp (°C)	Pressure (psia)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Enthalpy (kJ/kg)	Entropi (kJ/kg-K)	Therm Conductivity (W/m-K)	Viscosity (Pa-s)	Kin. Viscosity (cm <sup>2</sup> /s)	Therm. Diff (cm <sup>2</sup> /s)	Prandtl
1	70	247.7	62.703	441.13	1.7661	0.014458	0.0000148	0.0023661	0.91657

- Menghitung Bilangan Reynolds

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (3)$$

dimana:  $Re$  = bilangan Reynolds  
 $\dot{m}_{ref}$  = laju alir massa refrigerant (kg/s)  
 $D$  = diameter pipa (meter)  
 $\mu$  = viskositas dinamik (Pa.s)

- Menghitung Bilangan Nusselt

Setelah diperoleh bilangan Reynolds > 2300 maka aliran pada internal pipa adalah turbulen. Maka persamaan yang digunakan untuk mencari bilangan Nusselt adalah

$$Nu = 0,0265 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{0,3} \quad (4)$$

Dimana  $Pr$  adalah bilangan Prandtl

- Mencari Koefisien Konveksi Aliran Internal Pipa  

$$h_i = \frac{Nu \cdot k}{D} \quad (5)$$

Dimana  $k$  adalah konduktivitas thermal dari refrigerant R-22

2) *Perpindahan Panas Konveksi Alami*

Tahapan untuk mencari koefisien konveksi alami adalah sebagai berikut:

- Mencari Properties Air

Properties air diperoleh dengan dari temperatur rata-rata antara temperatur film *tube* dengan temperatur awal air sebelum dipanaskan, dimana temperatur film *tube* adalah 70°C dan temperatur awal air adalah 30°C sehingga temperatur rata rata adalah 50°C

TABEL 2. PROPERTIES AIR

Temp (°C)	Pressure (psia)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Enthalpy (kJ/kg)	Entropi (kJ/kg-K)	Therm Conductivity (W/m-K)	Viscosity (Pa-s)	Kin. Viscosity (cm <sup>2</sup> /s)	Therm. Diff (cm <sup>2</sup> /s)	Prandtl	
1	50	247.7	988.73	210.8	0.7032	0.64434	0.00054684	0.005307	0.0015599	3.545

- Menghitung Bilangan Rayleigh

$$Ra = \frac{g \beta (T_{\infty} - T_{air}) D^3}{\nu \alpha} \quad (6)$$

dimana:  $g$  = gaya gravitasi bumi (9,8 m<sup>2</sup>/s)  
 $\beta$  = expansion coefficiency (1/K)  
 $T_{\infty}$  = Temperatur masuk pada pipa (K)  
 $\nu$  = viskositas kinematic (m<sup>2</sup>/s)  
 $\alpha$  = thermal difussity (m<sup>2</sup>/s)

- Menghitung Bilangan Nusselt

$$Nu = C \cdot Ra^n$$

- Mencari Konveksi Alami

$$h_o = \frac{Nu \cdot k}{D} \quad (7)$$

3) *Menghitung Overall Perpindahan Panas*

*Overall* Perpindahan Panas adalah perhitungan secara keseluruhan proses perpindahan panas yang terjadi pada suatu kondisi tertentu. Berikut adalah *Overall* Perpindahan Panas yang terjadi pada pemanas air ini:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}} \quad (8)$$

4) *Menghitung Luas Pipa*

$$A = \frac{\ln \frac{T_{hi+5} - T_{air\ akhir}}{T_{hi+5} - T_{air\ awal}}}{U \cdot t} \cdot \frac{1}{2m \cdot C_p \text{ air}} \quad (9)$$

Dimana:  $T_{hi}$  = Temperatur Masukan *Water Heater* (°C)

$U$  = *Overall* Perpindahan Panas ( $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ )

$t$  = Waktu pemanasan air (s)

$m$  = Massa air dalam bak (kg)

