

BAB IV

ANALISA EKSPERIMEN DAN SIMULASI

Selama percobaan dilakukan beberapa modifikasi atau perbaikan dalam rangka usaha mendapatkan air kondensasi. Semenjak dari memperbaiki kebocoran sampai penggantian part yang berpengaruh pada percobaan ini, diantaranya penggantian pompa vakum dan penggantian katup ekspansi.

✚ Penggantian pompa vakum, ada 2 bentuk proses pemvakuman yang telah dilakukan pada alat ini,

1. Proses pemvakuman dengan ejector.

Sesuai dengan rancangan awal alat ini, proses pemvakuman dilakukan dengan ejector. Ejector menggunakan kompresor bertekanan maksimal 1 Mpa. Tekanan vakum yang didapat hanya sampai maksimal 100 mmHg. Untuk tekanan tersebut, penguapan dan pengembunan secara efektif sulit dilakukan kalau dengan temperatur rendah, karena untuk tekanan 100 mmHg (660 mmHg (abs) kita harus memberikan temperatur serendah-rendahnya 96.1 °C. Alat kita tidak memadai terhadap temperatur demikian.

2. Proses pemvakuman dengan pompa vakum.

Ada 2 kali pemasangan pompa vakum dalam percobaan ini,

ü Pompa vakum yang digunakan berdaya 1 PK dengan flow hisapan 232 l/m. Awalnya pemvakuman didapat maksimal 730 mmHg, lama kelamaan menurun menjadi 580 mmHg. Dengan tekanan tersebut kita harus membuat temperatur serendah-rendah 64.1 °C. Percobaan tidak dapat dilanjutkan karena pompa rusak.

ü Percobaan terakhir, pompa vakum yang digunakan berdaya 1/4 PK dengan free air displacement 1,5 cfm (42.5 l/m) dapat dilakukan sampai maksimum 650 mmHg. Untuk 650 mmHg (110 mmHg abs), dengan temperatur jenuh atau serendah-rendah yang harus diberikan supaya dihasilkan kondensasi air adalah 53.5°C.

✚ Penggantian katup ekspansi.

ü Katup ekspansi flow 15 l/h = 4.1 g/s, pembukaan penuh, pada tekanan 1 kg/cm². Dengan katup ini tidak dihasilkan kondensasi uap.

Ü Percobaan terakhir, katup ekspansi flow 79,1 l/h = 22 g/s. Dengan flow ini dihasilkan kondensasi uap.

4. 1. Pengambilan data

Data-data diambil setelah menjalankan pompa vakum 15 menit didapat tekanannya 560 mmHg. Untuk lebih lengkap ditabelkan seperti dibawah ini.

No.	P _{in} (Kg/cm ²)	P _v (mmHg)	T _{heater} (°C)	T _{in} (°C)
1	0.98	550	99	52
2	1	580	99	52
3	0.98	580	98	52
4	0.98	580	98	50
5	1	580	99	80

Pada kondisi hasil kondensasi belum didapat.

Percobaan terakhir, hasil kondensasi baru didapat setelah penggantian pompa vakum 42.5 l/m dan penggantian katup ekspansi 22 gr/s

Tabel 4. 1. Hasil penguapan dan kondensasi alat uji.

No.	R	Temp.air msk (oC)	P	Pv	Actual		Simulasi	
					% uap air	% air	% uap air	% air
1	1/8	70	0.5	650	0.072	99.93	2.91	97.09
2	1/8	70	0.5	650	0.009	99.99	2.91	97.09
3	1/2	70	0.5	650	0.011	99.99	2.91	97.09
4	3 1/2	70	1	650	0.030	99.97	2.91	97.09
5	1/4	70	0.5	650	0.004	100.00	2.91	97.09
6	1/4	80	0.5	650	0.015	99.99	4.67	95.33
7	1/4	80	0.5	650	0.009	99.99	4.67	95.33
8	1/8	80	0.5	650	0.666	99.33	4.67	95.33
9	1/8	80	0.5	650	0.547	99.45	4.67	95.33

Data yang berkaitan dengan hasil pengujian dapat dilihat pada lampiran 9.

