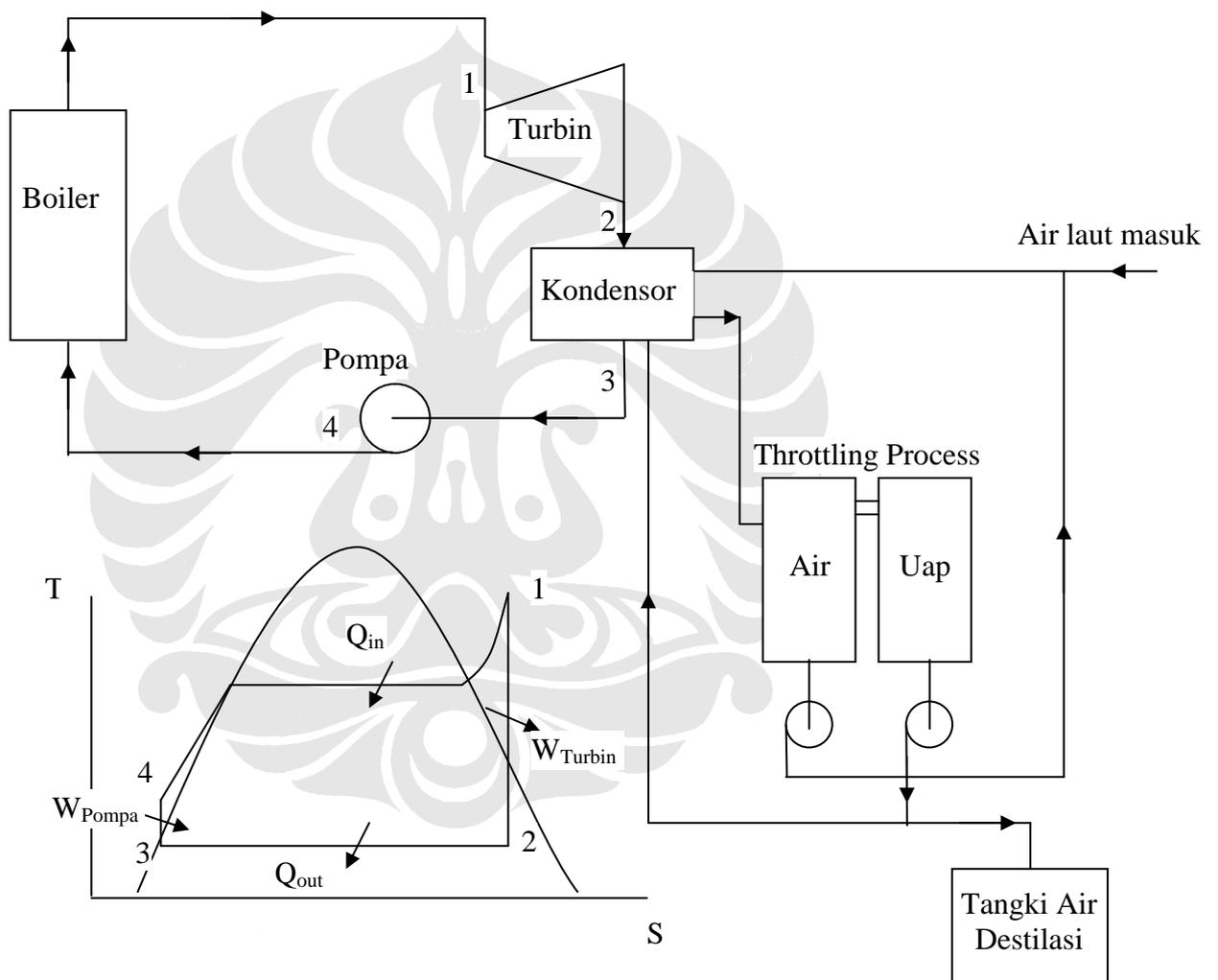


BAB IV

ANALISA SIMULASI DAN EKSPERIMEN

4.1 ANALISA SIMULASI



Gambar 4.1 Skema *throttling process* dalam siklus PLTU

4.1.1 Perhitungan Efisiensi Thermal PLTU Konvensional (50 MW)

- Entalpi

$$T \text{ in turbin} = T \text{ out boiler} = 510 \text{ }^\circ\text{C}$$

P in turbin = P out boiler = 89 bar absolut

Maka dari lampiran 8 dapat ditentukan entalpi masukan turbin (h_1) = 3411.8 kJ/kg

