

ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN TEKANAN VAKUM KONDENSOR TERHADAP EFISIENSI DAN *HEAT RATE* TURBIN UAP DI PLTU KENDARI-3 UNIT 2

Ivan Darren Alber

Sekolah Pasca Sarjana, Magister Energi
Universitas Diponegoro
Email: ivandarren@students.undip.ac.id

Nazaruddin Sinaga

Fakultas Teknik, Departemen Teknik Mesin
Universitas Diponegoro
Email: nsinaga19.undip@gmail.com

ABSTRAK

Kondensor merupakan komponen utama pada PLTU Kendari yang berfungsi sebagai alat penukar panas. Kondensor digunakan untuk mengubah uap tekanan rendah dari turbin menjadi air melalui proses kondensasi. Air yang terkondensasi dari kondensor kemudian akan dipanaskan dengan pemanas tekanan rendah dan deaerator sebagai proses deaerasi sebelum diumpan pada boiler. Kondensor merupakan alat perpindahan panas utama pada PLTU yang mempengaruhi efisiensi suatu pembangkit. Pada bulan Oktober 2021, PLTU Kendari Unit 2 mengalami penurunan debit air pendingin kondensor disebabkan dengan serpihan *rubber line* pipa yang tersumbat pada filter jalur air pendingin sehingga nilai tekanan pada kondensorpun berkurang. Setelah dilakukan pemeliharaan serta pembersihan filter pada jalur air pendingin kondensor, terjadi kenaikan pada tekanan vakum kondensor. Pada penelitian ini menganalisis perubahan tekanan pada kondensor terhadap efisiensi dan *heat rate* turbin uap menggunakan analisis termodinamika dan metode input output energi. Data yang dianalisis adalah data aktual operasional PLTU Kendari-3 sebelum dan setelah dilakukan pembersihan filter pada jalur air pendingin kondensor pada *Distributed Control System* (DCS). Hasil perhitungan yang didapatkan pada penelitian ini menunjukkan bahwa tekanan pada kondensor berpengaruh pada kenaikan efisiensi dan *heat rate* turbin uap. Dapat dilihat bahwa setiap kenaikan nilai tekanan -1 kPa maka berpengaruh pada rata-rata nilai *heat rate* turbin uap 68.233 kJ/kWh untuk beban 45 MW Netto. Sedangkan untuk nilai efisiensi turbin uap mengalami kenaikan sebesar 0.48% untuk beban 45 MW Netto.

Kata kunci: Tekanan vakum kondensor, *heat rate* turbin, efisiensi turbin

ABSTRACT

The condenser is the main component in Kendari Power Plant which functions as a heat exchanger. The condenser is used to convert low pressure steam from the turbine into water through a condensation process. The condensed water from the condenser will then be heated by a low-pressure heater and a deaerator as a deaeration process before being fed to the boiler. The condenser is the main heat transfer device in PLTU which affects the efficiency of a generator. In October 2021, Kendari Power Plant Unit 2 experienced a decrease in the condenser cooling water flow due to debris from the rubber line pipe that was clogged in the cooling water line filter so that the pressure value in the condenser was reduced. After maintenance and cleaning of the filter on the condenser cooling water line, there is an increase in the condenser vacuum pressure. In this study, to analyze changes in pressure in the condenser to the efficiency and heat rate of a steam turbine using thermodynamic analysis and energy input and output methods. The data analyzed is the actual operational data of Power Plant Kendari-3 before and after cleaning the filter on the condenser cooling water line in the Distributed Control System (DCS). The calculation results obtained in this study indicate that the pressure in the condenser has an effect on increasing the efficiency and heat rate of the steam turbine. It can be seen that each increase in the pressure value of -1 kPa has an effect on the average value of the steam turbine heat rate of 68,233 kJ/kWh for a load of 45 MW Net. Meanwhile, the value of the steam turbine efficiency increased by 0.48% for a load of 45 MW Net.

