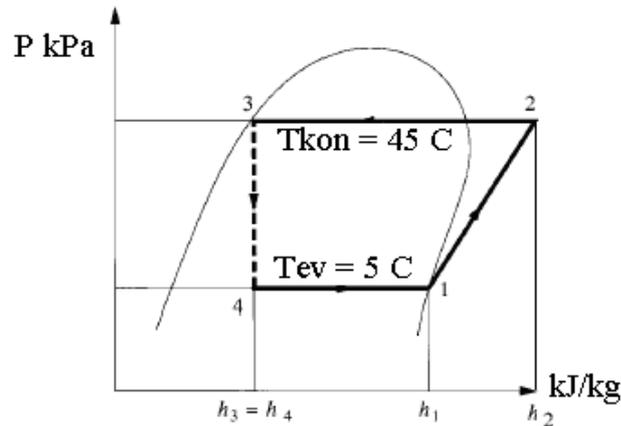


## BAB 5. HASIL DAN PEMBAHASAN

### Rancangan Bagian-Bagian Utama Mesin Refrigerasi

Penelitian dilakukan di Laboratorium Perawatan dan Perbaikan, Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Riau. Di Laboratorium Perawatan dan Perbaikan ini dilakukan pembuatan alat uji mesin refrigerasi kompresi uap hibrida yang menggunakan refrigeran hidrokarbon pengganti R-22 (HCR-22). Fasilitas yang terdapat di laboratorium ini cukup memadai untuk terlaksananya penelitian ini, sehingga penelitian dapat dilakukan.

Diagram P-h asumsi perancangan dapat dilihat pada gambar 5.1.



**Gambar 5.1.** Diagram P-h asumsi perancangan

Data termodinamik dan termofisik perancangan menggunakan tabel sifat-sifat termodinamika R-22 sebagai refrigeran, data perancangan hasil analisis termodinamika dapat dilihat pada tabel 5.1.

**Tabel 5.1.** Sifat-sifat termodinamik R-22

Sifat Termofisik	Titik 1 (uap jenuh)	Titik 2 (uap panas lanjut)	Titik 2' (uap jenuh)	Titik 3 (cair jenuh)	Titik 4 (x= 0,252)
Tekanan, kPa	583,78	1729	1729	1729	583,78
Enthalpi, kJ/kg	406,64 5	433,596	416,56	256,415	256,415
Kalor jenis tekanan konstan, kJ/kg. K	0,747	-	1,064	1,3725	1,186
Massa jenis, kg/m <sup>3</sup>	24,82	117,564	75,61	1105,8	
Viskositas, Pa.s	12	-	13,52	128,8	-
Konduktivitas termal, W/m.K	0,0098 1		0,0122	0,0778	
Entropi, kJ/kg.K	1,7429	1,7429	1,69075	-	-

Pada mesin refrigerasi hibrida evaporator dan kondensor sama-sama dimanfaatkan. Dalam perancangan sistem pengujian digunakan asumsi-asumsi : sistem bekerja pada siklus kompresi uap standar, fluida kerja adalah refrigeran R-22

Sebagai data awal perancangan ditetapkan :

- Tekanan Evaporasi = 583,78 kPa [ $T_e = 5^{\circ}\text{C}$ ]
- Tekanan Kondensasi = 1729 kPa [ $T_k = 45^{\circ}\text{C}$ ]

### **Analisis Data Termodinamik dan Termofisik Perancangan**

Kapasitas refrigerasi rancangan diasumsikan  $Q_e = 7000 \text{ btu/h} = 2052 \text{ W} = 2,052 \text{ kW}$  (diambil dari spesifikasi AC Windows LG LWG 0760 ACG).

Proses termodinamika di dalam kompresor terjadi secara isentropik dari tingkat keadaan 1 ke tingkat keadaan 2,  $s_1 = s_2 = 1,74463 \text{ (kJ/kgK)}$ , maka untuk mencari  $h_2$  dan  $v_2$  dapat dicari dengan interpolasi.

Dari analisa tingkat keadaan termodinamika siklus kompresi uap pada gambar 5.1 diperoleh :

1. Kapasitas Refrigerasi ( $Q_e$ ) 150, 23 kJ/kg
2. Laju aliran massa refrigeran ( $m_{ref}$ ) =  $13,7 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$
3. Daya Kompresor ( $W_k$ ) = 0,7 HP  
Kompresor yang digunakan adalah jenis hermetik dengan daya 1 HP
4. Koefisien Prestasi ( $COP$ ) = 3,9
5. Laju aliran panas yang dibuang kondensor ( $Q_k$ ) = 2,58 kW

### **Perancangan Evaporator**

Evaporator adalah alat penukar kalor yang di dalamnya terjadi proses perpindahan panas fluida kerja yang berubah fasa dari cairan menjadi gas (refrigeran) ke fluida lain disekitarnya. Seperti halnya alat penukar kalor lainnya evaporator memiliki banyak jenis. Pada perancangan ini direncanakan digunakan adalah evaporator jenis tabung dan pipa (*Sheel and Tube*) dimana refrigeran mendidih di dalam pipa dan air sebagai fluida pendingin mengalir diluar pipa dan masih di dalam cangkang (Holman, 1991).