T out turbin = T in kondensor = 42.6 °C

P out turbin = P kondensor = -696.6 mmHg (gauge)

T jenuh uap air pada tekanan -696.6 mmHg (gauge) = 42.6 °C

Maka entalpi masuk kondensor (h_2) = 2100 kJ/kg

T out kondensor = 42,6 °C

P out = -696.6 mmHg (gauge)

Maka entalpi buangan kondensor (h_3) = 178.23 kJ/kg

T in pompa = 42.6 °C

P out pompa = 89 bar absolute

Maka entalpi keluar pompa (h_4) = 183.89 kJ/kg

- Kalor yang ditambahkan pada boiler (q_{in}) = $h_1 - h_4$ kJ/kg
 $q_{in} = 3411.8 \text{ kJ/kg} - 183.89 \text{ kJ/kg} = 3227.91 \text{ kJ/kg}$
- Kerja turbin (w_T) = $h_1 - h_2$ (kJ/kg)
 $w_T = 3411.8 \text{ kJ/kg} - 2100 \text{ kJ/kg} = 1311.8 \text{ kJ/kg}$
- Kalor yang dibuang oleh kondensor (q_{out}) = $h_2 - h_3$ kJ/kg
 $q_{out} = 2100 \text{ kJ/kg} - 178.23 \text{ kJ/kg} = 1921.77 \text{ kJ/kg}$
- Kerja pompa (w_p) = $h_4 - h_3$ kJ/kg
 $I w_p I = 183.89 \text{ kJ/kg} - 178.23 \text{ kJ/kg} = 5.66 \text{ kJ/kg}$
- Kerja netto (Δw_{net}) = $(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)$ kJ/kg
 $\Delta w_{net} = 1311.8 \text{ kJ/kg} - 5.66 \text{ kJ/kg} = 1306.14 \text{ kJ/kg}$
- Efisiensi thermal (η_{th}) = $\Delta w_{net} / q_{in} \times 100\%$
 $\eta_{th} = 38.51 \%$

Jadi efisiensi thermal PLTU konvensional adalah **40.46 %**.

4.1.2 Simulasi PLTU Dengan Alat *Throtling Process*

Tekanan vakum maksimal pada tabung reaktor dipilih sebesar 755 mmHg karena temperatur uap jenuhnya masih diatas titik *tripel* air yaitu 0,01 °C, tujuannya yaitu agar tidak terjadi bentuk es ketika air di serat melewati katup ekspansi.

- Perhitungan % uap dan % air

1. Tabung

Tekanan tabung = 755 mmHg

Temperatur uap jenuh = 1 °C

Entalpi liquid (h_f) = 5,022 kJ/kg dan Entalpi vapour (h_g) = 2502,7 kJ/kg

Maka $h_{fg} = 2497,678$ kJ/kg

2. Air laut keluar kondensor

Temperatur = 36 °C

Tekanan air = 1 atmosfer absolut = 760 mmHg

Entalpi liquid (h_f) = 150.86 kJ/kg

$$(h_{fg \text{ vakum}} \times X_{\text{uap}}) + h_{f \text{ vakum}} = h_{f \text{ air}}$$