4.2. ANALISA EKSPERIMEN

Percobaan awal, berdasarkan perhitungan teoritis dengan hasil yang didapatkan, ditemui perbedaan bahwa air hasil kondensasi uap yang didapatkan dari percobaan memiliki jumlah yang lebih sedikit dibandingkan dengan hasil perhitungan, hal ini terjadi karena :

1. jumlah uap yang terkondensasi sedikit, akibat :
 - a. saluran antara tabung 1 dan tabung 2 terlalu kecil, sehingga menghalangi aliran uap dari tabung 1 ke tabung 2
 - b. Air conditioner kurang berfungsi dengan baik. Selama percobaan berlangsung, AC tidak bisa operasi secara kontinyu. Diduga hal ini disebabkan karena massa uap yang dikondensasikan tidak sesuai dengan beban pendinginan yang harus diterima AC, sehingga refrigerant yang keluar menuju kompressor masih dalam bentuk cair (fasa cair berbahaya untuk kompressor). Akibatnya AC secara otomatis trip untuk mengamankan kompressornya tersebut.
 - c. Kipas sirkulasi uap dari tabung 1 ke tabung 2 sangat kecil, sehingga jumlah uap yang terhisap juga kecil.
2. Karena kerentanan katup ekspansi akibat kotoran-kotoran yang menyumbat, menyebabkan aliran air yang melalui katup-pun menjadi tersendat-sendat. Bila bila terlalu lama flow berkurang, maka temperature air yang masuk katup ekspansi-pun akan turun. Hal ini terjadi karena air terlalu lama diperjalanan selama dari water heater menuju katup ekspansi, sehingga panas pun banyak yang terbuang. Fluktuasi temperatur inilah yang mengurangi terbentuknya fasa uap pada proses peneratan
3. Sekalipun penurunan tekanan ruang vakum tidak terlalu significant (hanya berkisar 30 mmHg selama 1 jam), namun penurunan ini sangat mempengaruhi jumlah pembentukan uap selama proses berlangsung. Sebagai catatan disini, bahwa penggunaan pompa vakum hanya sebagai awalan dalam penciptaan tekanan vakum tabung. Diduga bahwa kenaikan tekanan vakum diakibatkan level air yang semakin tinggi pada tabung 1 sehingga mengurangi volume tabung secara keseluruhan. Andaikan pompa 1 dapat beroperasi secara sempurna, kemungkinan vakum ini pun akan tetap konstan.
4. Sebagian uap menempel pada dinding atas tabung 1, kemudian mengumpul dan membentuk titik-titik embun yang menetes jatuh pada penampungan air ceratan pada tabung 1.

Fenomena lain yang muncul yaitu temperature hasil proses throttling lebih rendah dari nilai teoritisnya. Hal ini terjadi karena pengukuran temperature dilakukan di luar tabung

1, sehingga terjadi banyak kehilangan panas ke lingkungan sebelum temperatur di ukur. Sebenarnya pada tabung 2 sudah terdapat termometer, namun karena pada tabung 2 belum pernah mendapat air kondensasi yang banyak (yang dapat menyentuh termometer tersebut) jadi sampai saat ini termometer tersebut belum berfungsi terhadap alat ini.

Percobaan terakhir, 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 :

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

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 :

$$\begin{aligned}
\text{Tekanan Inlet} &= 0.5 \text{ Kg/cm}^2 \\
\text{Temperature inlet} &= 80 \text{ }^\circ\text{C} \\
\text{Entalpi (h) inlet} &= 334.84 \text{ Kj/Kg} \\
\text{Tekanan Outlet} &= \text{Vakum } 650 \text{ mmHg} \\
\text{Temperature jenuh inlet} &= 53.5 \text{ }^\circ\text{C} \\
h_{f \ 650} &= 223.92 \text{ Kj/Kg} \\
h_{g \ 650} &= 2597.2 \text{ Kj/Kg} \\
h_{fg \ 650} &= h_{g \ 650} - h_{f \ 650} = 2597.2 - 223.92 = 2373.28 \text{ Kj/Kg} \\
h_{\text{inlet}} - h_{f \ 650} &= 334.84 - 223.92 = 110.92 \text{ Kj/Kg} \\
\text{Fraksi massa uap} &= \frac{110.92}{2373.28} \times 100\% = 4.67\% \\
\text{Fraksi massa air} &= 100 - 4.67 = 95.33\% \\
\text{Massa uap} &= \frac{4.67}{95.33} \% \times 24000 \text{ (gr)} = 1175.71 \text{ gr} : 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \\
&= \mathbf{1175.71 \text{ cc}}
\end{aligned}$$

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)

Beban pendinginan AC 1 PK = 745×3.5 (COP) = 2607.5 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 :