Keywords: Condenser vacuum pressure, turbine heat rate, turbine efficiency

1. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan pembangkit tenaga listrik yang memanfaatkan uap panas dengan tekanan tinggi untuk menggerakkan turbin uap sehingga dapat membangkitkan energi listrik melalui generator yang terhubung dengan turbin uap [4]. Uap yang dibangkitkan ini berasal dari perubahan fase air pada

boiler akibat proses pembakaran bahan bakar batubara. Batubara disalurkan ke ruang bakar (furnace) yang berfungsi sebagai bahan bakar pembakaran boiler [5][6]. Kemudian pada proses pemanasan boiler terjadi perubahan fasa dari cair ke uap. Selanjutnya uap tersebut digunakan untuk memutar turbin serta generator yang berada dalam satu poros sehingga dapat menghasilkan energi listrik. Energi listrik yang dibangkitkan selanjutnya akan ditransmisikan melalui jaringan interkoneksi dan didistribusikan ke konsumen. Secara garis besar sistem pembangkit listrik tenaga uap terdiri dari beberapa peralatan utama diantaranya pompa, boiler, turbin, dan kondensor [7].

Dalam RUPTL 2015-2024 dijelaskan bahwa adanya pengembangan sarana ketenagalistrikan yang akan dibangun pada kurun waktu tahun 2015–2024 [8]. Berdasarkan program Pemerintah tahun di tahun 2015 – 2019, pada RUPTL 2015-2024 menjelaskan mengenai program peningkatan ketenagalistrikan sebesar 35.000 MW pada periode tahun 2015 – 2019. Dalam RUPTL ini peran listrik swasta merupakan salah satu kunci dalam mendorong dan mempercepat program tersebut dan salah satunya adalah PLTU Kendari-3. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Kendari-3 merupakan salah satu objek vital nasional dan berperan dalam pembangkitan energi listrik yang menyuplai kebutuhan listrik ke PT PLN (Persero). PLTU Kendari-3 melayani suplai listrik area Sulawesi Tenggara dan interkoneksi dengan jaringan 150 kV Grid Makasar. PLTU Kendari-3 memiliki turbin dan generator dengan kapasitas 2x50 MW dengan jenis Turbin Uap –Kondensansi Penuh, dan menggunakan bahan bakar utama batu bara untuk proses pembakaran pada boiler.

Permasalahan yang pernah ada pada PLTU Kendari 3 Unit 2 adalah penurunan debit air pendingin kondensor disebabkan serpihan *rubber line* pipa yang tersumbat pada filter jalur air pendingin Maka dilakukan pemeliharaan dan pembersihan pada filter jalur air pendingin kondensor untuk meningkatkan efisiensi sistem pembangkit listrik dan menciptakan keadaan operasi pembangkit listrik sesuai dengan rencana [9][10]. Setelah dilakukan perawatan serta pembersihan pada jalur air pendingin kondensor, maka tekanan vakum kondensor kembali normal. Nilai tekanan vakum kondensor akan mempengaruhi bagaimana kinerja turbin uap, salah satunya yaitu meningkatkan beban yang dihasilkan dari turbin uap. Tekanan vakum kondensor akan mempengaruhi tingkat pembebanan yang dihasilkan oleh turbin uap [11][12]. Dengan peranan kondensor yang sangat berpengaruh terhadap daya turbin uap, maka pada penelitian ini, akan menganalisa hubungan pengaruh tekanan vakum kondensor terhadap nilai *Heat rate* turbin uap, sehingga dapat diketahui performa turbin uap pada PLTU Kendari-3 unit 2 terhadap nilai *Heat rate* turbin uap.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Unit 2 PLTU Kendari-3, Sulawesi Tenggara pada bulan Desember 2021. Data yang dianalisis adalah data operasional pada DCS bulan 25 Oktober 2021 pada pukul 19:00 – 22:00 dalam beban 45 MW Netto (sebelum dilakukan pemeliharaan) dan 28 Oktober 2021 pada pukul 13:00 – 26:00 dalam beban 45 MW Netto (setelah dilakukan pemeliharaan)

2.2 Pengumpulan Data

Pada penelitian ini menggunakan sumber data operasional harian PLTU Kendari-3 Unit 2 yang dapat diperoleh secara langsung dari Distributed Control System (DCS) serta observasi secara langsung dengan petugas yang berada di PLTU Kendari-3 di bagian Central Control Room (CCR) selama unit beroperasi. Untuk menghitung *Heat rate* Turbin dalam kondisi operasional di PLTU Kendari-3 Unit 2 dibutuhkan parameter sebagai berikut: aliran uap utama, tekanan air umpan, suhu uap utama, entalpi air umpan, tekanan uap utama, suhu uap utama, entalpi uap utama, tekanan *spray water*, aliran air umpan, entalpi *spray water*, suhu uap utama, daya generator.