Maka,

$$X_{\text{uap}} = \frac{h_{f \text{ air}} - h_{f \text{ vakum}}}{h_{fg \text{ vakum}}} \times 100\%$$

$$X_{\text{uap}} = 4,12 \%$$

$$X_{\text{air}} = 95,88 \%$$

- Temperatur campuran air keluar tabung dengan air laut

$$Q_{\text{air tabung}} = Q_{\text{air laut}}$$

$$M_{\text{air tabung}} \times C_p \times (T_{\text{campuran}} - T_{\text{air tabung}}) = M_{\text{air laut}} \times C_p \times (T_{\text{air laut}} - T_{\text{campuran}})$$

$$0,9588 (T_{\text{campuran}} - 1) = 0,0412 (30 - T_{\text{campuran}})$$

$$\text{Maka } T_{\text{campuran}} = 1,45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

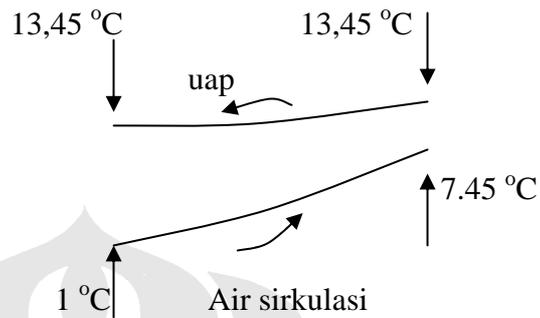
Air dingin ini akan digunakan untuk pendingin kondensor.

- Temperatur air pendingin keluar kondensor

Dipilih $TTD = 6 \text{ }^\circ\text{C}$ [5]

Maka Temperatur air keluar kondensor adalah

$TTD + T_{campuran} = 7,45 \text{ }^\circ\text{C}$ (diserat ke dalam tabung)



Gambar 4.2 Distribusi Suhu Kondensor

- Perhitungan % uap dan % air (dihitung kembali)

1. Tabung

Tekanan tabung = 755 mmHg

Temperatur uap jenuh = $1 \text{ }^\circ\text{C}$

Entalpi liquid (h_f) = 5,022 kJ/kg dan Entalpi vapour (h_g) = 2502,7 kJ/kg

Maka $h_{fg} = 2497,678 \text{ kJ/kg}$

2. Air laut keluar kondensor

Temperatur = $7,45 \text{ }^\circ\text{C}$

Tekanan air = 1 atmosfer absolut = 760 mmHg

Entalpi liquid (h_f) = 31.425 kJ/kg

$$(h_{fg \text{ vakum}} \times X_{uap}) + h_{f \text{ vakum}} = h_{f \text{ air}}$$