### **Perancangan Kondensor**

Bentuk kondensor direncanakan sama dengan bentuk evaporator yaitu jenis tabung dan pipa (*Sheel and Tube*) tetapi fenomenanya berbeda dengan evaporator karena refrigeran mengembun didalam pipa dan air sebagai fluida pendingin mengalir diluar pipa dan masih di dalam cangkang. Lualan pipa didalam tabung dibuat berselang seling yang tujuannya untuk meningkatkan koefisien perpindahan panas kondensor ini.(Holman, 1991)

### **Perhitungan Pipa Kapiler**

Alat penurun tekanan yang digunakan dalam perancangan ini adalah jenis pipa kapiler, yaitu pipa tembaga dengan diameter dalam yang sangat kecil hanya beberapa milimeter atau kecil dari satu milimeter. Ukuran diameter pipa kapiler yang dipilih dalam rancangan ini, adalah  $D_i = 1,7 \text{ mm} = 0,0017 \text{ m}$ , dengan temperatur kondensasi  $T_{kon} = 45^{\circ}\text{C}$  dan temperatur evaporasi  $T_{evap} = 5^{\circ}\text{C}$  (sesuai data rancangan). Analisis pipa kapiler dihitung dengan persamaan-persamaan tertentu dari literatur tentang refrigrasi. (Stoecker, 1994).

### Hasil Perancangan Mesin Refrigerasi Hibrida

Dari perancangan yang dilakukan diperoleh hasil sebagai berikut :

1. Kompresor, kompresor yang digunakan :
  - kompresor hermetik jenis rotari
  - daya kompresor sebesar 1 HP
2. Evaporator, menggunakan pipa tembaga ukuran diameter 3/8 in yang disusun sedemikian rupa dalam bentuk laluan dengan panjang satu laluan adalah 31 cm maka jumlah laluan seluruhnya adalah 66 laluan dan disusun dalam 11 tingkat dengan jumlah laluan pertingkat adalah 6. Data hasil perancangan evaporator :
  - Temperatur permukaan,  $T_s$  adalah  $9,17\text{ }^{\circ}\text{C}$
  - Luas total permukaan pipa,  $A_o$  adalah  $0,6175\text{ m}$
  - Panjang total pipa,  $L$  adalah  $20,69\text{ m}$
  - Koefisien konveksi rata-rata sisi evaporator  $h_o = 219,018\text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$
  - Koefisien perpindahan kalor total,  $U_o = 172,7496\text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$
3. Kondensor, menggunakan pipa tembaga ukuran diameter 3/8 in ini disusun sedemikian rupa dalam bentuk laluan dengan panjang satu laluan adalah 33 cm maka jumlah laluannya adalah 66 laluan dan disusun dalam 11 tingkat dengan jumlah laluan pertingkat adalah 6.  
Data hasil perancangan kondensor :
  - Temperatur permukaan,  $T_s$  adalah  $40,93\text{ }^{\circ}\text{C}$
  - Luas total permukaan pipa,  $A_o$  adalah  $0,6489\text{ m}$
  - Panjang total pipa,  $L$  adalah  $21,74\text{ m}$
  - Koefisien konveksi rata-rata sisi evaporator  $h_o = 315,738\text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$
  - Koefisien perpindahan kalor total,  $U_o = 236,469\text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$
4. Pipa kapiler, menggunakan pipa tembaga dengan diameter 1,7 mm, yang bekerja pada temperatur kondensasi  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan temperatur evaporasi  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  panjang pipa kapiler adalah 1,65 m

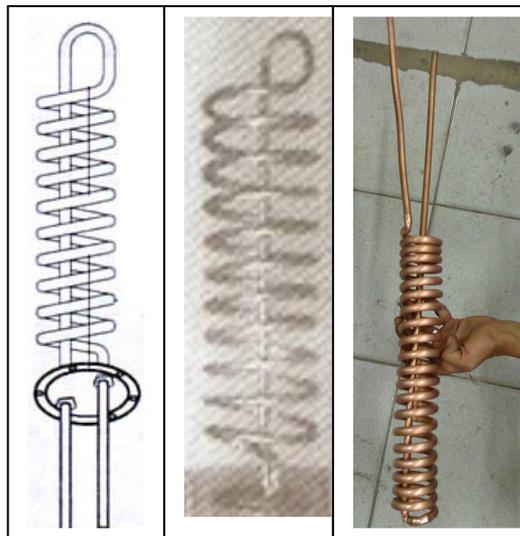
### Pemilihan Mesin Pendingin

Pada penelitian ini dilakukan pemilihan mesin pendingin dengan daya pendinginan  $\pm 25\%$  lebih besar dari rancangan. Hal ini dilakukan untuk mengantisipasi faktor pengotoran agar daya pendinginan rancangan tetap tercapai untuk penggunaan jangka panjang. Mempertimbangkan hal ini maka dipilih AC dengan daya 1 PK merek samsung tipe SAMSUNG AS09TSMN, daya Low Watt 670 WATT, kapasitas pendinginan 8.900 BTU/jam atau 2,6 kW.

### Rancangan Kondensor Dummy

Kondensor *dummy* adalah kondensor tambahan yang ditempatkan sebelum kondensor utama atau ditempatkan setelah aliran refrigeran keluar dari kompresor pada kondisi super panas tekanan dan temperatur tinggi. Ikhwan Nurhalim (2011) menggunakan pipa tembaga 1/4 in dengan panjang pipa 8 meter untuk Air Conditioning Water Heater (ACWH) yang ditempatkan dalam tangki air 50 L. Jeffri R G Siburian (2011) menggunakan pipa tembaga 3/8 in dengan panjang pipa 5 meter untuk ACWH untuk memanaskan air dalam tangki 120 L. Secara umum pada pemasangan AC panjang pipa maksimum yang diijinkan antara bagian indoor (evaporator) dan bagian outdoor (kondensor, kompresor dan pipa kapiler) adalah 15 meter dengan beda ketinggian maksimum 7,5 meter.