5) *Menghitung Panjang Pipa*

$$L = \frac{A}{\pi D} \quad (10)$$

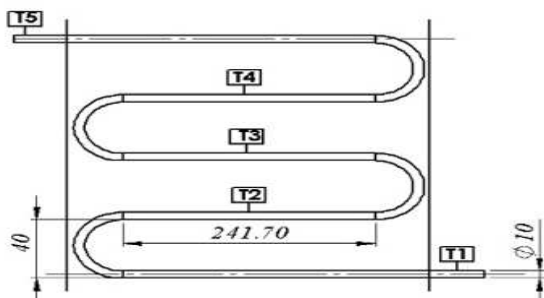
Berikut adalah hasil perhitungan untuk mencari panjang tube secara lengkap yang disajikan dalam bentuk tabel:

TABEL 3. HASIL PERHITUNGAN

No.	Perhitungan	Keterangan
1.	Kapasitas Kalor <i>Water Heater</i>	435, 5 Watt
2.	Waktu Pemanasan	4 Jam
3.	Bilangan Reynolds	117475,4171
4.	Bilangan Nusselt (untuk internal)	293,61
5.	Koefisien Konveksi Aliran Internal	443,88 $\frac{W}{m^2 \cdot K}$
6.	Bilangan Rayleigh	1,79 x 10 <sup>6</sup>

7.	Bilangan Nusselt (konveksi alami)	17,56
8.	Koefisien Konveksi Alami	$1187,6 \frac{W}{m^2.K}$
9.	Overall Heat Transfer	$323,11 \frac{W}{m^2.K}$
10.	Luas Pipa	0,0417 m <sup>2</sup>
11.	Panjang Pipa	1,58 meter

Setelah diperoleh panjang pipa, maka langkah selanjutnya adalah menentukan geometri *water heater*.



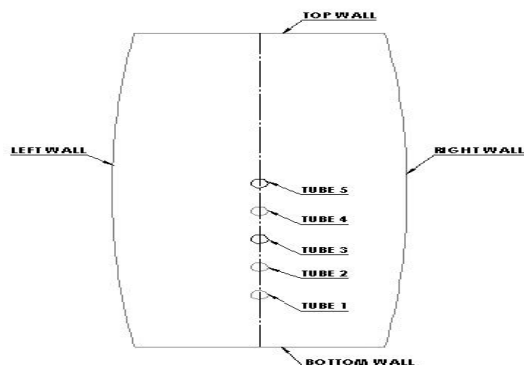
Gambar 1. Geometri *Water Heater*

Pada geometri tersebut telah ditentukan jarak ST/D, yaitu perbandingan antara jarak *transverse* pipa dengan diameter pipa yaitu 4 cm. Kemudian langkah selanjutnya adalah menentukan panjang per luan yaitu 24,17 cm dimana jumlahnya ada 5 agar panjang keseluruhan pipa sesuai dengan perhitungan sebelumnya.

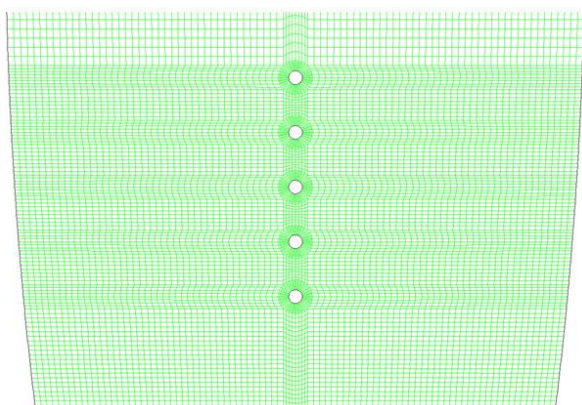
B. Tahap Simulasi

Simulasi dilakukan secara 2 dimensi, dimana penggambaran ditinjau dari tampak samping tube.

1) Pre-Processing



Gambar 2. Dimensi Tangki Air dan *Boundary Condition*



Gambar 3. *Meshing Tube Water Heater* dalam Tangki Air

Pada *pre-processing* ini diawali dengan membuat geometri dan langkah selanjutnya adalah membuat *meshing*. *Meshing* dilakukan dalam bentuk *Quad-Map*.