Maka,

$$X_{uap} = \frac{h_{fair} - h_{fvakum}}{h_{fgvakum}} \times 100\%$$

$$X_{uap} = 1,057 \%$$

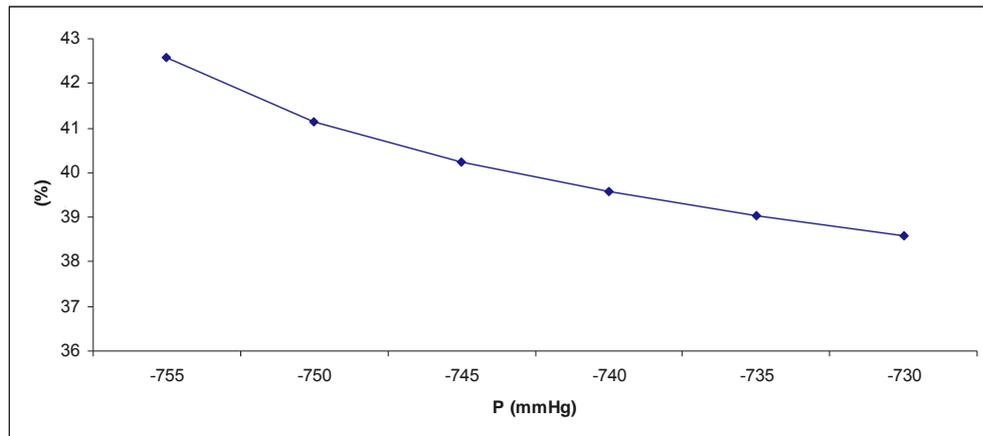
$$X_{air} = 98,94 \%$$

- Temperatur uap dalam kondensor
 $TTD_{\text{kondensor}} = T_{\text{uap keluar kondensor}} - T_{\text{air laut masuk kondensor}}$
Dipilih $TTD_{\text{kondensor}} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$ [5]
Jadi temperatur uap kondensor = $12 \text{ }^\circ\text{C} + 1,45 \text{ }^\circ\text{C} = 13,45 \text{ }^\circ\text{C}$
- Perubahan tekanan kondensor
Karena temperatur uap turun menjadi $13,45 \text{ }^\circ\text{C}$, maka tekanan kondensor juga turun menjadi $-748,48 \text{ mmHg}$ sehingga berpengaruh pada perubahan h_2 , h_3 dan h_4 .
Maka entalpi keluar turbin jika entropi tetap (h_2) = 1917 kJ/kg
Entalpi liquidnya (h_3) = $56,375 \text{ kJ/kg}$
Entalpi pompa (h_4) = $64,649 \text{ kJ/kg}$
- Daya AC untuk mengkondensasi uap
 $X_{\text{uap}} = 1,057 \%$ dengan *mass flow* pompa pada air laut PLTU 11100 ton/h , maka dapat dihasilkan air sulingan :
Air sulingan = $0,01057 \times 111000 \text{ ton/h} = 117,327 \text{ ton/h}$
Maka untuk mengkondensasi uap sebesar itu diperlukan daya AC sebesar :

$$\text{daya AC} = X_{\text{uap}} \times \frac{h_{fg}}{COP} = 8,59 \text{ kJ/kg}$$
- Efisiensi thermal PLTU dengan alat *Throttling process*
Efisiensi thermal (η_{th}) = $\Delta w_{\text{net}} + q_{\text{AC}} / (q_{\text{in}}) \times 100\%$

$$\eta_{\text{th}} = \mathbf{44,29 \%}$$

Dengan demikian efisiensi thermal PLTU dengan penambahan alat *Throttling Process* ini meningkat dari **40.46 %** menjadi **44,29 %**. Nilai efisiensi tersebut dapat berubah karena pengaruh perubahan kevakuman dari alat *Throttling Process*. Efisiensi PLTU akan menurun jika kevakuman alat *Throttling Process* meningkat sesuai grafik 4.1 dibawah ini. (data selengkapnya lihat lampiran 8)



Grafik 4.1 Efisiensi PLTU terhadap kevakuman alat *throttling process*

4.2 ANALISA EKSPERIMEN

4.2.1 Kendala-Kendala Yang Timbul Selama Proses *Set Up*

Selama melakukan *set up* alat dan pengujian, sulit bagi alat tersebut untuk memperoleh vakum yang tinggi. Sedangkan hasil yang maksimum dapat diperoleh bila kondisi vakum dapat dicapai setinggi-tingginya 755 mmHg.

Pertama kali vakum dibuat dengan bantuan *ejektor* yang sudah ada dengan menggunakan kompresor bertekanan maksimal 1 Mpa. Namun, vakum yang didapat hanya sampai maksimal 100 mmHg. Vakum sebesar ini sangat sulit untuk mendapatkan uap, jika pun demikian percobaan harus dilakukan pada temperatur air masuk yang sangat tinggi (temperatur jenuh tekanan vakum 100 mmHg/660 mmHg (abs) adalah 96.1 °C). Keadaan ini sangat sulit dicapai, mengingat temperatur air hampir mendekati titik didih-nya. Selain itu juga keterbatasan selang penghubung yang hanya berbahan karet, sangat rentan memuai/meleleh.

Oleh karena itu, untuk mendapatkan vakum yang diinginkan, digunakanlah pompa vakum sebagai pengganti fungsi *ejektor* yang memang dalam kenyataan masih jauh dari rancangan yang terbaik. Pompa vakum yang digunakan pertama kali bermerek "ROBINAIR", dayanya 1 hp dengan *flow* hisapan 232 l/m. Namun selama dalam perjalanan pengujian terdapat beberapa masalah pada pompa vakum ini. Kemudian pompa vakum diganti dengan merek ARUKI, dayanya ¼ hp dan *flow* hisapannya 1,5 CFM (42.5 l/m). Pompa ini lebih baik dari pompa pertama, namun tetap saja vakum yang didapat maksimal hanya 650 mmHg.

