

PENGARUH TEKANAN *VACUUM CONDENSER* TERHADAP KINERJA *STEAM TURBINE GENERATOR*

The Effect of Vacuum Condenser Pressure on Steam Turbine Generator Performance

Nasrul Hidayatullah¹, Dedi Wahyudi², Agus Nuramal^{1*}

¹) Program Studi Teknik Mesin Universitas Bengkulu Jl. W.R. Supratman, Kandang Limun, Kota Bengkulu

²) UPGK Sektor Keramasan PT. PLN (Persero), Jl. Keramasan, Kemang Agung, Kota Palembang

*) Email : anuramal@unib.ac.id

ABSTRACT

Condenser is an main equipment on power steam electricity system generator. Condenser is an head exchanger that functions as a phase changer from the steam turbine output into water, which is where water results condensation the will pumped to HRSG for used back. Vacuum condenser working for speed up the condensation process in the condenser. PT. PLN (Persero) UPGK keramasan is generator electricity consists of 2 units from gas and steam power plant with power by gas turbine generator of ± 27 MW and a steam turbine generator of ± 13 MW so that the total each unit is 40 MW. This research to determine of effect vaccum condenser pressure of condenser with power turbine, and efficiency thermal. calculation obtained at a vacuum condenser pressure of 15,41 kPa at a turbine power was 9681 kW, and obtain efficiency thermal was 20,39%. On pressure vacuum condenser 15,09 kPa at a turbine power was 9602 kW, and obtain efficiency thermal was 20,24%.

Keywords : *condenser, vacuum condenser, turbine*

1. PENDAHULUAN

PT. PLN (Persero) UPGK Keramasan memiliki 2 Unit PLTGU dengan pola 1-1-1 yaitu 1 PLTG, 1 HRSG dan 1 PLTU. Kesemuanya ini memanfaatkan condenser untuk proses kondensasi merubah dari fasa gas menjadi fasa air. Beban kerja condenser yang sering kali naik turun menyebabkan perubahan tekanan pada *vacuum condenser*. Tekanan *vacuum* merupakan tekanan yang lebih rendah dari tekanan atmosfer, tekanan *vacuum condenser* itu sendiri merupakan suatu parameter penting yang menunjukkan baik tidaknya efisiensi turbin uap khususnya pada *Low Pressure* (LP) turbin [1]. Bertambahnya tekanan atau tidak vakum pada kondensor dapat menyebabkan beberapa masalah antara lain yaitu terhambatnya proses kondensasi dan daya turbin yang dihasilkan tidak maksimal.

Kondensor merupakan alat penukar panas yang digunakan untuk mengubah uap keluaran turbin uap menjadi air. Di dalam kondensor terdapat pipa – pipa yang digunakan untuk mengalirkan air sebagai pendingin. Prinsip kerja kondensor adalah uap keluaran turbin uap akan masuk ke dalam kondensor dan memenuhi permukaan luar pipa dan air sebagai pendingin mengalir di dalam pipa maka akan terjadi perpindahan panas dari uap ke air. Air pendingin tersebut menggunakan air dari *cooling tower* masuk ke kondensor dan kembali lagi ke *cooling tower* untuk didinginkan sehingga terjadi proses sirkulasi.