Rancangan kondensor *dummy* dengan asumsi temperatur pipa kondensor 47°C dan temperatur pipa evaporator 6 °C, dengan temperatur air masuk tangki kondensor *dummy* 27 °C dan temperatur keluar kondensor 32 °C, diperoleh pipa kondensor *dummy* sepanjang 6 meter. Kondensor *dummy* yang digunakan bertipe spiral agar dapat dipasang seluruhnya di dalam tangki dengan lebih mudah sehingga mudah dalam pemasangan dan perawatan nantinya. Sketsa kondensor *dummy* tipe spiral dapat dilihat pada gambar 5.2. Kondensor *dummy* saat ini dalam proses pembuatan, kendala yang dihadapi adalah rumitnya proses penekukan dan pembuatan lilitan spiral dari pipa tembaga. Perlu percobaan *trial and error* dalam pembuatan kondensor *dummy*, agar kondensor *dummy* dapat berfungsi dengan baik, tanpa adanya lipatan atau tekukan patah/tajam yang dapat mengakibatkan terjadinya kebocoran saat dialiri refrigeran.



**Gambar 5.2.** Kondensor *dummy* tipe spiral hasil rancangan  
(<http://pemanasairwikaswh.com/wp-content/uploads/2011/07/Manual-Book-WIKA-AWH.pdf>)

### Pemilihan Tangki Air Panas untuk Kondensor *Dummy*



**Gambar 5.3.** Tangki air panas yang dimodifikasi untuk kondensor *dummy*  
(<http://waterheater.indonesia123.biz/wp-content/uploads/2013/04/water-heater-PRO-R-50V.jpg>)

Mesin refrigerasi hibrida pada penelitian ini memanfaatkan panas buang kondensor *dummy* untuk menghasilkan air panas dalam tangki air panas. Pemilihan tangki air panas yang akan digunakan sangat bergantung kepada kapasitas mesin pendingin yang digunakan. Tangki air panas seperti yang ditunjukkan di gambar 5.3 dipilih untuk dimodifikasi (tangki air panas dari pemanas air elektrik merek Delizia kapasitas 50L), elemen pemanas elektriknya diganti kondensor dummy dan beberapa penyesuaian dan pengujian agar tidak terjadi kebocoran saat telah diisi dengan air.

### Rancangan Ruang Uji

Ruang uji adalah ruang yang digunakan untuk menguji mesin refrigerasi hibrida yang berfungsi sebagai ACWH. Ruang uji bisa dikondisikan sesuai dengan parameter pengujian yang dibutuhkan untuk menganalisis kinerja mesin refrigerasi hibrida yang dipasang dalam ruang uji. Dimensi ruang uji adalah panjang 2,26 m, lebar 1,75 m dan tinggi 2 m. Realisasi ruang uji hasil rancangan dapat dilihat pada gambar 5.4.



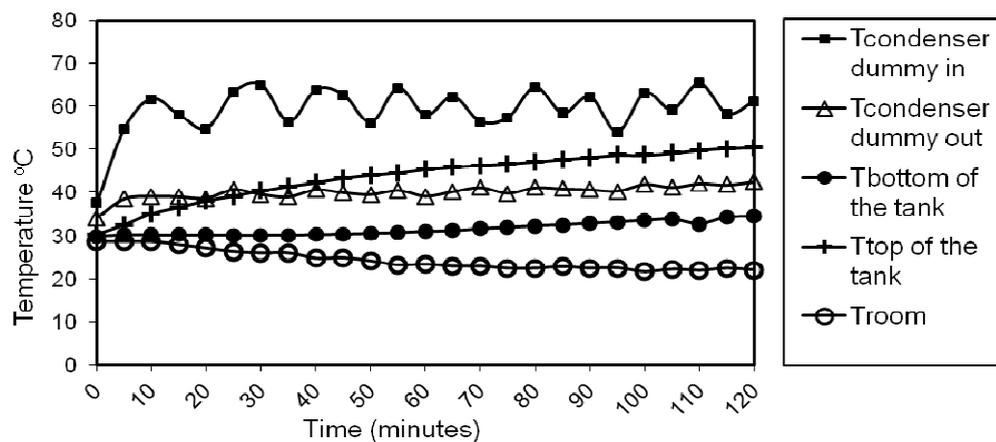
**Gambar 5.4.** Realisasi ruang uji mesin refrigerasi hibrida dari hasil rancangan

### Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini pengujian RAC dilakukan pada mode RAC hibrida dan pada mode RAC biasa atau standar. Pengujian dilakukan pada keadaan transien dan pada keadaan stedi, untuk melihat hubungan antara temperatur dan waktu pemanasan, serta pengaruhnya terhadap daya kompresor. Pengujian RAC dilakukan dalam 4 kondisi: kondisi 1 yaitu kondisi pemanasan air dari kondensor *dummy* kondisi awal dari 0 sampai 120 menit pada keadaan transien, kondisi 2 yaitu kondisi lanjutan menuju keadaan stedi 120 menit ke-2, kondisi 3 yaitu kondisi penggunaan air panas setelah keadaan stedi tercapai menuju kondisi stedi penggunaan air panas dan pengujian 120 menit ke-3. Kondisi 1, kondisi 2 dan kondisi 3 adalah mode RAC hibrida. Yang terakhir, kondisi 4 yaitu kondisi pada mode RAC standar atau biasa, merupakan pengujian ke-4 yang dilakukan selama 120 menit. Temperatur

lingkungan rata-rata pengujian kondisi 1 adalah 27,1 °C. Ruangan dijaga pada temperatur 22 °C, dengan mengatur bukaan pintu ruangan sebagai beban pendinginan.