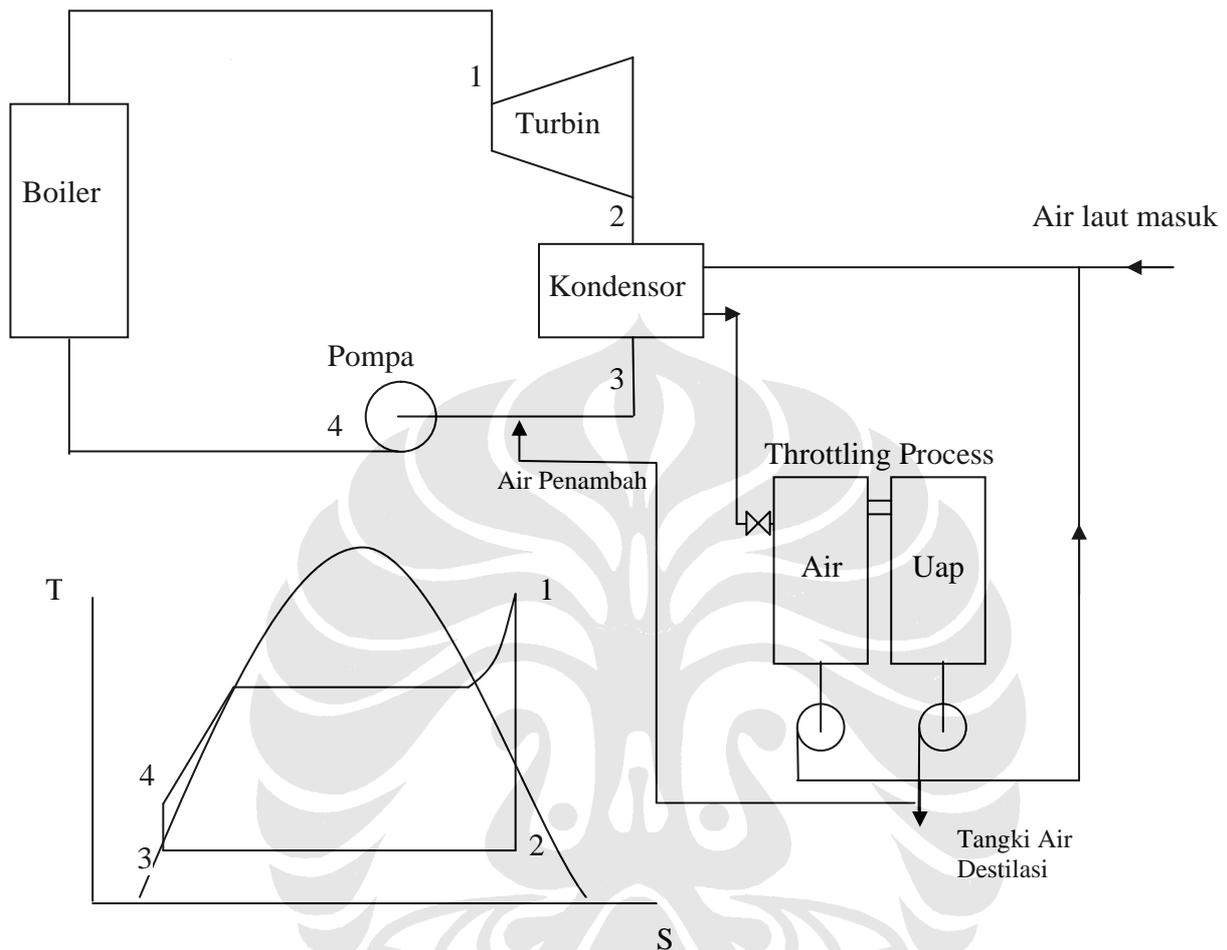
- Aliran air pada bukaan katup ekspansi sangat jauh berbeda antara pengujian karakteristik katup pada tekanan atmosfer dengan kondisi sangat pengujian. Perhatikan pengujian kelima, aliran yang terjadi pada bukaan katup $\frac{1}{4}$ dan tekanan 0.5 Kg/cm^2 adalah 32.17 gr/s sedangkan hasil percobaan karakterisasi untuk tekanan dan bukaan yang sama adalah sebesar 52 gr/s (lihat lampiran 9).