Properti yang digunakan untuk mencari nilai entalpi adalah aplikasi *SteamTab*. Pada aplikasi *SteamTab* penulis memasukkan data nilai tekanan, suhu dan fase air atau uap untuk mendapatkan nilai entalpi yang dibutuhkan. Apabila nilai Entalpi telah didapatkan maka selanjutnya dapat melakukan perhitungan *heat rate* menggunakan Persamaan 1. Nilai *heat rate* yang dihitung berdasarkan beban 45 MW Netto, pada kondisi sebelum dan sesudah perawatan. Berdasarkan hasil tersebut akan diketahui perbandingan nilai *heat rate* terhadap tekanan vakum kondensor pada beban 45 MW Netto. Gambar 1 merupakan tampilan aplikasi *SteamTab*.



Gambar 1. Aplikasi Steamtab

2.3 Perhitungan Heat rate Turbin

Turbine *Heat rate* merupakan total kalor yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi listrik per kilo Watt jam (kWh). Dan dinyatakan dalam (kJ/kWh) [13][14]. Nilai *heat rate* turbin yang dihitung dengan pembebanan 45 MW Netto, pada kondisi sebelum dan sesudah pemeliharaan. Berdasarkan hasil tersebut akan diketahui perbandingan nilai *heat rate* terhadap tekanan vakum kondensor pada beban 45 MW. *Heat rate* Turbin dapat dikalkulasi menggunakan Persamaan 1 [15].

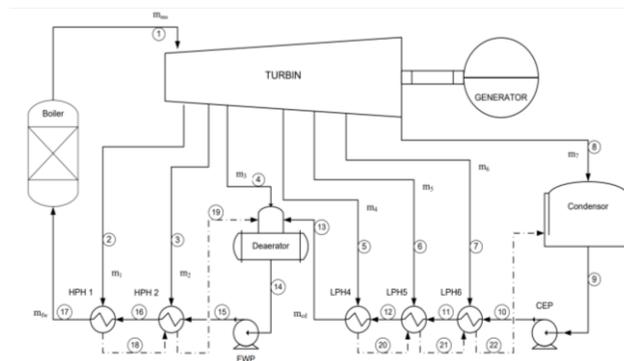
$$HR = \frac{\dot{m}_{ms} \cdot h_{ms} - \dot{m}_{fw} \cdot h_{fw} - \dot{m}_{spray} \cdot h_{spray}}{P_g} \quad (1)$$

Dimana,

- HR : *heat rate* turbin [kJ/kWh]
- \dot{m}_{ms} : aliran uap utama [t/h]
- h_{ms} : entalpi uap utama [kJ/kg]
- \dot{m}_{fw} : aliran air umpan [t/h]
- h_{fw} : entalpi air umpan [kJ/kg]
- \dot{m}_{spray} : aliran *spray water* [t/h]
- H_{spray} : entalpi *spray water* [kJ/kg]
- P_g : daya keluaran generator [kW]

2.4 Perhitungan Efisiensi Turbin Uap

Efisiensi pada turbin uap ditentukan berdasarkan Diagram Kalor dan Neraca Massa. Berikut merupakan Diagram Kalor dan Neraca Massa di PLTU Kendari-3 Unit 2 yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Kalor dan Neraca Massa PLTU Kendari-3

Untuk menentukan energi yang masuk pada turbin, maka terlebih dahulu menghitung energi pada satuan waktu atau daya (Q) dalam proses pembakaran boiler menggunakan persamaan 2 [9].

$$Q = (\dot{m}_{ms} \cdot h_{ms}) - (\dot{m}_{fw} \cdot h_{fw}) \quad (2)$$

Dimana:

- Q : daya pada boiler [kJ/h]
- \dot{m}_{ms} : aliran uap utama [t/h]
- h_{ms} : entalpi uap utama [kJ/kg]
- \dot{m}_{fw} : aliran air umpan [t/h]
- h_{fw} : entalpi air umpan [kJ/kg]

Pada siklus operasional PLTU, pompa yang beroperasi terdiri dari *Condensate Extraction Pump* (CEP) untuk memompa air kondensat keluaran kondensor dan *Boiler Feedwater Pump* (BFWP) sebagai umpan air ke boiler. Untuk menentukan nilai daya pada pompa (W_p) maka dilakukan perhitungan menggunakan persamaan 3 [9].