Langkah selanjutnya adalah menentukan *boundary condition* dimana untuk *tube* dikondisikan sebagai *wall* dengan input temperatur yang telah ditentukan sesuai

dengan perhitungan. Sedangkan untuk dinding tangki dinding dikondisikan sebagai *wall* dinding adiabatik.

TABEL 4. BOUNDARY CONDITION

No.	Boundary Condition	Keterangan
1.	Tube 1	Tipe : <i>Stationary Wall</i> Temperatur : 363 K
2.	Tube 2	Tipe : <i>Stationary Wall</i> Temperatur : 345,24 K
3.	Tube 3	Tipe : <i>Stationary Wall</i> Temperatur : 338 K
4.	Tube 4	Tipe : <i>Stationary Wall</i> Temperatur : 352,85 K
5.	Tube 5	Tipe : <i>Stationary Wall</i> Temperatur : 323 K
6.	Left Wall, Right Wall, Bottom Wall, Top Wall	Dinding Adiabatik

2) Processing

Tahapan pemodelan yang dilakukan dalam proses ini antara lain adalah mengatur solver model, viscous model, materials, boundary conditions, serta initialize conditions. Setelah seluruh pemodelan ditentukan, dilakukan proses iterasi untuk menyelesaikan proses simulasi.

TABEL 4. PROPERTIES MATERIAL AIR

No.	Boundary Condition	Keterangan
1.	Density (kg/m <sup>3</sup> )	998,2
2.	Specific Heat (J/kg.K)	4182
3.	Thermal Conductivity (W/m.K)	0,6

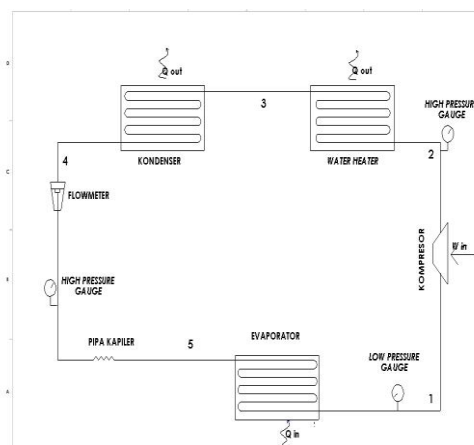
TABEL 5. PROPERTIES TEMBAGA

No.	Boundary Condition	Keterangan
1.	Density (kg/m <sup>3</sup> )	8978
2.	Specific Heat (J/kg.K)	381
3.	Thermal Conductivity (W/m.K)	387,6

TABEL 6. PROPERTIES FIBER GLASS

No.	Boundary Condition	Keterangan
1.	Density (kg/m <sup>3</sup> )	32
2.	Specific Heat (J/kg.K)	835
3.	Thermal Conductivity (W/m.K)	0,038

C. Tahap Eksperimen



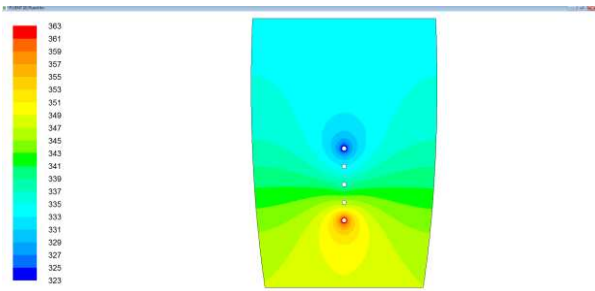
Gambar 4. Skema dan Titik Pengukuran Sistem AC dengan Penambahan *Water Heater*

Posisi *Water Heater* pada sistem AC diletakkan setelah kompresor. *Water Heater* dicelupkan ke dalam sebuah tangki penampung air. Volume air di dalam tangki pada eksperimen ini divariasikan sebanyak 75 liter; 85 liter; dan 100 liter. Sebelum eksperimen, dilakukan terlebih dahulu pengecekan kebocoran pada sistem AC dengan melihat apakah terjadi perubahan tekanan pada

pressure gauge setelah sebelumnya dilakukan proses vakum. Jika tidak terjadi kebocoran langkah selanjutnya adalah memasukkan refrigerant pada suction.