- 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 kompressor masih dalam bentuk cair (fasa cair berbahaya untuk kompressor). 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 temperature 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 oC. Perhatikan pada pengujian kedua, temperatur air ceratan didapat 60.9 oC dari temperatur air inlet katup ekspansi sebesar 70 oC. Pada pengujian kedua ini vakum turun dari 650 mmHg hingga 560 mmHg (temperatur jenuh 560 mmHg sebesar 66.4 oC) jadi akan terjadi perubahan temperatur air ceratan karena tidak stabilnya tekanan vakum.

4.3. ANALISA SIMULASI



Gambar 4.1 Skema Throttling Process Dalam Siklus PLTU

4.3.1 Perhitungan efisiensi thermal perancangan PLTU

- Enthalpi

- T in turbin = T out boiler = 510°C

- P in turbin = P out boiler = 89 bar absolut

Maka dari table ? dapat ditentukan enthalpi masukan turbin (h_1) = 3411.8 kJ/kg

- Tout turbin = T in kondensor = $42,6^{\circ}\text{C}$

- P out turbin = P kondensor = -696,6 mmHg

- T jenuh uap air pada tekanan -696,6 mmHg = $42,6^{\circ}\text{C}$

Maka enthalpy masuk kondensor (h_2) = 2163 kJ/kg

- T out kondensor = 42,6 °C

- P out = -696.6 mmHg

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

- T in pompa = 42,6 °C

- P out pompa = 89 bar absolute

Maka enthalpy 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)

$$w_T = 3411.8 \text{ kJ/kg} - 2163 \text{ kJ/kg} = 1248,8 \text{ kJ/kg}$$

- Kalor yang dibuang oleh kondensor (q_{out}) = $h_2 - h_3$ (kJ/kg)

$$q_{out} = 2163 \text{ kJ/kg} - 178,23 \text{ kJ/kg} = 1984,77 \text{ kJ/kg}$$

- Kerja pompa (w_p) = $h_4 - h_3$ (kJ/kg)

$$I w_p I = 183.89 \text{ kJ/kg} - 178.23 \text{ kJ/kg} = 5,66 \text{ kJ/kg}$$

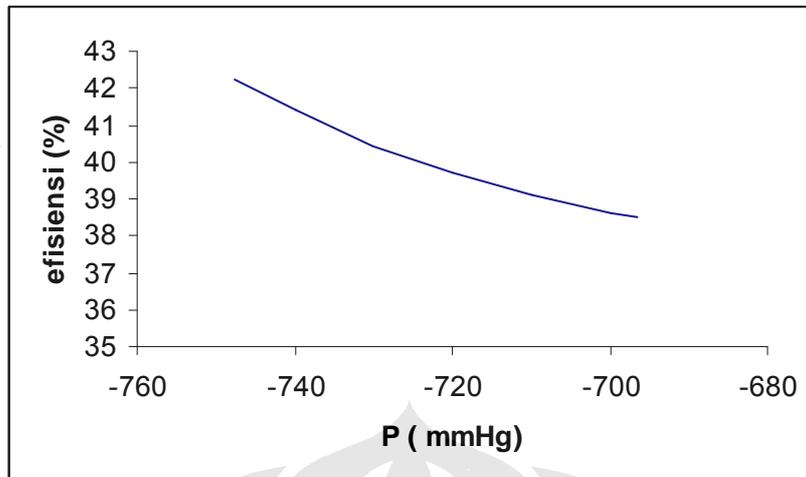
- Kerja netto (Δw_{net}) = $(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)$ (kJ/kg)

$$\Delta w_{net} = 1248,8 \text{ kJ/kg} - 5,66 \text{ kJ/kg} = 1243,14 \text{ kJ/kg}$$

- Efisiensi termal (η_{th}) = $\Delta w_{net} / q_{in} \times 100\%$

$$\eta_{th} = 38.51 \%$$

untuk efisiensi termal dari perancangan PLTU dengan variasi kevakuman kondensor dapat dilihat dari grafik 4.1 dibawah ini.