Pada pengujian mode RAC hibrida keadaan transien, dproses pemanasan air dimulai dari nol (saat mesin mulai dihidupkan) sampai 120 menit (kondisi 1), energi dari kalor buang kondensor *dummy* diserap oleh air dalam tangki yang berada dalam kondisi penuh. Gambar 2 menunjukkan hubungan antara perubahan temperatur yang terjadi pada RAC hibrida terhadap waktu untuk memanaskan air di dalam tangki.



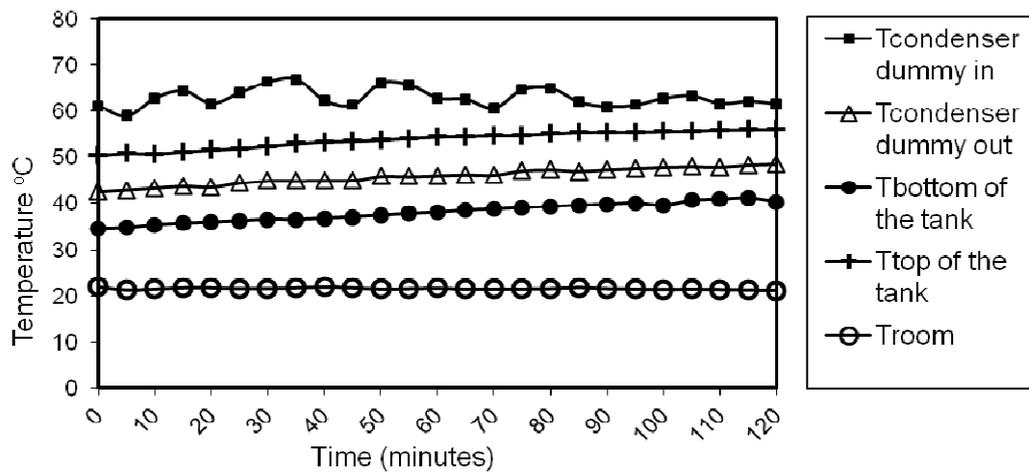
**Gambar 5.5.** Temperatur kondensor *dummy in* dan *out*, temperatur *bottom* dan *top of the tank* dan temperatur *room* pada mode RAC hibrida kondisi 1 keadaan transien

Perpindahan kalor antara kondensor *dummy* dengan air didalam tangki menyebabkan temperatur air naik dari 30,29 °C menjadi 50,42 °C, dimana temperatur *condenser dummy in* dan *out* cenderung berada pada variasi temperatur yang sama. Hal ini berarti kalor yang diterima oleh air cenderung konstan sehingga temperatur air akan terus naik sampai keadaan stedi tercapai.

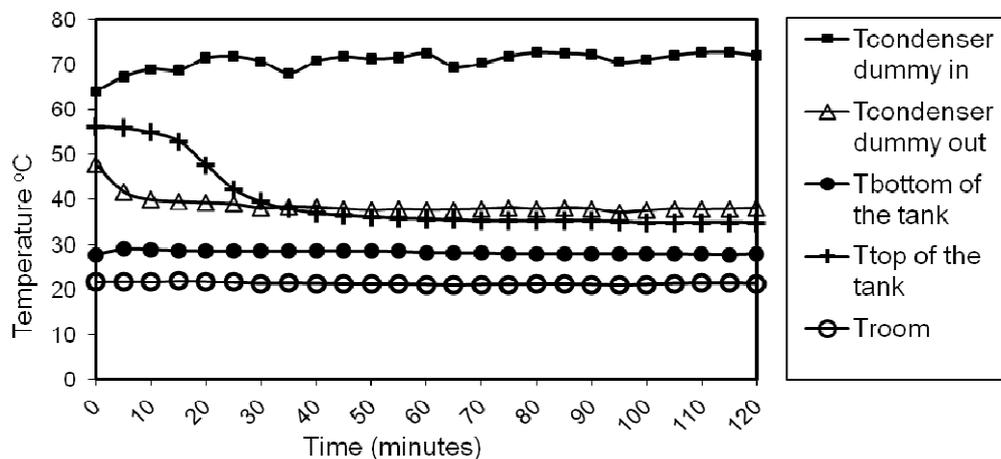
Temperatur air bagian bawah tangki naik dari 28,6 °C menjadi 34,54 °C, karena temperatur air pada bagian atas sudah cukup tinggi. Pada saat bersamaan ruangan (*room*) mengalami proses penyerapan kalor sehingga temperaturnya turun dan mencapai keadaan stedi setelah 75 menit, dengan temperatur ruangan 22 °C, seperti tampak pada Gambar 5.5.