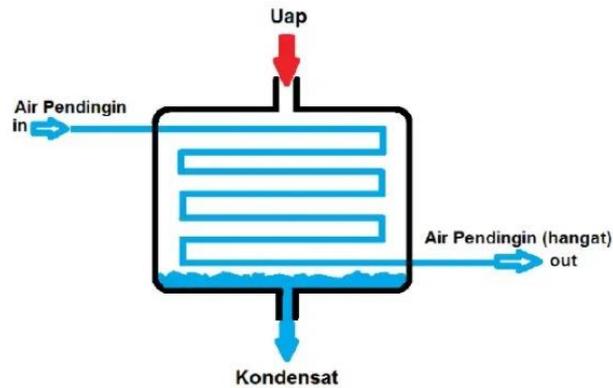
Agar uap sisa dari *low pressure* (LP) turbin dapat bergerak turun dengan lancar dari sudu terakhir turbin, maka vakum kondensor harus dijaga, karena dengan ada vakum pada kondensor akan membuat tekanan udara pada kondensor menjadi rendah. Dengan tekanan yang lebih rendah di kondensor, maka uap akan bisa bergerak dengan mudah menuju kondensor. Pada dasarnya, fungsi utama kondensor adalah untuk membuang kalor ke lingkungan luar dan mengkondensasikan uap dari turbin menjadi air kondensat. Kondensor akan mengubah fasa zat gas menjadi menjadi zar cair dari temperature tinggi keluar melalui dinding-dinding kondensor dan melewati kondensasi, sehingga uap akan menjadi dingin dan fasanya berubah menjadi fasa cair pada temperatur rendah (Gambar 1).

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Komponen Kondensor

a. Pipa Kondensor (*Condenser Tube*)

Pipa kondensor berfungsi menyerap panas dari uap keluaran turbin sehingga temperaturnya turun dan berubah fasa menjadi cair (air) [2]. Pipa kondensor terletak di bagian dalam kondensor dan terdiri dari banyak (ratusan atau ribuan) pipa - pipa dengan diameter kecil yang disusun rapat dan biasanya tersusun secara horizontal [3]. Air pendingin akan dimasukkan ke dalam pipa kondensor dari bagian bawah (inlet) dan dikeluarkan dari bagian atas (outlet). Sedangkan uap bekas Turbin akan bersentuhan dengan pipa Kondensor bagian luar.



Gambar 1. Fungsi Kodensor

b. *Cooling Water Pump (CWP)*

Cooling water pump adalah pompa air yang mengalirkan air pendingin ke dalam pipa – pipa kondensor. Pada PLTGU PT. PLN (Persero) UPDK Keramasan air pre treatment plant dari sungai keramasan digunakan sebagai air pendingin. Penggunaan air pendingin kondensor digunakan atau disirkulasikan dan didinginkan ke *cooling tower*.

c. *Vaccum Pump*

Pompa vakum berfungsi menjaga tekanan di penampung air kondensor (*waterbox condenser*) tetap vakum atau dibawah tekanan atmosfer (± 72 mbar) sehingga dapat mengoptimalkan kondensasi uap keluar turbin menjadi air hasil kondensasi [4]. Tekanan vakum kondensor dijaga sesuai jumlah uap yang akan dikondensasi dengan cara mengekstraksi udara dari kondensor ke pompa vakum melalui *Butterfly Valve* dan *Check Valve*. Prinsip kerjanya bersamaan dengan proses pengaliran air, udara dilewatkan melalui saluran wet pressure ke separator dimana air dipisahkan dari udara. Udara meninggalkan unit atmospheric pressure melalui check valve pada sambungan keluaran.[5]

d. *Hotwell*

Uap yang telah terkondensasi akan ditampung di dalam *hotwell*. *Hotwell* terletak di bawah kondensor.

e. *Condensate Pump*

Pompa kondensat berfungsi untuk mengalirkan air kondensat di hotwell ke tangki deaerator (*Deaerator Tank*) melalui Deaerator. Sistem Uap Perapat (*Steam Seals System*) Berfungsi untuk memberikan uap luar tidak masuk ke dalam kondensor. Uap bertekanan rendah akan memenuhi labirin yang berfungsi sebagai perapat sehingga hanya uap yang akan dihisap *vacuum condenser* (Gambar 2).

f. Parameter Kontrol dan Instrumen

Peralatan ini berfungsi untuk mengetahui atau membaca tekanan dan temperature (parameter-parameter) di dalam kondensor.