Grafik 4.1 Efisiensi PLTU terhadap kevakuman kondensor

4 3.2 Perancangan PLTU dengan alat *Throtling process*

Jika tekanan vakum pada tabung dipilih sebesar 755 mmHg karena temperature uap jenuhnya masih diatas titik tripel air yaitu 0,01 °C 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
- Enthalpi liquid (h_f) = 5,022 kJ/kg dan Enthalpi 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

Enthalpi liquid (h_f) = 150.86 kJ/kg

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

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

$$X_{uap} = 4,12 \% \text{ dan } X_{air} = 95,88 \%$$

- **Temperature campuran air keluar tabung dengan air laut**

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

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

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

Maka $T_{\text{campuran}} = 1,45^{\circ}\text{C}$ (air yang akan digunakan untuk pendingin kondensor)

- **Temperature air pendingin keluar kondensor**

Dipilih $\text{TTd} = 6^{\circ}\text{C}$ (M. M. El-Wakil, 1992)

Maka Temperature air keluar kondensor adalah

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

13,45 $^{\circ}\text{C}$

uap

1 $^{\circ}\text{C}$

Air sirkulasi

Gambar 4.2 distribusi suhu kondensor

Maka % uap dan airnya

Tabung

- tekanan tabung = 755 mmHg
- Temperatur uap jenuh = 1 $^{\circ}\text{C}$
- Enthalpi liquid (h_f) = 5,022 kJ/kg dan Enthalpi vapour (h_g) = 2502,7 kJ/kg
- Maka $h_{fg} = 2497,678$ kJ/kg

Air keluar kondensor

- Temperatur = 7,45 $^{\circ}\text{C}$
- Tekanan air = 1 atmosfir absolut = 760 mmHg
- Enthalpi liquid (h_f) = 31.425 kJ/kg

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

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

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

$$X_{air} = 98,945 \%$$

- **Temperature uap dalam kondensor**

$TTd_{kondensor} = T\ uap\ keluar\ kondensor\ dengan\ T_{air\ laut\ masuk\ kondensor} = 12\ ^\circ C + 1,45\ ^\circ C$
 $= 13,45\ ^\circ C$

- **Perubahan tekanan kondensor**

Karena temperatur uap turun menjadi $13,45\ ^\circ C$, maka tekanan kondensor juga turun menjadi $-748,48\ mmHg$ sehingga berpengaruh pada perubahan h_2, h_3 dan h_4

Maka enthalpi isentropis turbin (h_2) = $1974\ kJ/kg$

Enthalpy liquidnya (h_3) = $56,375\ kJ/kg$

Enthalpy pompa (h_4) = $64,649\ kJ/kg$

- **Q AC untuk mengkondensasi uap**

$X_{uap} = 1,057\ \%$ dengan mass flow pompa pada air laut PLTU $11100\ ton/h$, maka dapat dihasilkan air sulingan :

Air sulingan = $0,01057 \times 11100\ ton/h = 117,327\ ton/h$

Maka untuk mengkondensasi uap sebesar itu diperlukan AC dengan :

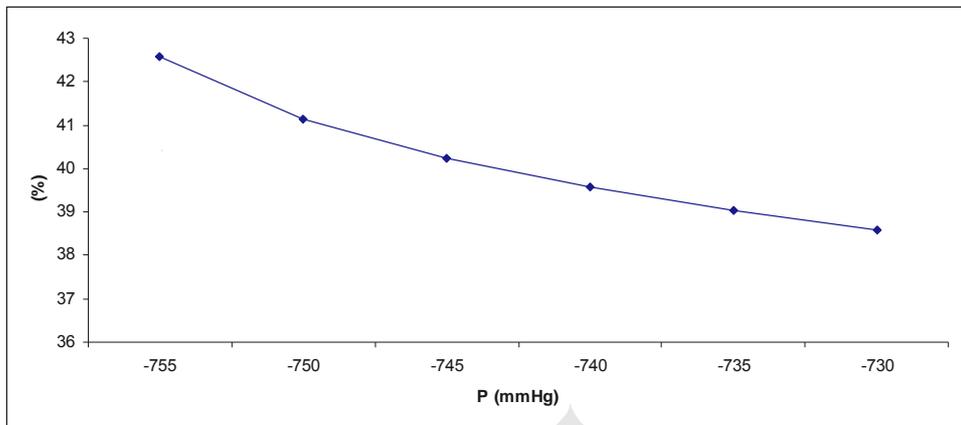
$daya\ AC = X_{uap} \times h_{fg}/COP = 8,59\ kJ/kg$

- **Efisiensi termal PLTU dengan alat *Throttling process***

Efisiensi termal (η_{th}) = $\Delta w_{net} + q_{AC} / (q_{in}) \times 100\%$

$$\eta_{th} = 42,58 \%$$

dengan demikian efisiensi termal PLTU dengan alat ini meningkat dari $38,51\ \%$ menjadi $42,58\ \%$. 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 4.2 dibawah ini. (Lihat lampiran 8)



Grafik 4.2 Efisiensi PLTU terhadap kevakuman alat *throttling process*