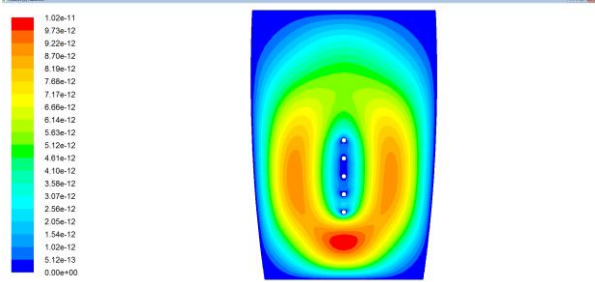
Tekanan pada suction diatur sebesar 66 psia dengan cara mengurangi atau menambahkan refrigerant ke dalam sistem AC. Laju alir massa diukur menggunakan flowmeter sedangkan untuk temperatur diukur menggunakan thermocouple yang terhubung dengan data akuisisi. Pengukuran tekanan dilakukan pada suction, discharge, dan setelah keluaran kondensor. Sedangkan untuk pengukuran temperatur dilakukan pada masuk evaporator, masukkan kompresor, masukkan water heater, masukkan kondensor, masukkan pipa kapiler dan pada tangki penampung air. Pengujian dilakukan selama 15 menit sekali.

III. HASIL DAN ANALISA

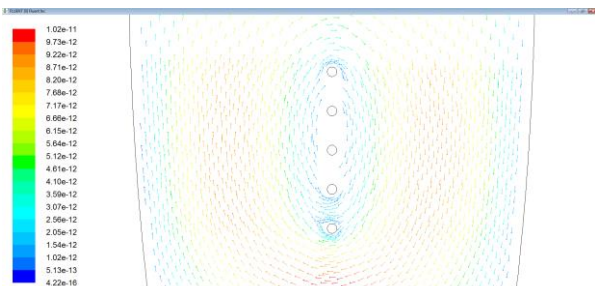


Gambar 5. Kontur Distribusi Temperatur (dalam Kelvin)

Hasil simulasi untuk distribusi temperatur menunjukkan bahwa temperatur tertinggi berada pada sekitaran daerah tube inlet dimana temperatur air memiliki nilai yang paling besar dibandingkan dengan temperatur air pada daerah sekitaran tube lainnya. Temperatur air juga dapat terlihat pada sekitar daerah tube 2 sampai 4 terpengaruh dari temperatur air dari sekitaran tube inlet sehingga pada daerah tersebut temperatur air memiliki temperatur yang lebih tinggi dari tube 2 sampai 4.



Gambar 6. Kontur Distribusi Kecepatan (dalam m/s)

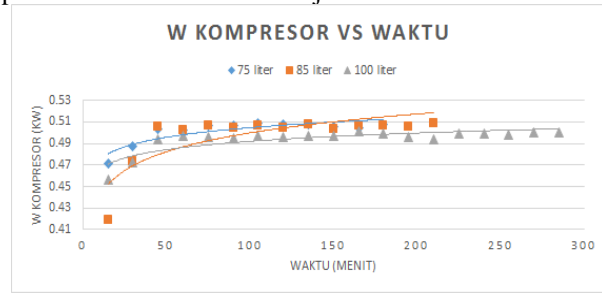


Gambar 7. Vektor Kecepatan (dalam m/s)

Hasil simulasi untuk distribusi kecepatan adalah bahwa terlihat pola aliran tercepat terletak pada daerah sekitaran tube inlet. Hal tersebut dikarenakan temperatur tertinggi adalah pada tube inlet sehingga menimbulkan

