

Perhitungan efektivitas kondensor unit 2 di PLTU pelabuhan tarahan 2x8 MW

Eko Sulistiyono, Nadhif Zaher Ahnaf, Muhammad Ridwan

Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Perusahaan Listrik Negara
Jl. Lkr. Luar Barat Lantai 2, RT.1/RW.1, Duri Kosambi, Kecamatan Cengkareng, Kota Jakarta Barat, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 11750
Email korespondensi: eko.sulistiyono@itpln.ac.id

Abstrak

Kondensor berperan penting dalam mendinginkan uap yang keluar dari turbin dan mengubahnya menjadi air kondensat kembali. Namun, terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi efektivitas kondensor seperti nilai NTU (Number of Transfer Unit), tekanan vakum dan suhu air pendingin, sehingga dapat berdampak signifikan terhadap performa kondensor dan efisiensi kerja PLTU secara keseluruhan. Kajian ini dilaksanakan pada PLTU Pelabuhan Tarahan 2x8 MW. Tujuan kajian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh dan korelasi nilai NTU (Number of Transfer Units), tekanan vakum, dan temperature inlet cooling water terhadap efektivitas kondensor pada PLTU. Metode kajian ini adalah kuantitatif, metode kajian menggunakan wawancara, observasi, dan dokumentasi. Analisis yang digunakan dalam kajian ini menggunakan Analisis Linear berganda. Hasil kajian menunjukkan bahwa nilai NTU (Number of Transfer Units) kurang berpengaruh terhadap efektivitas kondensor dengan nilai R-squared sebesar 0,24. Semakin tinggi nilai NTU (Number of Transfer Units), kemungkinan efektivitas kondensor lebih rendah, selain itu, tekanan vakum berpengaruh terhadap efektivitas kondensor dengan nilai R-squared sebesar 0,74. Semakin tinggi tekanan vakum (semakin negatif), maka efektivitas kondensor akan meningkat, sedangkan suhu inlet cooling water tidak berpengaruh terhadap efektivitas kondensor dengan nilai R-squared sebesar 0,09 karena terdapat beberapa parameter atau faktor lain yang mempengaruhi efektivitas kondensor seperti sirkulasi air pendingin, kebersihan pipa, dan kebersihan dari kondensor itu sendiri.

Kata kunci: kondensor, number of transfer unit, tekanan vakum, suhu inlet cooling water.

Abstract

The condenser plays an important role in cooling the steam coming out of the turbine and turning it into condensate water again. However, there are several factors that can influence the effectiveness of the condenser, such as the NTU (Number of Transfer Unit) value, vacuum pressure and cooling water temperature, so they can have a significant impact on condenser performance and the overall working efficiency of the PLTU. This research was carried out at the Tarahan Harbor 2x8 MW PLTU. The aim of this research was to determine the influence and correlation of the NTU (Number of Transfer Units), vacuum pressure, and inlet cooling water temperature on the effectiveness of the condenser at the PLTU. This research method is quantitative, the research technique uses interviews, observation and documentation. The analysis used in this research uses multiple linear analysis. The research results show that the NTU (Number of Transfer Units) value has little influence on condenser effectiveness with an R-squared value of 0.24. Where the higher the NTU (Number of Transfer Units) value, the lower the condenser's effectiveness. Apart from that, vacuum pressure affects the effectiveness of the condenser with an R-squared value of 0.74. The higher the vacuum pressure (the more negative it is), the effectiveness of the condenser will increase. Meanwhile, the cooling water inlet temperature has no effect on the effectiveness of the condenser with an R-squared value of 0.09 because there are several parameters or other factors that influence the effectiveness of the condenser, such as cooling water circulation, pipe cleanliness, and the cleanliness of the condenser itself.

Keywords: condenser, number of transfer unit, vacuum pressure, inlet cooling water temperature.