Gambar 2. Pompa kondensat

2.2 Prinsip Kerja Turbin

Turbin uap terdiri dari sebuah cakram yang dikelilingi oleh daun – daun cakram yang disebut sudu – sudu turbin. Sudu – sudu turbin ini berputar karena adanya dorongan dari uap bertekanan yang berasal dari HRSG, yang telah dipanasi terlebih dahulu dengan gas sisa keluaran turbin gas. Uap tersebut kemudian diatur oleh control valve yang akan digunakan untuk memutar turbin yang dikopel langsung dengan pompa dan juga sama halnya dikopel dengan generator untuk menghasilkan listrik [6].

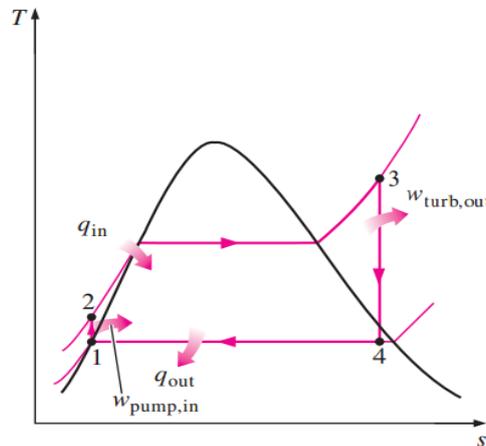
Setelah melewati turbin uap, uap bertekanan dan bertemperatur tinggi tersebut berubah menjadi uap bertekanan dan bertemperatur rendah. Panas yang telah diserap oleh kondensator mengubah uap menjadi air yang kemudian air tersebut akan dipompakan kembali ke HRSG. Sisa panas yang dibuang oleh kondensator mencapai setengah jumlah panas semula yang masuk [7].

2.3 Siklus Rankine dalam PLTGU

Dalam proses menghitung nilai kalor panas yang dihasilkan HRSG menggunakan siklus rankine ideal terdiri dari tahapan proses [8]:

- 1-2 kompresi isentropik dengan pompa
- 2-3 penambahan panas dalam HRSG secara isobar
- 3-4 ekspansi isentropik pada turbin
- 4-1 pelepasan panas pada kondensator secara isobar dan isothermal.

Siklus Rankine ideal dalam diagram T-s yang dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram T-s Siklus Rankine [2]

Perpindahan kalor yang tidak dapat dihindari antara komponen pembangkit dan sekelilingnya diabaikan untuk memudahkan analisis, Perubahan energi kinetik dan potensial juga diabaikan. Setiap komponen dianggap beroperasi pada kondisi tunak (*steady*), Dengan menggunakan prinsip konservasi massa dan konservasi energi bersama- sama dengan idealisasi tersebut maka akan dikembangkan persamaan untuk perpindahan energi pada masing-masing komponen pembangkit.

Menghitung Daya Kerja Pompa

Kondensat cair yang meninggalkan kondensator pada kondisi 1 dipompa dari kondensator kedalam deaerator tank sehingga tekanannya naik. Dengan menggunakan volume atur disekitar pompa dan mengasumsikan tidak ada perpindahan kalor disekitarnya, kesetimbangan laju massa dan energi adalah :

$$W_{\text{pump}} = V \times \Delta p \dots\dots\dots(2.1) [2]$$

Dimana :

- W_{pump} = Daya kerja pompa (N.m/kg)
- V = volume spesifik (m³/kg)
- Δp = Perubahan Tekanan (N/m²)

Menghitung Parameter dari HRSG

Fluida kerja meninggalkan pompa pada kondisi 2 yang disebut air- pengisian, dipanaskan sampai cair jenuh dan diuapkan di dalam hrsg. Dengan menggunakan volume atur yang melingkupi tabung hrsg dan drum yang mengalirkan air-pengisian dan kondisi 2 ke kondisi 3, kesetimbangan laju massa dan energi menghasilkan $Q = \dot{m} \times \Delta h \dots\dots\dots(2.2) [2]$

Dimana:

- Q = Panas yang digunakan sistem (kJ/s)
- \dot{m} = Laju aliran massa sistem (kg/s)
- Δ_h = Perubahan entalpi sistem (kJ/kg)

Menghitung Uap panas yang dihasilkan HRSG (Q_h)

Besarnya Q_h dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$Q_h = \sum(Q_{HP} + Q_{LP} + Q_{\text{Blow down}}) \dots \dots \dots (2.3)$$

Dalam menghitung panas yang dihasilkan HRSG digunakan persamaan untuk menentukan nilai yang terdapat pada persamaan 2.3 antara lain:

Menghitung Uap Panas Yang Dihasilkan Pada *Low Pressure (LP)* Steam Keluar HRSG

Dalam mencari energi panas yang diserap pada aliran dengan tekanan rendah digunakan persamaan yaitu:

$$Q_{LP} = Q_{LP\text{preheater}} + Q_{LP\text{evaporator}} + Q_{LP\text{superheater}} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana :

- $Q_{LP\text{preheater}}$ = panas yang diserap pada proses pemanasan awal (kJ/s)
- $Q_{LP\text{evaporator}}$ = panas yang diserap pada proses pemanasan berulang (kJ/s)
- $Q_{LP\text{superheater}}$ = panas yang diserap pada pembentukan uap jenuh (kJ/s)

Menghitung Uap Panas yang Dihasilkan pada *High Pressure (HP)* Steam Keluar HRSG

Dalam menghitung energi panas yang diserap pada aliran dengan tekanan tinggi digunakan persamaan yaitu :

$$Q_{HP} = Q_{HP\text{economizer}} + Q_{HP\text{evapor}} + Q_{HP\text{superheater}} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana :

- $Q_{HP\text{economizer}}$ = panas yang diserap pada proses pemanasan awal (kJ/s)
- $Q_{HP\text{evapor}}$ = panas yang diserap pada proses pemanasan berulang (kJ/s)
- $Q_{HP\text{superheater}}$ = panas yang diserap pada pembentukan uap jenuh (kJ/s)

Menghitung Panas pada *Blowdown*

Dalam menghitung energi panas yang diserap pada *blowdown* digunakan persamaan yaitu :

$$\text{Massa Blowdown} = \dot{m}_{\text{air umpan}} - (\dot{m}_{HP} + \dot{m}_{LP}) \dots \dots \dots (2.6)$$

$$\text{Panas Blowdown} = \dot{m}_{\text{air umpan}} \times h_f \dots \dots \dots (2.7)$$

2.4 Efisiensi Termal Siklus Rankine

Siklus Rankine menjadi konsep dasar sebuah pembangkit listrik tenaga uap. Siklus tertutup termodinamika ini tersusun atas empat komponen dasar yakni turbin uap, kondensor, pompa, serta boiler. Siklus berawal dengan dipanaskannya air di dalam boiler sehingga menjadi uap air kering. Selanjutnya uap air superheated ini masuk ke turbin sehingga energi panas di dalam uap air terkonversi menjadi energi gerak. Uap air jenuh yang keluar dari turbin akan melewati kondensor untuk mengalami proses kondensasi sehingga kembali berwujud cair. Dari kondensor, air dialirkan sekaligus ditingkatkan tekanannya oleh sebuah pompa, menuju boiler. Siklus sederhana ini berputar seterusnya sehingga energi panas yang didapatkan dari pembakaran bahan bakar di dalam furnace boiler pada akhirnya terkonversi menjadi energi gerak poros turbin uap.

Secara singkat, beberapa komponen siklus rankine akan mengalami perpindahan energi panas serta ada pula yang mengalami perubahan energi gerak. Di dalam boiler akan terjadi proses masuknya energi panas dari luar pembakaran bahan bakar ke dalam sistem (siklus air – uap air). Sedangkan di dalam kondensor akan terjadi proses pembuangan kalor laten dari uap air jenuh ke media pendingin. Pada turbin uap, karena terjadi konversi energi panas menjadi gerak, maka di komponen ini keluar produk berupa energi mekanis. Terakhir adalah pada komponen pompa, terjadi proses transfer energi gerak dari pompa menjadi tekanan.