Mode pengujian RAC hibrida kondisi 2, dilakukan pada keadaan temperatur air panas dalam tangki menuju stedi, dimana pemanasan air merupakan lanjutan dari kondisi 1 selama 120 menit seperti tampak pada Gambar 5.6. Pada kondisi 2, temperatur air bagian atas tangki tetap mengalami kenaikan dari 50,42 °C menjadi 56,11 °C, kenaikan temperatur tidak terlalu tinggi karena perbedaan temperatur antara kondensor *dummy* dan air cenderung turun, dan menuju keadaan stedi pada menit ke-105. Temperatur air bagian bawah tangki naik dari 34,54 °C menjadi 40,31

°C, hal ini karena aliran air panas dari bagian atas tangki mempengaruhi bagian bawah tangki. Temperatur bagian atas tangki tetap lebih panas dari temperatur bawah tangki karena masa jenis air turun seiring naiknya temperatur air, air panas akan lebih ringan dari air dingin, sehingga air panas akan mengumpul di bagian atas tangki. Pada saat bersamaan, temperatur ruangan pada kondisi 2 ini dapat dijaga cenderung tetap pada temperatur 22 °C seperti tampak pada Gambar 5.6.



**Gambar 5.6.** Temperatur kondensor *dummy in* dan *out*, temperatur *bottom* dan *top of the tank* dan temperatur *room* pada mode RAC hibrida menuju keadaan stedi (kondisi 2)

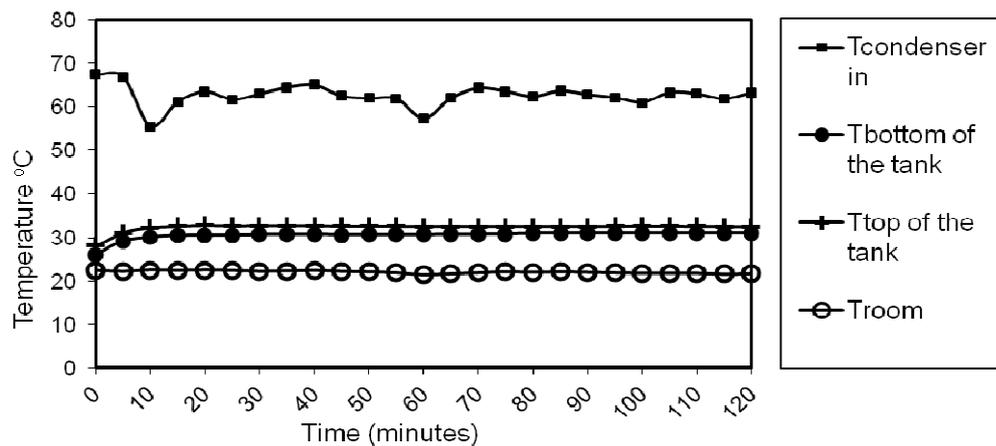


**Gambar 5.7.** Temperatur kondensor *dummy in* dan *out*, temperatur *bottom* dan *top of the tank* dan temperatur *room* pada mode RAC hibrida pada kondisi 3

Perubahan temperatur kondensor *dummy in* dan *out*, temperatur *bottom* dan *top of the tank* dan temperatur *room* pada mode RAC hibrida pada kondisi 3 selama 120 menit pengoperasian dapat dilihat pada Gambar 5.7. Pada kondisi 3, saat penggunaan air panas dalam tangki, air mengalir ke dalam tangki pada laju aliran massa air rata-rata

konstan pada 0,0403 kg/s, sehingga tangki air selalu penuh. Pada penggunaan air panas selama 120 menit, air pada bagian atas tangki mencapai keadaan stedi setelah pemakaian selama 60 menit sedangkan air bagian bawah tangki cenderung konstan pada 27,7 °C karena kalor dari kondensor *dummy* langsung digunakan untuk menaikkan temperatur aliran air pada rentang temperatur yang kecil. Beda temperatur bagian atas tangki dan bagian bawah tangki pada keadaan stedi adalah 7 °C dari temperatur 35 °C dan 28 °C.

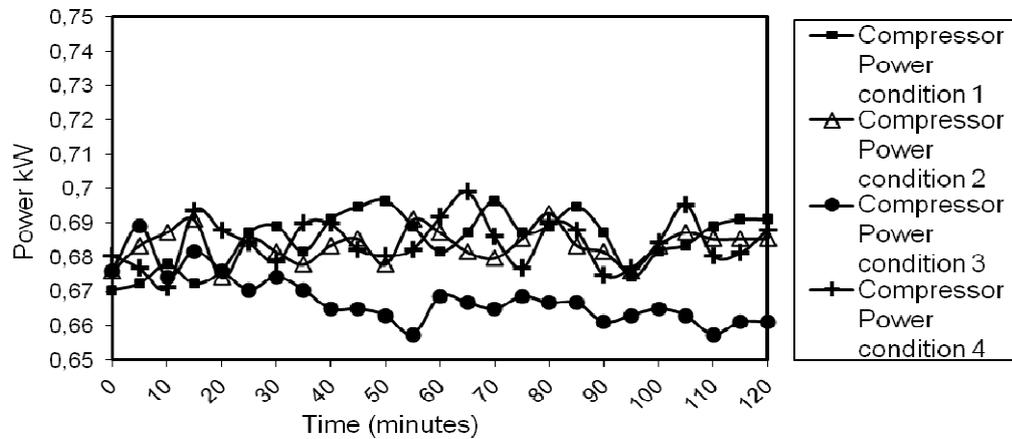
Pada mode pengujian RAC standar kondisi 4, pada mode ini RAC berfungsi tanpa pemanfaatan kondensor *dummy* atau pada kondisi pemakaian RAC pada umumnya dapat dilihat pada Gambar 5.8. RAC dioperasikan selama 120 menit setelah keadaan stedi tercapai. Temperatur pada *bottom of the tank* dan *top of the tank* tetap berada temperatur 32 °C karena pada kondisi 4 tidak terjadi pemanasan di tangki air, karena kondensor *dummy* tidak digunakan. Temperatur kondensor rata-rata yang didapatkan pada kondisi 4 adalah 62 °C, sedangkan temperatur ruangan dapat dijaga pada 22 °C.