$$W_p = (\dot{m}_{out} \cdot h_{out}) - (\dot{m}_{in} \cdot h_{in}) \quad (3)$$

Dimana:

- W_p : daya pada pompa [kJ/h]
- \dot{m}_{in} : aliran masuk pompa [t/h]
- h_{in} : entalpi masuk pompa [kJ/kg]
- \dot{m}_{out} : aliran keluar pompa [t/h]
- h_{out} : entalpi keluar pompa [kJ/kg]

Untuk menentukan daya turbin uap maka, didapatkan turunan persamaan 4 dari diagram kalor dan neraca massa PLTU Kendari-3 yang terdapat pada Gambar 2:

$$W_{Turbin} = \dot{m}_{ms}(h_1 - h_2) + (\dot{m}_{ms} - \dot{m}_1)(h_2 - h_3) + (\dot{m}_{ms} - \dot{m}_1 - \dot{m}_2)(h_3 - h_4) + (\dot{m}_{ms} - \dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3)(h_4 - h_5) + (\dot{m}_{ms} - \dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_4)(h_5 - h_6) + (\dot{m}_{ms} - \dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_4 - \dot{m}_5)(h_6 - h_7) + (\dot{m}_{ms} - \dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_4 - \dot{m}_5 - \dot{m}_6)(h_7 - h_8) \quad (4)$$

Dimana:

- W_{Turbin} : daya Turbin [kJ/h]
- \dot{m} : aliran uap [t/h]
- h : entalpi [kJ/kg]

Persamaan 5 merupakan formula untuk mencari nilai efisiensi turbin uap. Data yang dibutuhkan adalah daya dari boiler, daya pada turbin dan daya pada pompa. Berikut adalah perhitungan efisiensi turbin uap [9]:

$$\eta_{turbin} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} = \frac{W_{turbin} - W_{pompa}}{Q_{boiler}} \quad (5)$$

Dimana:

- η_{turbin} : efisiensi turbin [%]
- W_{turbin} : daya pada turbin [kJ/h]
- W_{pompa} : daya pada pompa [kJ/h]
- Q_{in} : daya pada boiler [kJ/h]

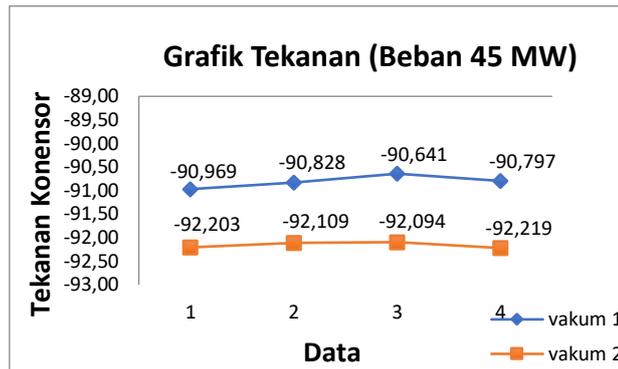
Setelah data parameter yang telah dibutuhkan telah diambil dan dihitung dalam perhitungan *heat rate* dan efisiensi turbin, hasil data akan disajikan dalam bentuk table dan kemudian dianalisis. Hasil data yang disajikan dalam bentuk tabel, selanjutnya akan diproyeksikan kedalam bentuk grafik untuk memberikan informasi antara perbandingan nilai tekanan vakum kondensor, *heat rate* turbin dan efisiensi turbin pada beban 45 MW Netto.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari penelitian ini ditampilkan dalam bentuk grafik. Grafik tersebut memberikan informasi mengenai hubungan kenaikan nilai tekanan vakum kondensor terhadap efisiensi turbin dan *heat rate* turbin. Dalam penelitian ini membandingkan kondisi sebelum dilakukannya pemeliharaan dan pembersihan filter pada jalur air pendingin kondensor dan sesudah dilakukannya pemeliharaan dan pembersihan. Data yang diteliti adalah data dengan beban 45 MW Netto.