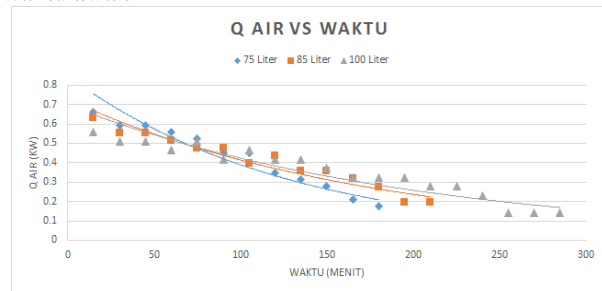
perbedaan temperatur yang tinggi dan perbedaan densitas yang tinggi juga

Untuk bentuk aliran, pola aliran pada proses pemanasan air ini hanya berputar-putar mengelilingi pada daerah sekitaran tube saja.



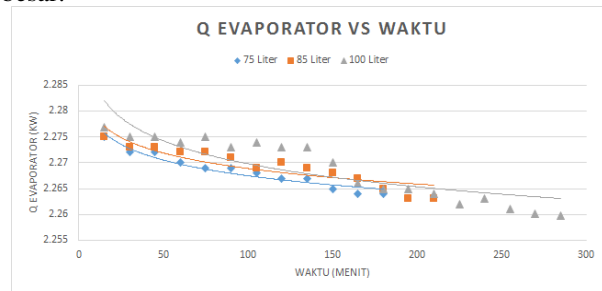
Gambar 8. Grafik Kerja Kompresor terhadap Waktu

Grafik diatas menunjukkan bahwa trendline kerja kompresor cenderung meningkat. Hal tersebut dikarenakan temperatur air mulai meningkat seiring bertambahnya waktu. Pada grafik diatas menunjukkan bahwa eksperimen pada volume 100 liter menunjukkan kerja kompresor paling rendah. Hal tersebut dikarenakan air pada volume tersebut belum sepenuhnya terpanaskan, sehingga air tersebut bersifat sebagai pendinginan pada waktu awal.



Gambar 9. Grafik Kalor yang Diserap oleh Air terhadap Waktu

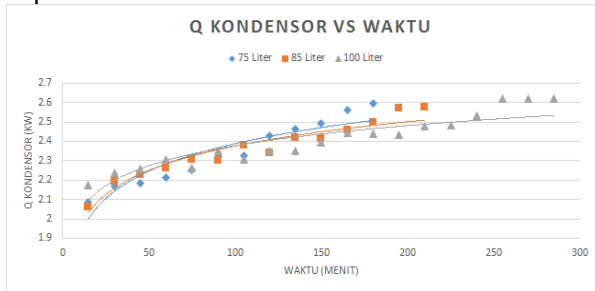
Pada grafik diatas menunjukkan bahwa trendline laju kalor yang diserap oleh air terhadap waktu cenderung menurun. Hal tersebut dikarenakan temperatur air yang meningkat sehingga menimbulkan perbedaan dengan temperatur water heater yang semakin rendah juga. Pada grafik diatas menunjukkan bahwa secara keseluruhan laju kalor yang diserap oleh air yang terbesar adalah pada eksperimen volume air 100 liter. Hal tersebut dapat dilihat dari dasar teori bahwa semakin besar volume air maka laju kalor yang diserap oleh air juga akan semakin besar.



Gambar 10. Grafik Kapasitas Refrigerasi terhadap Waktu

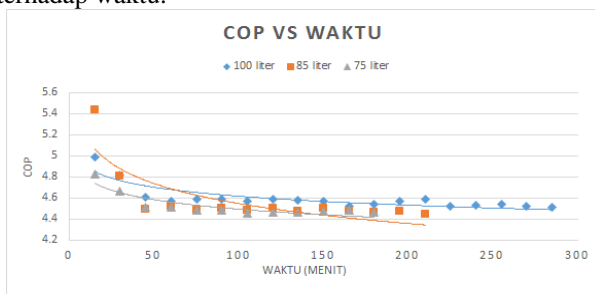
Pada grafik diatas menunjukkan bahwa trendline laju kalor yang diserap oleh air terhadap waktu cenderung menurun. Hal tersebut dikarenakan temperatur keluaran kondensor yang semakin meningkat sehingga saat terjadi penurunan tekanan pada katup ekspansi, refrigeran berada pada posisi semakin menjauhi dari titik jenuh cair sehingga kapasitas evaporator akan semakin rendah dimana perbedaan entalpi yang semakin kecil antara

entalpi masukan evaporator dan entalpi keluaran evaporator.