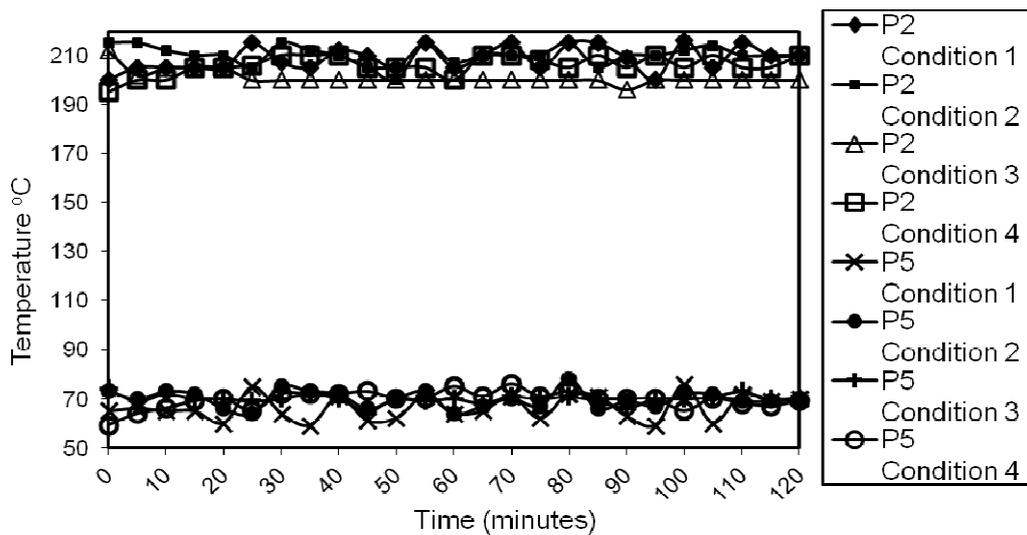
**Gambar 5.8.** Temperatur kondensor *in*, temperatur *bottom* dan *top of the tank* dan temperatur *room* pada mode RAC hibrida pada kondisi 4

Besar daya kompresor yang digunakan pada pengujian RAC baik mode RAC hibrida maupun RAC standar dari kondisi 1, kondisi 2, kondisi 3 dan kondisi 4 pada pengoperasian selama 120 menit dapat dilihat pada Gambar 5.9. Dari Gambar 5.9. dapat dianalisis bahwa daya kompresor pada kondisi 1, kondisi 2 dan kondisi 4 cenderung seragam dibanding daya kompresor pada kondisi 3. Terjadi penghematan daya kompresor walaupun tidak terlalu besar setelah beroperasi selama 30 menit pada kondisi 3, hal ini karena tidak terjadi akumulasi panas di tangki air, kalor buangan dari kondensor *dummy* langsung digunakan untuk memanaskan air, sehingga temperatur dan tekanan kondensor *dummy* turun lebih rendah dibanding kondisi 1, 2 dan 4. Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa penambahan kondensor *dummy* tidak berpengaruh pada daya kompresor, daya kompresor

cenderung tetap, penghematan daya kompresor hanya terjadi pada saat pemakaian air panas (kondisi 3) walaupun tidak terlalu besar.



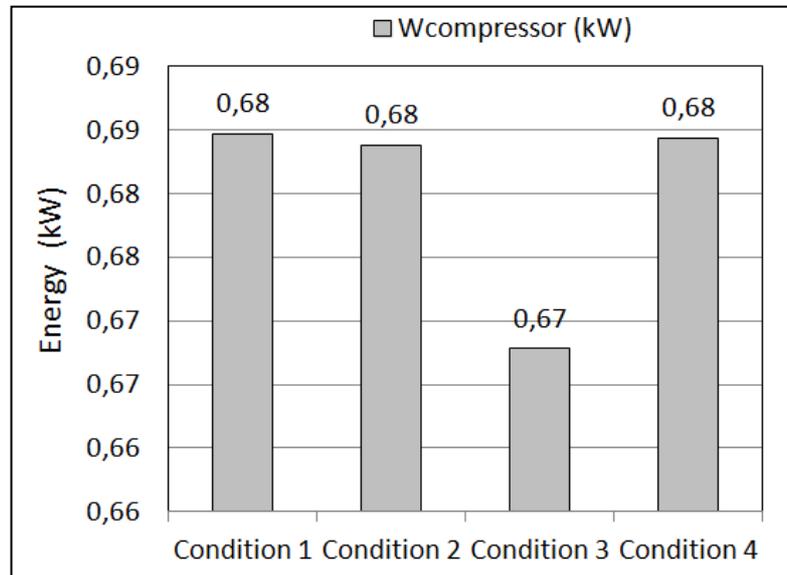
**Gambar 5.9.** Daya kompresor berbagai kondisi (1,2,3, dan 4) pada RAC hibrida standar model hibrida kondisi transien