Dari penjabaran sederhana ini, serta dengan ketentuan bahwa siklus ini adalah Siklus Rankine ideal tanpa adanya kerugian sama sekali, maka dapat kita buat dua buah rumusan sederhana berikut:

Energi Masuk = Energi Keluar (Hukum Kekekalan Energi)

$$Q_{HRSG} + W_{\text{pompa}} = W_{\text{Turbin}} + Q_{\text{Kondensor}} \dots \dots \dots (2.8)$$

serta,

$$\eta_{\text{termal}} = \frac{W_{\text{turbin}} - W_{\text{pompa}}}{Q_{\text{boiler}}} 100\% \dots \dots \dots (2.9)$$

3. METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang dipakai untuk mendapatkan data-data yang diperlukan dalam kerja praktek adalah: penulis memperoleh data penelitian dengan cara pengamatan langsung pada *Steam Turbine* Generator PLTGU Unit 2 PT. PLN (Persero) UPDK Keramasan. Penulis memperoleh data dengan cara membaca manual *book steam turbine* generator yang ada dan juga mengambil data melalui *Canter Control Room* (CCR) PLTGU Unit 2 PT. PLN (Persero) UPDK Keramasan. Penulis melakukan pengambilan data dengan cara mengajukan beberapa pertanyaan kepada karyawan bagian pemeliharaan dan operasi (*Canter Control Room* atau CCR).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data perhitungan diambil berdasarkan hasil *performance monitoring* PT. PLN (Persero) UPDK Keramasan selama bulan Januari 2022. Data yang dikelola oleh penulis adalah data pada tanggal 10-14 Januari 2022 sebagai data variasi konstan tekanan *vaccum condenser*.

Tabel 4. 1 Data Operasi Steam Turbine PLTGU Unit 2

Parameter	Satuan	Bulan Januari 2022				
		10	11	12	13	14
Tekanan Vakum Kondensor	kPa	15,41	15,36	15,41	15,13	15,09
Flowrate Steam High Pressure (HP)	kg/s	11,97	11,93	11,94	11,94	11,91
Tekanan Steam High Pressure (HP)	bar	46	45,7	45,8	45,8	45,6
HP steam inlet temperature	°C	510	510	510	510	510
Flowrate Steam Low Pressure (LP)	kg/s	3,1067	3,008	2,9972	2,9972	2,98
Tekanan Steam Low Pressure (LP)	bar	2,6	2,5	2,5	2,5	2,5
LP steam outlet temperature	°C	59,2	59,3	59	58,7	58,6
LP main outlet pressure	bar	-0,85	-0,85	-0,85	-0,86	-0,86
T _{in} HRSG	°C	583,25	590	588	592,03	580,59
T _{out} Stack Gas (HRSG)	°C	105,35	106,19	105,48	106,19	106,1
Tekanan Air Condensor	MPa	0,01549	0,0134	0,01433	0,01421	0,01216
Temperatur Air Umpan Boiler	°C	53,5	53,07	53,5	53,59	51,59
Tekanan Air Umpan Boiler	MPa	1,52	1,55	1,53	1,58	1,58
Flow Air umpan boiler	Ton/hr	56,07	56,38	56,31	56,36	56,34
Temperatur Preheater (LP economizer)	°C	133,6	133,64	133,6	133,79	134,49
Tekanan Evaporator Low Pressure (LP)	MPa	0,35	0,36	0,35	0,37	0,35
Temperatur Steam Low Pressure (LP)	°C	224,34	224,2	224,21	224,24	224,36
Tekanan Air Umpan High Pressure (BFP)	MPa	6,22	6,26	6,22	6,28	6,33
Temperature High Pressure Ecoomizer	°C	248,11	247,96	248,3	248,41	248,71
Tekanan Air Evaporator High Pressure	MPa	5,3	5,32	5,31	5,33	5,34
Temperatur Blowdown	°C	60,41	59,86	61,59	63,76	60,56