3.1 Kenaikan Nilai Tekanan Vakum Kondensor

Nilai tekanan vakum kondensor mengalami kenaikan setelah dilakukannya proses pemeliharaan, berikut ini grafik perbandingan nilai tekanan sebelum dan sesudah pemeliharaan yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik perbandingan nilai tekanan vakum kondensor pada beban 45 MW Netto

Pada Gambar 3 terdapat “vakum 1” yang menunjukkan kondisi sebelum dilakukannya pemeliharaan dan pembersihan, sedangkan “vakum 2” sesudah dilakukannya pemeliharaan dan pembersihan pada beban 45 MW Netto. Kenaikan nilai tekanan vakum kondensor ini merupakan hasil dari kegiatan pemeliharaan dan pembersihan jalur inlet air pendingin kondensor yang sebelumnya terdapat banyak sobekan *rubber line* yang tersangkut pada filter inlet air pendingin kondensor sehingga menghalangi atau mengurangi debit air pendingin. Pada beban 45 MW Netto, nilai kenaikan rata-rata sebesar -1.348 kPa, dengan nilai tertinggi adalah -92.219 kPa.

3.2 Pengaruh Tekanan Terhadap *Heat rate* Turbin

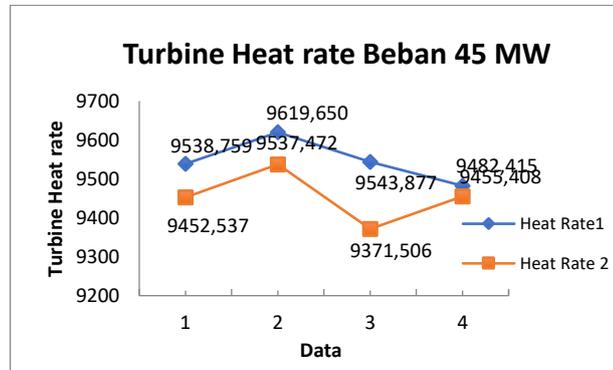
Tekanan vakum kondensor mempengaruhi nilai dari *heat rate* turbin. Berikut merupakan data hasil perhitungan *heat rate* turbin sebelum dan sesudah pemeliharaan yang ditabulasikan dengan nilai tekanan vakum kondensor dalam Tabel 1.

Tabel 1. Hasil perhitungan nilai *heat rate* turbin pada beban 45 MW Netto

Turbine <i>Heat rate</i> Beban 45 MW Netto			
Sebelum Pemeliharaan		Sesudah Pemeliharaan	
Tekanan	THR	Tekanan	THR
kPa	kJ/kWh	kPa	kJ/kWh
-90.969	9538.759	-92.203	9452.537
-90.828	9619.650	-92.109	9537.472
-90.641	9543.877	-92.094	9371.506
-90.797	9482.415	-92.219	9455.408
-90.809	9546.175	-92.156	9454.231

Berdasarkan data yang ditampilkan pada Tabel 1 menunjukkan bahwa pada kondisi sesudah pemeliharaan adanya penurunan dari nilai *heat rate* turbin. Kondisi penurunan nilai *heat rate* turbin didukung dengan nilai rata-rata *heat rate* turbin pada kondisi keempat data pada Tabel 1. Sebelum dilakukannya pemeliharaan rata-rata *heat rate* turbin 9546.175 kJ/kWh, sedangkan nilai *heat rate* turbin turun menjadi 9454.231 kJ/kWh setelah dilakukannya pemeliharaan.

Data yang disajikan pada Tabel 1, selisih rata rata heat turbin setelah pemeliharaan dan sebelum pemeliharaan dilakukan memiliki selisih 91.945 kJ/kWh dan rata rata selisih tekanan vakum kondensor setelah pemeliharaan dan sebelum pemeliharaan dilakukan memiliki selisih -1.348 kPa. Jadi dengan naiknya tekanan vakum kondensor sebesar -1.348 kPa, mengakibatkan *Heat rate* turbin mengalami penurunan sebesar 91.945 kJ/kWh dan untuk kenaikan tekanan vakum kondensor sebesar -1 kPa PLTU Kendari-3 Unit 2 menyebabkan *Heat rate* turbin mengalami penurunan sebesar 68.233 kJ/kWh.