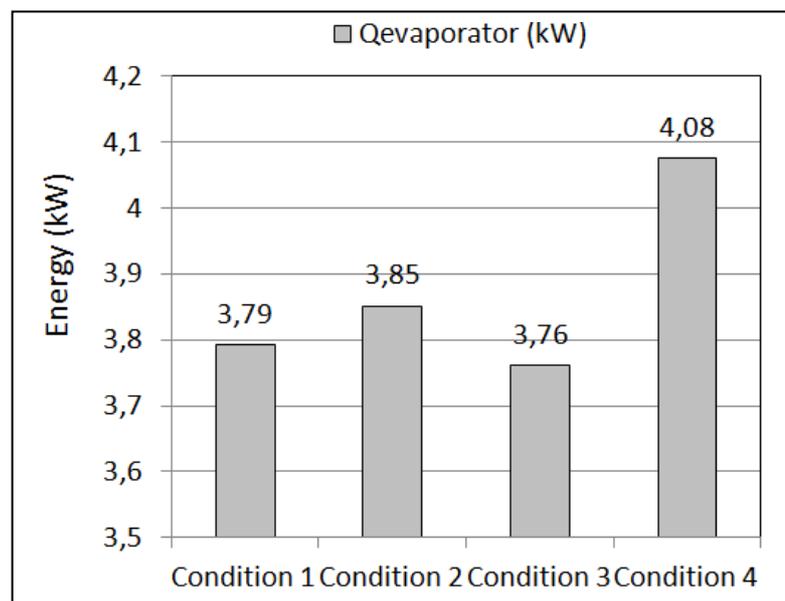
**Gambar 5.10.** Tekanan kondensator dan tekanan evaporator pada mode RAC standar dan model RAC hibrida pada kondisi 1, 2, 3, dan 4

Tekanan di evaporator dan tekanan di kondensator yang dihasilkan sebelum dan setelah kompresor pada pengujian RAC baik mode RAC hibrida maupun RAC standar dari kondisi 1, kondisi 2, kondisi 3 dan kondisi 4 pada pengoperasian selama 120 menit dapat dilihat pada Gambar 5.10. Dari Gambar 5.10 tampak bahwa variasi tekanan pada kondisi 1, 2, 3 dan 4 baik untuk sisi tekanan tinggi di kondensator dan sisi tekanan rendah di evaporator cenderung sama. Jadi dapat dikatakan bahwa tidak

terjadi perubahan yang berarti pada tekanan kondensor dan tekanan evaporator dengan penambahan kondensor *dummy*, sehingga RAC beroperasi secara wajar.



**Gambar 5.11.** Comparison of compressor power capacities as RAC hybrid mode

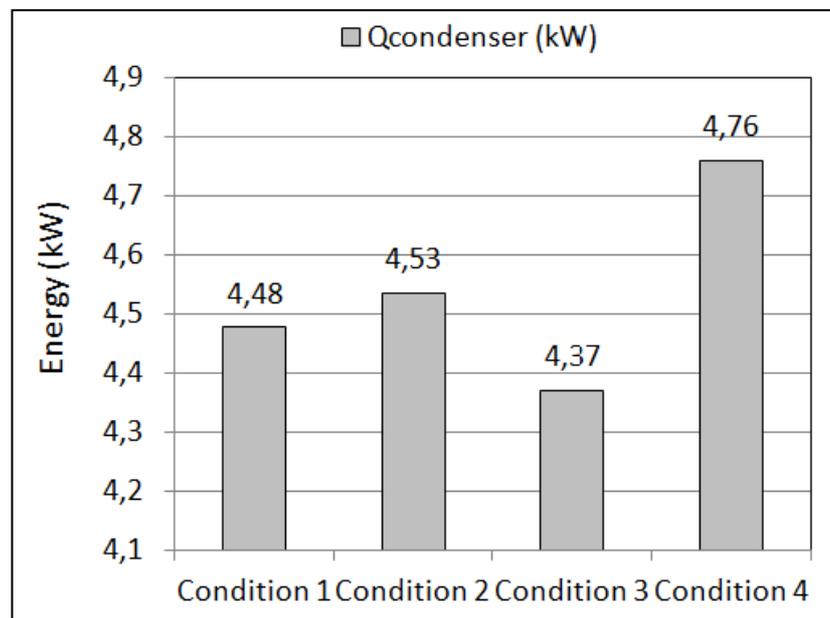


**Gambar 5.12** Comparison of evaporator cooling capacities as RAC hybrid mode

Grafik batang pada gambar 5.11 menunjukkan daya kompresor yang dibutuhkan saat penggunaan air panas dari kondensor *dummy* pada kondisi 3 adalah sebesar 0,67 kW atau terjadi penghematan sekitar 1,47% dibanding kondisi 4. Penghematan yang terjadi sangat kecil, dan hampir tidak terjadi penghematan daya kompresor pada saat

proses pemanasan air pada kondisi 1 dan 2. Jadi jika dilihat dari daya kompresor pada berbagai kondisi, tidak terjadi perubahan yang berarti pada penggunaan daya kompresor.

Daya pendinginan yang dihasilkan seperti ditunjukkan pada gambar 5.12, saat penggunaan kondensor *dummy* pada kondisi 1, kondisi 2 dan kondisi 3 berkurang sekitar 5,64 % sampai 7,84% dibanding pada kondisi 4 (pengoperasian tanpa kondensor *dummy*). Berkurangnya daya pendinginan yang dihasilkan ini, karena pada saat yang bersamaan terjadi proses pemanasan air dari panas buang kondensor di kondensor *dummy*. Berkurangnya daya pendinginan yang dihasilkan ini sebanding dengan besarnya panas buang yang dilepaskan di kondensor.