Hasil perhitungan kerja turbin dapat dilihat pada **Tabel 4.2**

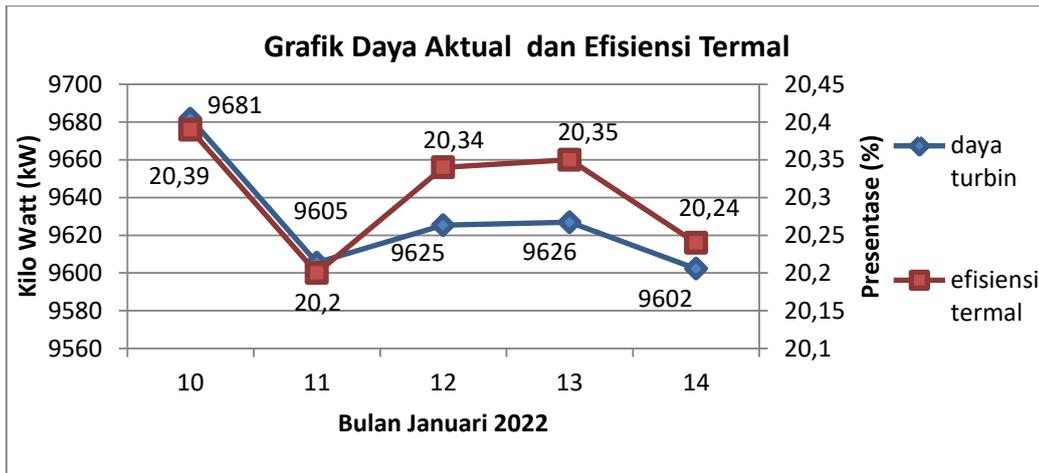
Tabel 4. 2 Hasil Perhitungan Kerja Steam Turbine PLTGU Unit 2

Parameter	Satuan	Bulan Januari 2022				
		10	11	12	13	14
Tekanan Vakum Kondensor	kPa	15,41	15,36	15,41	15,13	15,09
Daya pompa 1 (\dot{W}_{p1})	kW	23,77	24,47	24,12	24,19	24,82
Daya pompa 2 (\dot{W}_{p1})	kW	19,67	19,16	18,91	18,92	19,23
Daya turbine (\dot{W}_t)	kW	9681	9605	9625	9628	9602
Efisiensi termal (η_{termal})	%	20,39	20,2	20,34	20,35	20,24

Dari tabel diatas dapat dibuat grafik sebagai berikut.

4.1 Grafik Daya Aktual (kW) dan Efisiensi Termal Steam Turbine

Grafik daya aktual dan efisiensi termal turbin dapat dilihat pada **Gambar 4**.



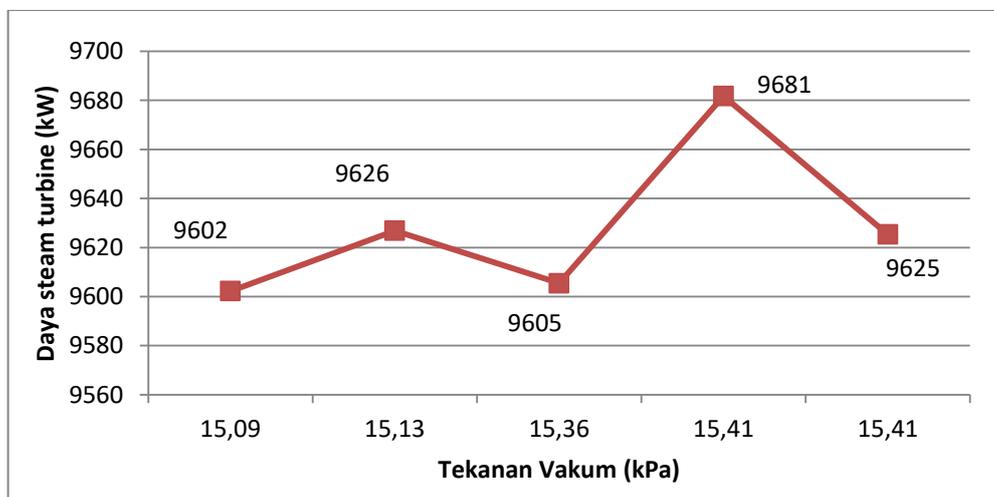
Gambar 4. Hubungan Daya Aktual dan Efisiensi Termal Turbin