Gambar 4. Grafik perbandingan nilai heat rate pada beban 45 MW Netto

Pada Gambar 4 menunjukkan grafik *heat rate* turbin, terdapat “*heat rate 1*” yang menunjukkan kondisi sebelum dilakukannya pemeliharaan dan “*heat rate 2*” yang menunjukkan kondisi sesudah dilakukannya pemeliharaan. Dapat dilihat bahwa adanya penurunan *heat rate* setelah dilakukan pemeliharaan. Penurunan *heat rate* ini menunjukkan bahwa performa turbin uap pada PLTU Kendari-3 semakin efisien. Dengan kenaikan pada tekanan vakum kondensor maka akan mempengaruhi parameter utama diantaranya aliran uap utama, tekanan uap utama dan beban yang dibangkitkan, sehingga mempengaruhi entalpi dari air umpan dan uap utama yang digunakan sebagai energi untuk menggerakkan turbin. Apabila aliran uap utama memiliki nilai yang sama akan tetapi tekanan vakum kondensor mengalami perubahan maka akan mengakibatkan perubahan terhadap besarnya energi yang dihasilkan..

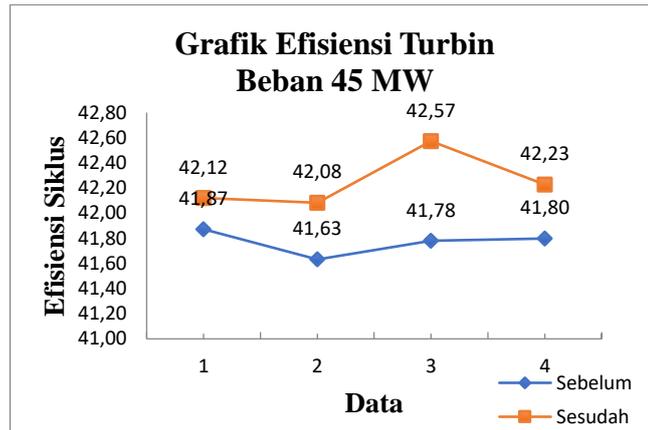
3.3 Pengaruh Tekanan Terhadap Efisiensi Turbin Uap

Efisiensi turbin uap dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 5 dan ditentukan dengan metode input-output dari kesetimbangan energi pada Diagram Kalor dan Neraca Massa. Tabel 2 merupakan hasil perhitungan nilai efisiensi uap terhadap tekanan vakum kondensor sebelum dan setelah dilakukan pemeliharaan pada beban 45 MW Netto.

Tabel 2. Hasil perhitungan nilai efisiensi turbin pada beban 45 MW Netto

Hasil Perhitungan Efisiensi Turbin Beban 45 MW			
Sebelum Pemeliharaan		Setelah Pemeliharaan	
Vacuum	Efisiensi	Vacuum	Efisiensi
kPa	%	kPa	%
-90.969	41.87	-92.203	42.12
-90.828	41.63	-92.109	42.08
-90.641	41.78	-92.094	42.57
-90.797	41.80	-92.219	42.23
-90.809	41.77	-92.156	42.25

Berdasarkan data yang tersaji pada Tabel 2, terjadi kenaikan nilai efisiensi turbin pada beban 45 MW Netto pada kondisi setelah dan sebelum pemeliharaan. Efisiensi turbin rata rata pada beban 45 MW netto mengalami kenaikan 0,48%, dengan efisiensi turbin sebelum pemeliharaan 41,77% dan setelah pemeliharaan menjadi 42,25%. Efisiensi turbin mengalami peningkatan dikarenakan dilakukan pemeliharaan serta pembersihan filter pada jalur air pendingin kondensor.



Gambar 5. Grafik perbandingan efisiensi pada beban 45 MW Netto

Gambar 5 menunjukkan grafik efisiensi turbin, terdapat “sebelum” yang menunjukkan kondisi sebelum dilakukannya pemeliharaan dan “sesudah” yang menunjukkan kondisi sesudah dilakukannya pemeliharaan. Dapat dilihat bahwa adanya kenaikan efisiensi setelah dilakukan pemeliharaan. Kenaikan nilai tekanan vakum kondensor akan mempengaruhi parameter operasi pada siklus turbin uap, hal ini akan berpengaruh terhadap hasil nilai efisiensi turbin. Parameter operasi pada siklus turbin uap yakni: aliran uap utama, laju aliran ekstraksi turbin, suhu pada air kondensat, suhu pada air umpan, beban yang dapat dibangkitkan, dan suhu exhaust turbin uap. Parameter yang berubah akan mempengaruhi nilai energi setiap waktunya pada turbin, pompa dan boiler sehingga akan mempengaruhi performa efisiensi turbin uap [11].

4. KESIMPULAN

Setelah dilakukan pemeliharaan dan pembersihan pada filter jalur air pendingin kondensor maka mengalami kenaikan tekanan vakum kondensor. Dengan adanya perubahan pada tekanan vakum kondensor maka mempengaruhi nilai *heat rate* turbin dan nilai efisiensi turbin. Pada beban 45 MW Netto rata rata nilai tekanan vakum kondensor meningkat dari -90.809 kPa menjadi -92.156 kPa, mengakibatkan nilai *heat rate* turbin turun dari 9546.175 kJ/kWh menjadi 9454.231 kJ/kWh. Sedangkan pada beban 45 MW dengan nilai rata-rata tekanan vakum kondensor yang mengalami kenaikan dari -90.809 kPa menjadi -92.156 kPa mengakibatkan kenaikan efisiensi siklus turbin uap dari 41.77% menjadi 42.25 %. Jadi nilai tekanan vakum kondensor harus selalu dijaga karena berpengaruh terhadap *heat rate* dan efisiensi turbin uap

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Marsudi. (2011). *Pembangkitan Energi Listrik*. Jakarta: Erlangga.
- [2] A. J. Mahvi, T. Kunke, R. V. Crystal, and S. Garimella. 2021. “Enhanced power plant air-cooled condensers using auto-fluttering reeds.” *Appl. Therm. Eng.* Vol. 193, no. January, p. 116956. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116956.
- [3] A. Jamil *et al.* 2021 “Multiparametric optimization for reduced condenser cooling water consumption in a degraded combined cycle gas turbine power plant from a water-energy nexus perspective.” *Appl. Energy*. Vol. 304, no. April, p. 117764. doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117764.
- [4] D. Marsudi. (2006). *Operasi Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- [5] M. Panchala Reddy, A. Shankar Singh, V. Mahendra Reddy, A. Elwardany, and H. Reddy. 2021. “Computational analysis of influence of particle size, oxygen concentration, and furnace temperature on the ignition characteristics of pulverized high ash and high moisture coal particle.” *Alexandria Eng. J.*, Doi: 10.1016/j.aej.2021.11.047.
- [6] Y. F. Wang *et al.* 2020. “Fuzzy modeling of boiler efficiency in power plants.” *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 542, pp. 391–405. Doi: 10.1016/j.ins.2020.06.064.
- [7] O. J. Khaleel, T. K. Ibrahim, F. B. Ismail, A. T. Al-Sammarraie, and S. H. bin A. Hassan. 2022. “Modeling

- and analysis of optimal performance of a coal-fired power plant based on exergy evaluation.” *Energy Reports*. Vol. 8, pp. 2179–2199. Doi: 10.1016/j.egy.2022.01.072.
- [8] *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2015-2024*. Jakarta, Indonesia: PT PLN (Persero), 2014.
- [9] P. K. Nag. (2002). *Power Plant Engineering*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- [10] J. Li, Z. Zhai, J. Wang, and S. Huang. 2016. “On-line fouling monitoring model of condenser in coal-fired power plants.” *Appl. Therm. Eng.* Vol. 104, pp. 628–635. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.04.131.
- [11] B. A. Saputro. 2021. “Analisis Pengaruh Perubahan Tekanan Vakum Kondensor Terhadap *Heat rate*.” Vol. 6, no. 1, pp. 18–26.
- [12] H. Zeng, J. Meng, and Z. Li. 2012. “Numerical study of a power plant condenser tube arrangement” *Appl. Therm. Eng.* Vol. 40, pp. 294–303. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.02.028.
- [13] S. M. Simanjuntak. 2017. “Studi Pengaruh Operating *Heat rate* Terhadap Efisiensi Kinerja Pltu Labuhan Angin Sibolga.” pp. 1–54.
- [14] P. Niu, K. Chen, Y. Ma, X. Li, A. Liu, and G. Li. 2016. “Model turbine *heat rate* by fast learning network with tuning based on ameliorated krill herd algorithm.” *Knowledge-Based Syst.* Vol. 118, pp. 80–92. Doi: 10.1016/j.knosys.2016.11.011.
- [15] *Procedures for Routine Performance Tests of Steam Turbines*, ASME PTC 6. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1998.