Saat awal percobaan, alat tersebut berhasil mencapai vakum yang lumayan yaitu 730 mmHg. Namun, karena berjalannya waktu seiring dengan percobaan yang dilakukan berulang-ulang, saat ini vakum yang dapat dicapai alat tersebut hanya 650 mmHg. Namun demikian hal tersebut masih dapat diterima menimbang temperatur jenuh vakum tersebut masih tergolong rendah yaitu 53.5 °C, karena masih dapat diperoleh temperatur air masuk yang lebih dari nilai tersebut.

Temperatur air masuk katup ekspansi dijaga maksimal 85 °C, hal ini dilakukan untuk mencegah melelehnya selang karet.

Selama set up berlangsung juga belum dapat ditemukan air hasil kondensasi uap pada tabung 2, sehingga dengan demikian perlu dilakukan modifikasi pemasangan kipas (kipas pendingin komputer) pada sambungan antara kedua *flange* masing-masing tabung. Setelah modifikasi ini, uap sudah berhasil didapat namun jumlahnya masih sangat kecil (hanya beberapa tetes saja).

Lubang katup ekspansi yang sangat kecil menyebabkan katup ini sangat rentan mampat akibat tersumbat oleh kotoran-kotoran kecil, sehingga perlu diletakkan kain kasa sebagai penyaring kotoran sebelum air masuk ke katup ekspansi. Katup ekspansi yang kecil ini juga menyebabkan temperatur inlet katup ekspansi sulit tercapai maksimal karena kehilangan panas yang besar sebelum masuk katup ekspansi. Masalah lain akibat katup ekspansi yang kecil yaitu flow uap yang terbentuk sangat sedikit, mengakibatkan AC kurang terpenuhi beban pendinginannya. Karena kendala ini katup ekspansi diganti dengan yang lebih besar.

Pompa 1 sampai saat ini masih belum dapat digunakan karena tekanan vakum tabung anjlok saat katup inlet pompa di buka. Oleh karena itu untuk menghindari air luber pada tabung 1, lamanya percobaan diatur agar jangan sampai melebihi katup ekspansi. Untuk itu volume air maksimal yang masuk tabung 1 dijaga pada angka maksimal sebagai berikut :

$$V = \frac{\pi}{4} d^2 t \quad \text{dimana } d = \text{diameter tabung} = 30 \text{ cm}$$

$$t = \text{tinggi tabung hingga katup ekspansi} = 50 \text{ cm}$$

$$V = \frac{\pi}{4} (3)^2 (5) = 35.34 \text{ liter}$$

Dengan keterbatasan-keterbatasan tersebut percobaan masih dapat dilakukan. Data yang diperoleh adalah sebagai berikut :

4.2.2 Pengambilan Data

1. *Flow Katup Ekspansi*

Awalnya saat *set up* digunakan katup ekspansi dengan aliran maksimal hingga 20 l/jam (5.6 g/s), namun karena AC tidak operasi kontinyu karena uap yang terbentuk sangat sedikit maka katup ekspansi diganti dengan kapasitas yang lebih besar. Dalam mencari *flow* katup ekspansi digunakan timbangan digital dan *stop watch*, selain itu juga dibandingkan dengan penunjukan pada *flow* meter. Dengan katup ini *flow* yang diperoleh jauh lebih besar dan mampu hingga 90 g/s (324 l/jam) bahkan lebih besar lagi. Data selengkapnya dapat dilihat pada lampiran 5. (waktu setiap pengukuran ditetapkan 15 detik dan massa jenis air 1 gr/cm³).