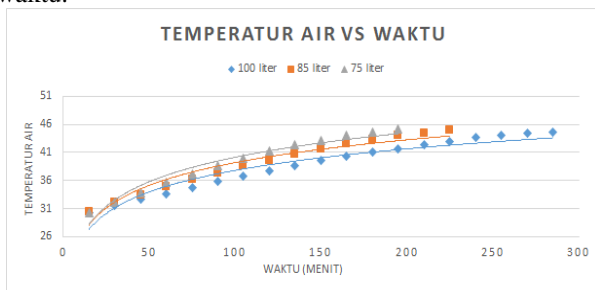
Gambar 11. Grafik Laju Kalor yang Dilepas oleh Kondensator terhadap Waktu

Pada grafik diatas menunjukkan bahwa trendline laju kalor yang diserap oleh air terhadap waktu cenderung meningkat. Hal tersebut dikarenakan temperatur keluaran dari *water heater* yang meningkat seiring meningkatnya juga temperatur air terhadap waktu sehingga perbedaan entalpi antara keluaran kondensator dan masukan kondensator semakin tinggi dan hal tersebut menyebabkan laju kalor yang dilepas oleh kondensator semakin besar terhadap waktu.



Gambar 12. Grafik COP terhadap Waktu

Pada grafik diatas menunjukkan bahwa trendline laju kalor yang diserap oleh air terhadap waktu cenderung menurun. Hal tersebut dikarenakan kerja kompresor yang terus meningkat dimana bahwa Coefficient of Performance diperoleh dari rasio antara kapasitas refrigerasi dengan kerja kompresor, sedangkan kapasitas refrigerasi juga terjadi penurunan seiring bertambahnya waktu.



Gambar 13. Temperatur Air terhadap Waktu

Pada grafik diatas menunjukkan bahwa trendline temperatur air terhadap waktu cenderung meningkat. Pada sekitar temperatur 30°C – 40°C kenaikan temperatur air cukup signifikan, sedangkan saat temperatur diatas 40°C kenaikan temperatur mulai melambat. Hal tersebut dikarenakan laju kalor yang dilepaskan oleh *water heater* terhadap air semakin kecil seiring bertambahnya waktu.

#### IV. KESIMPULAN

Dari studi yang dilakukan serta pembahasan terhadap data yang didapatkan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari hasil studi numerik, pola kecepatan aliran tertinggi berada pada daerah yang memiliki perbedaan temperatur tinggi yaitu pada daerah sekitar *tube inlet*
2. Penambahan volume air mengakibatkan semakin lama proses peningkatan temperatur air dalam tangki. Proses pemanasan air mencapai 45°C pada eksperimen dengan volume air sebesar 75 liter selama 180 menit, pada eksperimen dengan volume air sebesar 85 liter selama 210 menit, dan pada eksperimen dengan volume air sebesar air selama 285 menit
3. Penambahan volume air mengakibatkan *Coefficient of Performance* (COP) rata-rata pada sistem AC semakin besar. COP rata-rata pada eksperimen dengan volume air 75 liter sebesar 4,524; COP rata-rata pada eksperimen dengan volume air 85 liter sebesar 4,575; dan COP rata-rata pada eksperimen dengan volume air 100 liter sebesar 4,590;

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Moran, M.J and Howard N. Shapiro. 2000. *Fundamental of Engineering Thermodynamics*. John Wiley & Sons Inc. Chicester.
- [2] Theodore.,S.Lavine, Adrienne. 2007. *Fundamental of Heat and Mass Transfer Seventh Edition*. Asia : John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd.