

ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN NILAI KEVAKUMAN KONDENSOR TERHADAP EFISIENSI TURBIN UAP

Yeyet Handayani¹; Fachruddin; Candra Damis Widiawati

Program Studi Pembangkit Tenaga Listrik, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta

Jalan Prof. Dr. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok 16425

¹yeyeth49@gmail.com

Abstrak

Kondensor merupakan alat penukar kalor atau biasa disebut dengan heat exchanger yang berfungsi untuk mengondensasi uap kerja keluaran dari Low Pressure Turbine menjadi air. Kevakuman kondensor selalu dijaga nilainya karena perubahan nilai kevakuman kondensor dapat berpengaruh pada nilai efisiensi turbin uap. Permasalahan yang ada pada pembangkit ini adalah kotornya pipa – pipa kondensor yang ditunjukkan dengan turunnya nilai presentase condenser cleanliness, hingga menyebabkan nilai kevakuman kondensor mendekati tekanan atmosfer dan mengakibatkan penurunan efisiensi turbin uap hingga menyebabkan unit pembangkit trip (mati mendadak). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara efisiensi turbin uap dan tingkat condenser cleanliness terhadap nilai kevakuman kondensor. Metode penelitian yang digunakan adalah dengan mencari nilai efisiensi turbin uap dan condenser cleanliness pada 01 Februari 2017, 24 Februari 2017, 20 Maret 2018, dan 23 Maret 2018 saat masing – masing nilai kevakuman kondensor dan daya aktual turbin uap sebesar -707.9 [mmHg gauge] dan 215.7 [MW], -696.5 [mmHg gauge] dan -2.52 [MW], -705.1 [mmHg gauge] dan 211.14 [MW], serta -703.8 [mmHg gauge] dan 201.87 [MW] dengan menggunakan persamaan yang didapat dari Performance Calculation Formula dari Mitsubishi Heavy Industry LTD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi terbaik turbin uap berada pada saat nilai condenser cleanliness sebesar 61.01% dan nilai kevakuman kondensor -707.9 [mmHg gauge], yaitu sebesar 30.97% dengan beban aktual turbin uap sebesar 215.7 [MW], sedangkan nilai efisiensi terendah turbin uap berada saat nilai condenser cleanliness 25.39% dan nilai kevakuman kondensor -696.5 [mmHg gauge], yaitu -0.91% dengan daya yang dihasilkan -2.52 [MW]. Nilai negatif pada daya yang dihasilkan turbin ini menunjukkan bahwa unit pembangkit mengalami trip.

Kata kunci : Kevakuman kondensor; efisiensi turbin uap, condenser cleanliness

Abstract

Condenser is a heat exchanger used to condense the steam from Low Pressure Turbine into water. The condenser vacuum is always maintained within a given range provided by the manufacturer because condenser vacuum greatly affects the value of efficiency of steam turbine. The problem in this plant was that the pipes in the condenser were dirty which shown by the declining percentage of condenser cleanliness and it caused the value of condenser vacuum approach atmospheric pressure that made the generating unit shut down. This study was to analyze the relationship among steam turbine efficiency and the percentage of condenser cleanliness to the values of condenser vacuum. This research method was to find the efficiency of steam turbine and the percentage of condenser cleanliness on February 01 2017, February 24 2017, March 20 2018, and March 23 2018 when the values of condenser vacuum and steam turbine actual load were -707.9 [mmHg gauge] and 215.7 [MW], -696.5 [mmHg gauge] and -2.52 [MW], -705.1 [mmHg gauge] and 211.14 [MW], and -703.8 [mmHg gauge] and 201.87 [MW] using Performance Calculation Formula from Mitsubishi Heavy Industry LTD. The results showed that the best efficiency of steam turbine was 30.97% when the condenser vacuum was -707.9 [mmHg], the steam turbine actual load was 215.7 [MW], and the percentage of condenser cleanliness was 61.01%. The lowest efficiency of steam turbine was -0.91% when the condenser vacuum was -696.5 [mmHg], the steam turbine actual load was -2.52 [MW], and the percentage of condenser cleanliness was 25.39%. the negative value of steam turbine actual load indicated that the generating unit shut down.

Keywords: Condenser vacuum, steam turbine efficiency, condenser cleanliness

NOMENKLATUR

G_{HP}	= Massa aliran uap utama HP [t/h]	G_{LP}	= Massa aliran uap LP [t/h]
G_{HP1}	= HRSG 1 HP Steam Flow [t/h]	$G_{HRSG1LP}$	= HRSG 1 LP Steam Flow [t/h]
G_{HP2}	= HRSG 2 HP Steam Flow [t/h]	$G_{HRSG2LP}$	= HRSG 2 LP Steam Flow [t/h]
G_{HPBFP}	= HP Feed Water Pump Flow [t/h]	G_{CRH}	= Massa aliran uap CRH [t/h]
$G_{FWP HP A}$	= Flow FWP A menuju HP ECO [t/h]	$G_{HP CALC}$	= HP Steam Flow Calculation [t/h]
$G_{FWP HP B}$	= Flow FWP B menuju HP ECO [t/h]	G_{LEAK}	= HP Leakage Flow [t/h]
$G_{FWP HP C}$	= Flow FWP C menuju HP ECO [t/h]	H_{ST}	= Steam Turbine Heat Input [MW]
G_{HPDSH1}	= HPDSH 1 [t/h]	MW	= ST Actual Load [MW]

G_{HPDSH2}	= HPDSH 2 [t/h]	KWEL	= Generator Loss [kW]
G_{IPBFP}	= IP Feed Water Pump Flow [t/h]	KWML	= Turbine Mechanical Loss [kW]
$G_{FWP\ IP\ A}$	= Flow FWP A menuju IP ECO [t/h]	H.R.	= Steam Turbine Heat Rate [kJ/kWh]
$G_{FWP\ IP\ B}$	= Flow FWP B menuju IP ECO [t/h]	Q	= Quantity of Heat Transfer [kJ/h]
$G_{FWP\ IP\ C}$	= Flow FWP C menuju IP ECO [t/h]	T_{LM}	= Logarithmic Mean Temperature Difference [°C]
G_{RHDSH1}	= RHDSH 1 [t/h]	T_{SAT}	= Saturate Temperature at Condenser Inner Pressure [°C]
G_{RHDSH2}	= RHDSH 2 [t/h]	T_{CW0}	= Condenser Inlet Circulating Water Temperature [°C]
G_{LPBFP}	= LP Feed Water Pump Flow [t/h]	T_{CW1}	= Condenser Outlet Circulating Water Temperature [°C]
$G_{FWP\ LP\ A}$	= Flow FWP A menuju LP ECO [t/h]	A	= Condenser Surface Area To Be Cooled [m ²]
$G_{FWP\ LP\ B}$	= Flow FWP B menuju LP ECO [t/h]	KA	= Heat Transfer Coefficient (Actual Value) [W/m ² °C]
$G_{FWP\ LP\ C}$	= Flow FWP C menuju LP ECO [t/h]	KD	= Heat Transfer Coefficient (Design Value) [W/m ² °C]
η	= Efisiensi Turbin Uap		

I. PENDAHULUAN

Latar Belakang

PLTGU merupakan penggabungan siklus antara siklus Brayton PLTG dan siklus Rankine PLTU. Siklus gabungan ini memiliki efisiensi termal yang lebih tinggi dibandingkan dengan siklus PLTU dan PLTG yang terpisah [1]. Salah satu peralatan utama pada PLTGU adalah kondensator. Kondensator adalah peralatan utama pada sistem turbin uap yang berfungsi untuk mengubah uap menjadi air. Proses perubahannya dilakukan dengan cara mengalirkan uap ke dalam suatu ruangan yang berisi pipa - pipa (*tubes*). Uap mengalir di luar pipa-pipa, sedangkan air sebagai pendingin mengalir di dalam pipa-pipa. Kondensator seperti ini disebut *surface (tubes) condenser*. Sebagai pendingin, biasanya digunakan air sungai atau air laut [2]. Kondensator turbin uap (*Steam Turbine Condenser*) berperan penting dalam siklus PLTU. Kinerja kondensator dapat dilihat dari beberapa parameter, seperti temperatur air pendingin pada sisi inlet kondensator, laju aliran massa air pendingin, dan tekanan uap [3].

Permasalahan yang ada pada PLTGU Cilegon adalah sering terjadinya perubahan nilai kevakuman kondensator yang sangat signifikan, pada penelitian ini nilai kevakuman kondensator berkisar antara -696.5 [mmHg gauge] sampai dengan -707.9 [mmHg gauge]. Hal ini mengakibatkan penurunan efisiensi dan daya yang dihasilkan oleh turbin uap. Seperti yang terjadi pada tanggal 24 Februari 2017 pukul 20:20 WIB, unit PLTGU Cilegon mengalami trip selama kurang lebih 6 jam sampai dengan 25 Februari 2017 pukul 2:45 WIB.

Penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Ardhito menyatakan bahwa laju perpindahan panas yang besar sebanding dengan nilai efektivitas kondensator, ketika laju perpindahan panas besar, maka nilai efektivitas kondensator akan meningkat, sedangkan hal tersebut berbanding terbalik dengan nilai tekanan vakum kondensator yang semakin rendah. Tetapi, bila nilai kevakuman kondensator terlalu rendah dan tidak sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan oleh pabrikan, maka hal ini akan menyebabkan nilai efektivitas kondensator menurun, sehingga daya yang dihasilkan oleh turbin uap pun menurun [4]. Sukarno, A., dkk hasil penelitian pada analisis perubahan tekanan vakum kondensator terhadap kinerja kondensator di PLTU Tanjung Jati B Unit I menunjukkan bahwa kondensator akan bekerja maksimal dengan kisaran tekanan vakum kondensator antara 72 – 83 mbar absolute karena pada tekanan vakum 72 – 83 mbar absolute perpindahan panas (proses kondensasi) antara uap dan air berlangsung secara maksimal, sehingga uap akan sepenuhnya berubah fasa menjadi air yang nantinya akan digunakan sebagai air umpan. Kinerja terbaik kondensator didapat saat nilai efektivitas kondensator tinggi dengan laju perpindahan panas yang tinggi, dan dengan tekanan vakum yang berada pada kisaran yang telah ditentukan [5]. Kedua penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa perubahan nilai kevakuman kondensator memengaruhi daya yang dihasilkan oleh turbin uap.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa hubungan antara kevakuman kondensator dan persentase *condenser cleanliness* terhadap efisiensi turbin uap.

II. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang dilakukan mula-mula adalah dengan melakukan pengumpulan data dengan membaca *manual book*, referensi dari perpustakaan, wawancara serta mendokumentasikan secara langsung objek-objek yang sedang diamati. Pengumpulan data dilakukan di PLTGU Cilegon. Data yang diambil adalah data operasi pada tanggal 01 Februari 2017, 24 Februari 2017, 20 Maret 2018, dan 23 Maret 2018. Parameter-parameter data yang diambil meliputi.

- a. Data Pengukuran Tekanan
 - Tekanan uap HP [bar]
 - Tekanan uap CRH [bar]
 - Tekanan uap HRH [bar]
 - Tekanan uap masuk turbin LP [bar]
 - Tekanan air kondensat [bar]
- b. Data Pengukuran Temperatur
 - Temperatur uap HP [°C]
 - Temperatur uap CRH [°C]
 - Temperatur uap HRH [°C]
 - Temperatur uap masuk turbin LP [°C]
 - Temperatur air kondensat [°C]
 - *Saturate temperature at condenser inner pressure* [°C]
 - *Condenser inlet circulating water temperature* [°C]
 - *Condenser outlet circulating water temperature* [°C]
- c. Data Pengukuran *Steam Flow*
 - HRSG 1 HP *steam flow* [t/h]
 - HRSG 2 HP *steam flow* [t/h]
 - *Condensate flow* [t/h]
 - Flow FWP A menuju HP ECO [t/h]
 - Flow FWP B menuju HP ECO [t/h]
 - Flow FWP C menuju HP ECO [t/h]
 - HPDSH *flow* 1 [t/h]
 - HPDSH *flow* 2 [t/h]
 - Flow FWP A menuju IP ECO [t/h]
 - Flow FWP B menuju IP ECO [t/h]
 - Flow FWP C menuju IP ECO [t/h]
 - RHDSH *flow* 1 [t/h]
 - RHDSH *flow* 2 [t/h]
 - Flow FWP A menuju LP ECO [t/h]
 - Flow FWP B menuju LP ECO [t/h]
 - HRSG 1 LP *steam flow* [t/h]
 - HRSG 2 LP *steam flow* [t/h]
- d. Data Pengukuran Kevakuman Kodensor [mmHg]
- e. Data *Steam Turbine Actual Load* [MW]
- f. *Turbine Mechanical Loss* [kW]
- g. *Number of Closed Tube*
- h. *Condenser Surface Area To Be Cooled* [m²]
- i. *Heat Transfer Coefficient (Standard Value)* [W/m²°C]

Setelah data terkumpul, selanjutnya data diolah dengan menghitung efisiensi turbin uap dan *condenser cleanliness* dengan berdasarkan pada perhitungan menggunakan *Performance Calculation Formula* dari *Mitsubishi Heavy Industry* [6].

- a. Efisiensi Turbin Uap

$$\eta = \frac{MW}{H_{ST}} \times 100\% \quad [1]$$

Namun, sebelum menghitung efisiensi turbin uap dengan menggunakan persamaan [1] di atas, sebelumnya harus menghitung massa aliran uap utama HP, HP *feed water pump flow*, IP *feed water pump flow*, LP *feed water pump flow*, massa aliran uap IP (*IP SteamFlow Calculation*), massa aliran uap LP, HP *steam flow calculation*, HP *leakage flow*, massa aliran uap CRH, massa aliran uap HRH, dan *steam turbine heat input*. Berikut adalah rumus-rumus yang digunakan.

- Massa Aliran Uap Utama HP

$$G_{HP} = G_{HP1} + G_{HP2} \quad [2]$$

- HP Feed Water Pump Flow

$$G_{HPBFP} = G_{FWPHPA} + G_{FWPHPB} + G_{FWPHPC} + G_{HPDSH1} + G_{HPDSH2} \quad [3]$$

- IP Feed Water Pump Flow

$$G_{IPBFP} = G_{FWPIP A} + G_{FWPIP B} + G_{FWPIP C} + G_{RHDSH1} + G_{RHDSH2} \quad [4]$$

- LP Feed Water Pump Flow

$$G_{LPBFP} = G_{FWPLPA} + G_{FWPLPB} + G_{FWPLPC} \quad [5]$$

- Massa Aliran Uap IP (*IP SteamFlow Calculation*)

$$G_{IP} = G_{CW} \times \frac{G_{IPBFP}}{G_{HPBFP} + G_{IPBFP} + G_{LPBFP}} \quad [6]$$

- Massa Aliran Uap LP

$$G_{LP} = G_{HRSG1LP} + G_{HRSG2LP} \quad [7]$$

- HP Steam Flow Calculation

$$G_{HPCALC} = G_{CW} \times \frac{G_{HPBFP}}{G_{HPBFP} + G_{IPBFP} + G_{LPBFP}} \quad [8]$$

- HP Leakage Flow

$$G_{LEAK} = 1.4797 \times 10^{-8}(x)^2 + 1.0555 \times 10^{-2}(x) + 8.1584 \times 10^3 \quad [9]$$

- Massa Aliran Uap CRH

$$G_{CRH} = G_{HPCALC} - G_{LEAK} \quad [10]$$

- Massa Aliran Uap HRH

$$G_{HRH} = G_{IP} + G_{CRH} \quad [11]$$

- Steam Turbine Heat Input

$$H_{ST} = ((H_{HP} \times G_{HP}) + (H_{HRH} \times G_{HRH}) + (H_{LP} \times G_{LP}) - (H_{CRH} \times G_{CRH}) - (H_{CW} \times G_{CW})) \times 1000 \quad [12]$$

b. *Condenser Cleanliness*

$$CF = \frac{KA}{KD} \times 100\% \quad [13]$$

Sebelum menghitung nilai *Condenser Cleanliness* dengan persamaan [13] di atas, sebelumnya harus menghitung nilai *generator loss*, *steam turbine heat rate*, *quantity of heat rate*, *logarithmic mean temperature difference*, dan *heat transfer coefficient (actual value)*. Berikut adalah rumus-rumus yang digunakan.

- Generator Loss

$$KWEL = 0.0193x^2 + 1.2963x + 1490.4 \quad [14]$$

- *Steam Turbine Heat Rate*

$$H. R. = \frac{MW}{H_{ST} \times 1000} \quad [15]$$

- *Quantity of Heat Rate*

$$Q = ((H. R. \times MW \times 1000) - ((MW \times 1000) + KWML + KWEL)) \times 3600 \quad [16]$$

- *Logarithmic Mean Temperature Difference*

$$T_{LM} = \frac{(T_{SAT} - T_{CW \downarrow}) - (T_{SAT} - T_{CW \uparrow})}{\ln\left(\frac{(T_{SAT} - T_{CW \downarrow})}{(T_{SAT} - T_{CW \uparrow})}\right)} \quad [17]$$

- *Heat Transfer Coefficient (Actual Value)*

$$KA = \frac{Q \times 0.23885 \times 1.163}{T_{LM} \times A} \quad [18]$$

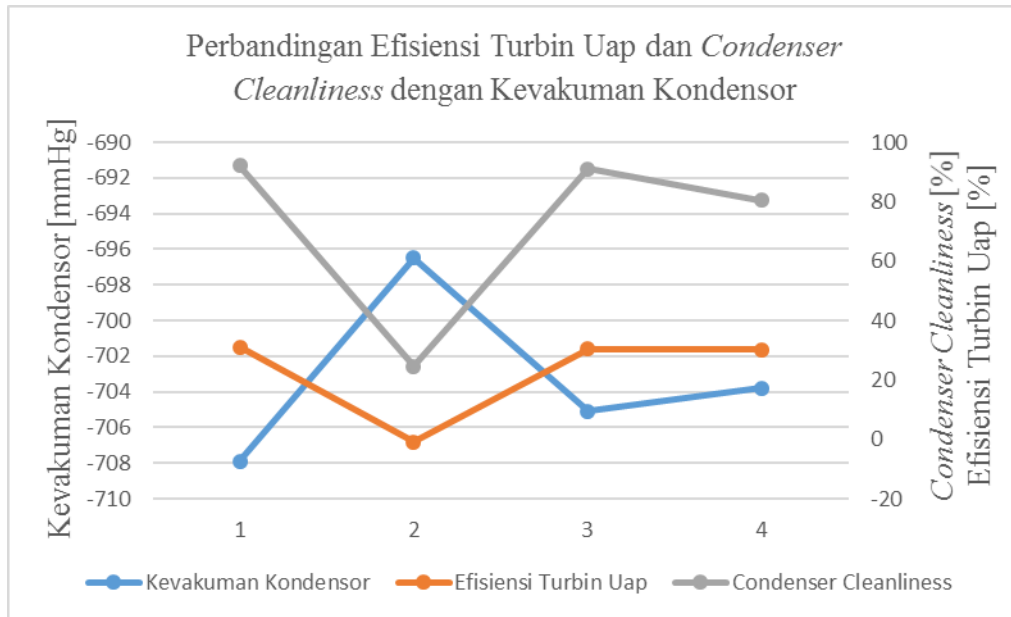
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengolahan data dinyatakan dalam bentuk tabel dan grafik yang menggambarkan hubungan antara kevakuman kondensor dengan efisiensi turbin uap, daya aktual turbin uap, dan *condenser cleanliness* seperti di bawah ini.

Tabel.1 Data 01 Februari 2017, 24 Februari 2017, 20 Maret 2018, dan 23 Maret 2018

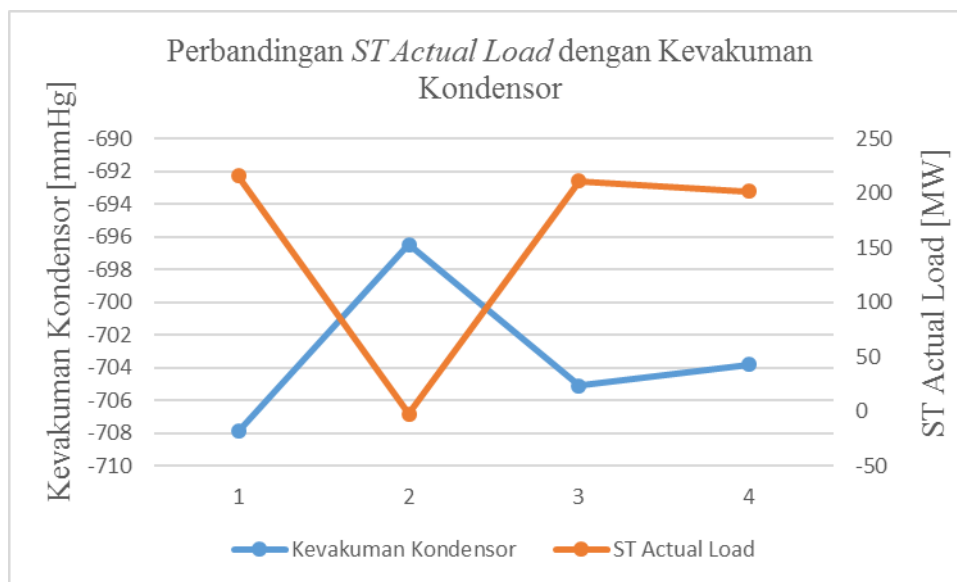
Kode	Nama	Satuan	Ket	01/02/2017	24/02/2017	20/03/2018	23/03/2018
PCW	Kevakuman Kondensor	mmHg gauge	Input	-707.9	-696.5	-705.1	-703.8
MW	<i>ST Actual Load</i>	MW	Input	215.7	-2.52	211.14	201.87
η	<i>Steam Turbine Efficiency</i>	%	Kalkulasi	31.9	-0.91	30.43	30.09
CF	<i>Condenser Cleanliness</i>	%	Kalkulasi	61.07	25.39	60.69	50.38

Pada tabel terlihat bahwa nilai kevakuman kondensor didapatkan dari alat ukur tekanan. Kevakuman kondensor pada tanggal 01 Februari 2017, 24 Februari 2017, 20 Maret 2018, dan 23 Maret 2018 berturut-turut adalah sebesar -707.9 [mmHg gauge], -696.5 [mmHg gauge], -705.1 [mmHg gauge], dan -703.8 [mmHg gauge]. Daya aktual turbin uap pada tanggal 01 Februari 2017, 24 Februari 2017, 20 Maret 2018, dan 23 Maret 2018 berturut-turut adalah sebesar 215.7 [MW], -2.52 [MW], 211.14 [MW], dan 201.87 [MW]. Efisiensi turbin uap didapat dari hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan [1]. Efisiensi turbin uap pada tanggal 01 Februari 2017, 24 Februari 2017, 20 Maret 2018, dan 23 Maret 2018 berturut-turut adalah sebesar 31.9%, -0.91%, 30.43%, dan 30.09%. Nilai *condenser cleanliness* didapat dari hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan [13]. Nilai *condenser cleanliness* pada tanggal 01 Februari 2017, 24 Februari 2017, 20 Maret 2018, dan 23 Maret 2018 berturut-turut adalah sebesar 61.07%, 25.39%, 60.69%, dan 50.38%. Selanjutnya, data-data yang tertera pada tabel di atas diolah ke dalam bentuk grafik. Hal ini dilakukan untuk membandingkan antara *ST Actual Load*, *Steam Cycle Efficiency*, dan *Condenser Cleanliness* dengan Tekanan Air Kondensat.



Gambar.1 Grafik Perbandingan Efisiensi Turbin Uap dan *Condenser Cleanliness* dengan Kevakuman Kondensor

Grafik di atas menunjukkan hubungan antara efisiensi turbin uap dan *condenser cleanliness* dengan kevakuman kondensor. Efisiensi turbin uap tertinggi berada pada data 1 yang diambil pada 01 Februari 2017, yaitu sebesar 31.9% dengan nilai kevakuman kondensor sebesar -707.9 [mmHg gauge] dan presentase *condenser cleanliness* sebesar 61.07%. Sementara itu, efisiensi turbin uap terendah berada pada data 2 yang diambil pada 24 Februari 2017, yaitu -0.91% dengan nilai kevakuman kondensor sebesar -696.5 [mmHg gauge] dan presentase *condenser cleanliness* 25.39%. Nilai negatif pada data efisiensi menunjukkan bahwa unit pembangkit mengalami trip. Selain itu, grafik menunjukkan bahwa nilai efisiensi turbin uap dan *condenser cleanliness* berbanding terbalik dengan kevakuman kondensor.



Gambar.2 Grafik Perbandingan ST Actual Load dengan Kevakuman Kondensor

Grafik menunjukkan bahwa *ST Actual Load* terbesar berada pada data 1 yang diambil pada 01 Februari 2017, yaitu sebesar 215.7 [MW] dengan nilai kevakuman kondensor sebesar -707.9 [mmHg gauge]. Sementara itu, *ST Actual Load* terendah berada pada data 2 yang diambil pada 24 Februari 2017, yaitu -2.52 [MW] dengan nilai kevakuman kondensor -696.5 [mmHg gauge]. Nilai negatif pada *ST Actual Load* menunjukkan bahwa unit pembangkit mengalami trip. Data seharusnya menunjukkan nilai 0, tetapi karena ada kesalahan ketelitian pada alat ukur, sehingga membuat data bernilai negatif. Grafik ini menunjukkan bahwa *ST Actual Load* berbanding terbalik dengan kevakuman kondensor.

IV. KESIMPULAN

1. Perubahan nilai kevakuman kondensor sangat berpengaruh terhadap efisiensi turbin uap. Hal ini dapat dilihat pada data operasi tanggal 20 Maret 2018 dan 23 Maret 2018, yang menunjukkan nilai kevakuman kondensor dan efisiensi turbin uap secara berturut-turut -705.1 [mmHg gauge] dengan presentase efisiensi turbin uap 30.43% dan -703.8 [mmHg gauge] dengan persentase efisiensi turbin uap yang dihasilkan 30.09%. Dari data tersebut terlihat bahwa terjadi kenaikan kevakuman kondensor sebesar 1.3 [mmHg gauge] yang menyebabkan penurunan efisiensi turbin uap sebesar 0.47%.
2. Perubahan nilai *condenser cleanliness* juga sangat berpengaruh terhadap efisiensi turbin uap. Hal ini terlihat pada data operasi tanggal 01 Februari 2017 dan 24 Februari 2017, yang menunjukkan nilai *condenser cleanliness* dan efisiensi turbin uap berturut-turut 61.07% dengan efisiensi turbin uap sebesar 31.9% dan 25.39% dengan efisiensi turbin uap -0.91%. Alat ukur yang kurang teliti mengakibatkan nilai yang didapat dalam perhitungan adalah minus (-). Seharusnya nilai ini menunjukkan angka 0. Nilai ini menunjukkan bahwa unit pembangkit uap mengalami trip. Dari data tersebut terlihat bahwa penurunan nilai *condenser cleanliness* adalah mencapai 35.68% yang menyebabkan unit pembangkit trip hingga efisiensinya 0%.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Abuelnuor, A.A.A., dkk., Exergy analysis of Garri 2 180 [MW] combined cycle power plant, Sudan, Sudan University of Science, 2017.
- [2]. PLN Corporate University, Dasar Pengoperasian PLTGU Edisi I, Jakarta, PT PLN, 2014.
- [3]. Laskowski, Rafał, Relations for steam power plant condenser performance in off-design conditions in the function of inlet parameters and those relevant in reference conditions, Polandia, Warsaw University of Technology, 2016.
- [4]. Ardhito, Daniswara Dwinata Luke. Analisis Pengaruh Kevakuman Kondensor Terhadap Laju Perpindahan Panas dan Efektivitas Pada Pltu Rembang Unit #10, Yogyakarta, Universitas Gadjah Mada, 2015.
- [5]. Sukarno, A., dkk., Analisis Perubahan Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Kinerja Kondensor di PLTU Tanjung Jati B Unit 1, Semarang, Politeknik Negeri Semarang, 2014.
- [6]. Mitsubishi Heavy Industry, Performance Calculation Formula, 2006, hal. 14-23.