Perbandingan daya aktual turbin dan efisiensi termal turbin dapat diperhatikan pada grafik Gambar 4 yang menjelaskan bahwa efisiensi termal berpengaruh dari daya aktual *steam turbine*. Dari grafik nilai efisiensi termal terendah memiliki harga 20,2% sedangkan nilai dari daya *steam turbine* yaitu 9605 kW. Untuk nilai efisiensi tertinggi yaitu 20,39% dan untuk nilai daya *steam turbine* sebesar 9681 kW. Maka dari itu perbandingan dari nilai efisiensi termal dan nilai daya *steam turbine* berbanding lurus.

Dari grafik diatas bahwa daya turbin dan efisiensi termal identik, untuk itu kenaikan daya output dari *steam turbine* selalu diikuti dengan kenaikan efisiensi termal. Penurunan daya output turbin dapat mempengaruhi juga turunnya efisiensi termal. Maka dari itu akan lebih efisien *steam turbine* bekerja pada daya output yang lebih tinggi.

4.2 Grafik Perbandingan Daya Steam Turbine Vs Vacuum Condenser

Grafik perbandingan daya *steam turbine* vs *vacuum condenser* dapat dilihat pada Gambar 5.



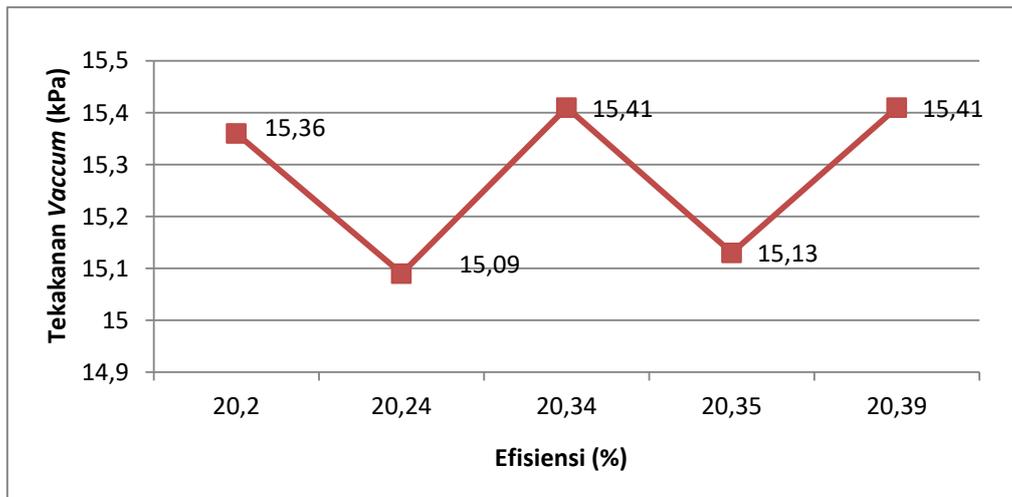
Gambar 5. Hubungan Daya Steam Turbine dan Vacuum Condenser

Perbandingan daya turbin dan *vacuum condenser* dapat diperhatikan pada grafik Gambar 5 yang menjelaskan bahwa kevakuman berpengaruh dari daya steam turbine actual. Dari grafik nilai vakum terendah memiliki harga 15,09 kPa sedangkan nilai dari daya steam turbine yaitu 9602 kW. Untuk nilai tekanan *vacuum condenser* tertinggi yaitu 15,41 kPa dan untuk nilai daya steam turbine sebesar 9625 kW. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi tekanan *vacuum condenser* maka daya terbangkit juga akan semakin besar.