2. *Data Pengujian Alat*

Pengujian dilakukan pada tekanan yang tetap sebesar 0.5 Kg/cm², menimbang fluktuasi tekanan yang kecil (hingga 1.0 pada alat ukur) kurang berpengaruh besar terhadap uap yang dihasilkan. Sedangkan temperatur katup ekspansi ditetapkan pada 2 nilai yaitu pengujian pertama pada temperatur 70 °C dan pengujian kedua pada 80 °C. Vakum yang dipakai adalah vakum tertinggi yang didapat oleh alat ini sebesar 650 mmHg (temperatur jenuhnya sebesar 53.5 °C). Bukaannya disesuaikan dengan *flow* yang cukup untuk beban pendinginan pada AC dalam mengkondensasikan uap. Data pengujian selengkapnya dapat dilihat pada lampiran 9.

4.2.3 Analisa Data Pengujian

Berdasarkan perhitungan teoritis dengan 9 kali pengambilan data yang didapatkan, ditemui perbedaan bahwa air hasil kondensasi uap yang didapatkan dari percobaan memiliki jumlah yang lebih sedikit dibandingkan dengan hasil perhitungan. Sebagai contoh pada pengujian pertama, air yang didapat pada tabung

1 sebesar 3800 cc (3800 gr), seharusnya berdasarkan perhitungan teoritis didapatkan air dari kondensasi uap sebanyak :

$$\begin{aligned}
 \text{Tekanan Inlet} &= 0.5 \text{ Kg/cm}^2 \\
 \text{Temperatur inlet} &= 70 \text{ }^\circ\text{C} \\
 \text{Entalpi (h) inlet} &= 292.94 \text{ Kj/kg} \\
 \text{Tekanan Outlet} &= \text{Vakum 650 mmHg} \\
 \text{Temperatur jenuh inlet} &= 53.5 \text{ }^\circ\text{C} \\
 h_{f\ 650} &= 223.92 \text{ Kj/kg} \\
 h_{g\ 650} &= 2597.2 \text{ Kj/kg} \\
 h_{fg\ 650} &= h_{g\ 650} - h_{f\ 650} = 2597.2 - 223.92 = 2373.28 \text{ Kj/kg} \\
 h_{\text{inlet}} - h_{f\ 650} &= 292.94 - 223.92 = 69.02 \text{ Kj/kg} \\
 \text{Fraksi massa uap} &= \frac{69.02}{2373.28} \times 100\% = 2.91\% \\
 \text{Fraksi massa air} &= 100 - 2.91 = 97.09\% \\
 \text{Massa uap} &= \frac{2.91}{97.09} \% \times 3800 \text{ (gr)} = 110.58 \text{ gr} : 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \\
 &= \mathbf{113.89 \text{ cc}}
 \end{aligned}$$

Namun, dari hasil pengujian didapatkan massa air pada tabung 2 hanya sebesar **2.74 cc**.

Contoh lain pada pengujian kesembilan, air yang didapat pada tabung 1 adalah sebesar 24000 cc, seharusnya berdasarkan perhitungan teoritis didapatkan air dari kondensasi uap sebanyak :

$$\begin{aligned}
 \text{Tekanan Inlet} &= 0.5 \text{ Kg/cm}^2 \\
 \text{Temperatur inlet} &= 80 \text{ }^\circ\text{C} \\
 \text{Entalpi (h) inlet} &= 334.84 \text{ Kj/kg} \\
 \text{Tekanan Outlet} &= \text{Vakum 650 mmHg} \\
 \text{Temperatur jenuh inlet} &= 53.5 \text{ }^\circ\text{C} \\
 h_{f\ 650} &= 223.92 \text{ Kj/kg} \\
 h_{g\ 650} &= 2597.2 \text{ Kj/kg} \\
 h_{fg\ 650} &= h_{g\ 650} - h_{f\ 650} = 2597.2 - 223.92 = 2373.28 \text{ Kj/kg} \\
 h_{\text{inlet}} - h_{f\ 650} &= 334.84 - 223.92 = 110.92 \text{ Kj/kg} \\
 \text{Fraksi massa uap} &= \frac{110.92}{2373.28} \times 100\% = 4.67\%
 \end{aligned}$$

$$\text{Fraksi massa air} = 100 - 4.67 = 95.33 \%$$

$$\begin{aligned} \text{Massa uap} &= \frac{4.67}{95.33} \% \times 24000 \text{ (gr)} = 1175.71 \text{ gr} : 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \\ &= \mathbf{1175.71 \text{ cc}} \end{aligned}$$

Namun, dari hasil pengujian didapatkan massa air pada tabung 2 hanya sebesar **132.08 cc**.