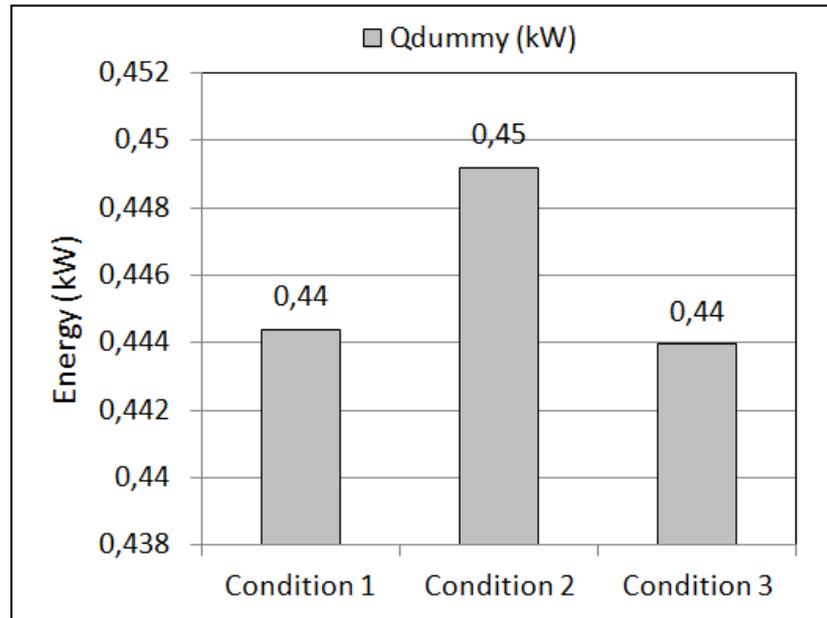


**Gambar 5.13.** Comparison fo condenser heating capacities as RAC hybrid mode

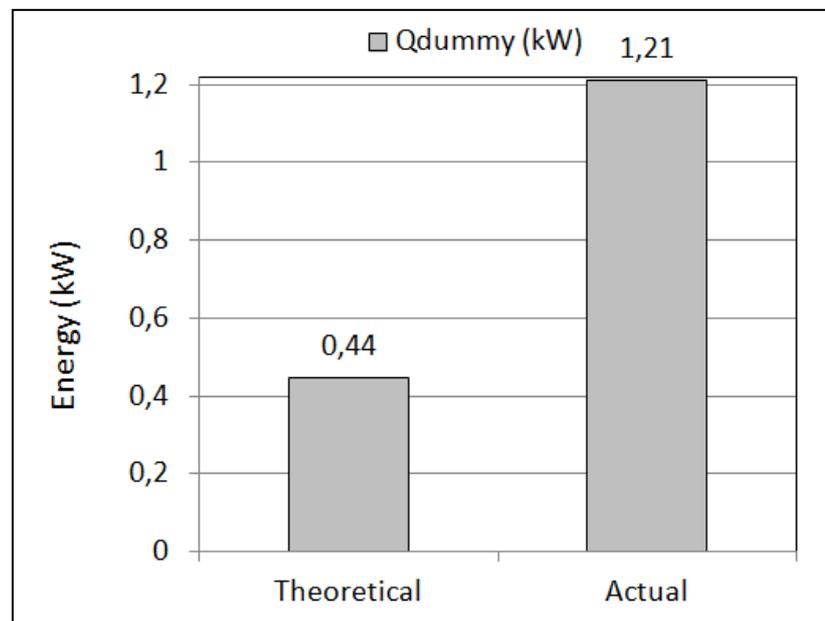
Daya pemanasan yang dihasilkan saat penggunaan kondensor *dummy* pada kondisi 1, kondisi 2 dan kondisi 3 berkurang sekitar 4,83% sampai 8,19% dibanding pada kondisi 4 (pengoperasian tanpa kondensor *dummy*), dapat dilihat pada gambar 5.13. Berkurangnya daya pemanasan yang dihasilkan ini sebanding dengan besarnya daya pendinginan yang diperoleh di evaporator.

Besarnya manfaat *recovery* energi untuk pemanasaan air adalah sebesar 0,45 kW yang diperoleh dari kondensor *dummy*, dapat dilihat pada gambar 5.14. *Recovery* energi ini dihitung dari asumsi bahwa kondensor *dummy*, melepaskan kalor buang refrigeran setelah keluar kompresor pada kondisi uap superpanas dan memasuki kondensor utama setelah mencapai kondisi uap jenuh (*recovery* energi teoritis). Pada

kondisi sebenarnya tidak bisa ditentukan dalam fasa apa refrigeran saat berada di kondensor *dummy* ataupun kondensor utama.



**Gambar 5.14.** Dummy condenser heating capacities as RAC hybrid mode



**Gambar 5.15.** Dummy condenser heating capacities theoretical and actual as RAC hybrid mode

Gambar 5.15 menunjukkan, besarnya manfaat *recovery* energi untuk pemanasan air, jika dihitung pada kondisi aktual yaitu besarnya kalor yang diterima air dari kondensor pada kondisi stedi adalah 1,2 kW atau sekitar 1,8 kali daya yang dibutuhkan untuk menjalankan sistem pendingin. Sedangkan jika manfaat *recovery*

energi dihitung secara teoritis, besarnya adalah 0,65 kali daya yang dibutuhkan untuk menjalankan sistem pendingin. Secara umum, dapat dinyatakan bahwa penggunaan kondensor *dummy*, pengaruhnya tidak berarti terhadap daya pendinginan di evaporator dan daya pemanasan di kondensor. Manfaat *recovery* energi yang didapat adalah sebesar 0,65 - 1,8 kali daya kompresor, sebagai penghematan energi yang diperoleh pada kondisi operasi sebagai sistem hibrida.