Dari tabel diatas, dapat disimpulkan bahwa penurunan tekanan *vacuum condenser* dapat mempengaruhi kinerja turbin uap. Untuk mendapatkan daya yang besar maka perlu menurunkan tekanan pada *condenser* atau dibuat semakin vakum didalam *condenser*. Dengan tekanan semakin vakum, maka aliran uap semakin banyak atau debit aliran yang dihasilkan akan semakin besar.

4.3 Grafik Perbandingan Efisiensi Termal vs *Vacuum Condenser*

Grafik perbandingan efisiensi vs *vacuum condenser* dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Hubungan Perbandingan Efisiensi Termal dan *Vacuum Condenser*

Perbandingan efisiensi termal *steam turbine* dan *vacuum condenser* dapat diperhatikan pada grafik Gambar 6 yang menjelaskan bahwa *vacuum condenser* tidak berpengaruh dari efisiensi termal turbin. Dari grafik nilai *vacuum condenser* terendah memiliki harga 15,09 kPa sedangkan nilai dari efisiensi termal turbin yaitu 20,24%. Untuk nilai *vacuum condenser* tertinggi yaitu 15,41 kPa dan untuk nilai efisiensi termal turbin sebesar 20,39%. Hal ini menunjukkan secara umum bahwa penurunan dan kenaikan *vacuum condenser* tidak berpengaruh terhadap nilai efisiensi termal.

5. Kesimpulan

Berdasarkan perhitungan – perhitungan yang diperoleh dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Semakin vakum atau semakin rendah tekanan kondensor maka daya output yang dihasilkan semakin besar.
2. Kenaikan daya output dari *steam turbine* selalu diikuti dengan kenaikan nilai efisiensi termal.
3. Berdasarkan analisa tekanan vakum tidak berpengaruh terhadap efisiensi termal turbin.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Strusnik, D., "Integration of machine learning to increase steam turbine condenser vacuum and efficiency through gasket resealing and higher heat extraction into the atmosphere", *International Journal of Energy Research*, 2021.
- [2] Rahmadhani *et al.*, "Penentuan Jumlah Panas dan Air Pendinginan pada Condensor di PLTU Tanjung Awar-Awar", *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, vol.6, no.2, 2022.
- [3] Titahelu, A., "Perpindahan Kalor Konveksi Natural dari Silinder Horizontal Isothermal Set dalam Saluran Vertikal", *Jurnal METIKS*, Vol.1, No.1, pp. 30-38, 2020.
- [4] Ikbali, Subali, D., "Pengaruh Tanki Vakum Terhadap Perpindahan Fluida Air", *Jurnal Rekayasa Mesin*, Vol.15, No.1., pp. 75-81, 2020
- [5] A. Sukarno *et al.*, "Analisis Perubahan Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Kinerja Kondensor Di Pltu Tanjung Jati B Unit 1," *EKSERGI J. Tek. Energi*, vol. 10, no. 2, pp. 65–71, 2014.
- [6] Y.D. Herlambang *et al.*, " Analisis Perhitungan Efisiensi Heat Recovery Steam Generator (HRSG) Tipe Vertikal Tekanan Ganda pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU)", *Jurnal Polines*, Vol.16, No.3, 2020.
- [7] H. P. I, Sinaga *et al.*, " Analisis Performansi Turbin Uap Kapasitas 1,95MW di PT Perkebunan Lembah Bhakti Astra Agro Lestari TBK", *SINERGI polmed:Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol.03, no.1, 2022.
- [8] Y. A. Cengel, *Thermodynamics An Engineering Approach*, 5rd edition, vol. 148. 2004.