Jumlah uap yang terkondensasi sedikit ini terjadi akibat aliran massa uap yang mengalir ke tabung 2 tidak sesuai dengan beban pendinginan oleh Air Conditioner.

Beban pendinginan AC = massa uap x h_{fg} uap (kalor laten penguapan)

$$\text{Beban pendinginan AC 1 PK} = 745 \times 3.5 \text{ (COP)} = 2607.5 \text{ Watt}$$

Untuk itu bila kalor laten penguapan (h_{fg}) pada vakum 650 mmHg adalah 2373.28 j/g, maka aliran massa uap yang seharusnya terbentuk pada tabung 2 adalah :

$$\text{Aliran massa uap} = \frac{2607.5}{2373.28} = 1.1 \text{ gr/s}$$

Namun setiap sekali pengujian sulit sekali dicapai aliran massa uap sebesar itu. Kendala-kendala yang terjadi disebabkan oleh hal-hal berikut ini :

- Aliran air pada bukaan katup ekspansi sangat jauh berbeda antara pengujian karakteristik katup pada tekanan atmosfer dengan kondisi sangat pengujian. Perhatikan pengujian kelima, aliran yang terjadi pada bukaan katup $\frac{1}{4}$ dan tekanan 0.5 Kg/cm^2 adalah 32.17 gr/s sedangkan hasil percobaan karakterisasi untuk tekanan dan bukaan yang sama adalah sebesar 36.44 gr/s (lihat lampiran 5).
- Berdasarkan hasil pengamatan pada kaca intip tabung 1 terlihat bahwa adanya pengembunan pada kaca intip tersebut, hal ini menandakan bahwa ada uap yang terkondensasi lebih dulu pada tabung 1, namun jumlahnya belum dapat diterka.
- Kipas sirkulasi uap dari tabung 1 ke tabung 2 sangat kecil, sehingga jumlah uap yang terhisap juga kecil.
- Selama pengujian berlangsung terjadi penurunan temperatur yang masuk katup ekspansi dan kenaikan tekanan (penurunan tekanan

vakum) pada tabung reaktor, sehingga jumlah uap yang dapat terbentuk pun menjadi lebih sedikit lagi.

Bila jumlah uap yang mengalir ke tabung 2 lebih sedikit dari yang seharusnya diterima oleh *evaporator* AC sebagai beban pendinginannya, maka akan berakibat *refrigerant* yang keluar menuju kompresor masih dalam bentuk cair (fasa cair berbahaya untuk kompresor). Akibatnya AC secara otomatis trip untuk mengamankan kompressornya tersebut. Oleh karena itu setiap kali pengujian AC tidak dapat beroperasi secara kontinyu.

Berdasarkan pengujian-pengujian yang telah dilakukan terlihat bahwa terjadi penurunan temperatur dari temperatur air masuk katup ekspansi. Namun karena terjadi penurunan tekanan vakum (kenaikkan tekanan), maka temperatur air ceratan tidak diperoleh pada temperatur jenuh tekanan vakum 650 mmHg yaitu 53.5 °C. Perhatikan pada pengujian kedua, temperatur air ceratan didapat 60.9 °C dari temperatur air inlet katup ekspansi sebesar 70 °C. Pada pengujian kedua ini vakum turun dari 650 mmHg hingga 560 mmHg (temperatur jenuh 560 mmHg sebesar 66.4 °C) jadi akan terjadi perubahan temperatur air ceratan karena tidak stabilnya tekanan vakum.