1. Pendahuluan

Salah satu komponen penting dalam siklus uap PLTU adalah kondensor. Kondensor merupakan salah satu komponen utama dari sebuah mesin pendingin [1]. Kondensor ialah salah satu jenis alat penukar panas atau penukar kalor (*heat exchanger*) yang digunakan untuk menukarkan panas di antara dua fluida yang berbeda suhunya tanpa mencampurnya [2]. Kondensor merupakan salah satu komponen utama dari sebuah mesin pendingin. Pada kondensor terjadi

perubahan wujud refrigeran dari uap *superheated* (panas lanjut) bertekanan tinggi ke cairan *sub-cooled* (dingin lanjut) bertekanan tinggi [6,7].

Kondensor merupakan alat penukar kalor yang memegang peranan untuk merubah wujud uap menjadi cair, sehingga air yang sebelumnya menjadi uap dan bertekanan tinggi menjadi air kembali dan air tersebut sangat bermanfaat bagi ketel atau *Vessel Heat Recovery* dan untuk menjaga agar air yang terdapat di dalam *vessel* tidak kering dan dapat dimanfaatkan

kembali menjadi uap sebagai pemanas kuah pindang [2].

Berdasarkan uraian di atas, maka disimpulkan bahwa kondensor adalah salah satu jenis mesin penukar kalor (*heat exchanger*) yang berfungsi untuk mengondensasikan fluida kerja. Kondensor biasanya mengubah fasa zat gas menjadi zat cair dari suhu tinggi keluar melalui dinding-dinding kondensor melewati media kondensasi, sebagai akibatnya uap akan didinginkan hingga fasanya berubah menjadi fasa cair pada suhu rendah.

Jenis kondensor yakni *Surface Condenser* dan *Direct Contact Condenser* [2]. Adapun fungsi kondensor adalah mengubah uap menjadi zat cair (air), dapat juga diartikan sebagai alat penukar kalor (panas) yang berfungsi untuk mengondensasikan fluida [8,9]. Dalam penggunaannya, kondensor diletakkan di luar ruangan yang sedang didinginkan agar panas yang keluar saat pengoperasiannya dapat dibuang keluar, sehingga tidak mengganggu proses pendinginan.

Kondensor berfungsi untuk mengondensasi uap panas yang keluar dari turbin menjadi air kembali, sehingga uap dapat digunakan kembali dalam siklus pembangkitan listrik. Efektivitas kondensor menjadi kritis karena semakin efektif kondensor bekerja, semakin sedikit energi panas yang terbuang dan semakin efisien pula penggunaan bahan bakar.

Kajian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh dan korelasi nilai NTU (*Number of Transfer Units*), tekanan vakum, dan suhu *inlet cooling water* terhadap efektivitas kondensor pada PLTU. Selain itu, kajian ini juga bermanfaat untuk meningkatkan efektivitas kondensor dengan memahami faktor-faktor yang mempengaruhi efektivitas kondensor, memberikan kontribusi bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang energi terbarukan dan ramah lingkungan khususnya dalam pengembangan teknologi PLTU yang lebih efisien, dan dapat merencanakan perawatan dan pemeliharaan yang lebih efisien untuk mencegah kerusakan lebih lanjut dan menghindari *down time* yang berdampak negatif pada produksi listrik.

Pembangkit Listrik Tenaga Uap atau sering disebut PLTU, di Pelabuhan Tarahan adalah salah satu unit pembangkit listrik dalam wilayah usaha PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) wilayah Bandar Lampung. Pembangkit listrik ini telah dioperasikan sejak tahun 2000 dengan kapasitas terpasang sebesar 2x8 MW. Pembangkit ini menggunakan energi pada uap panas yang dikonversikan menjadi energi kinetik dan disalurkan ke generator untuk menghasilkan listrik. Untuk memproses produksi listrik PLTU, peralatan utama adalah *boiler feed water pump*, *boiler*, turbin uap, *generator*, trafo utama, kondensor, dan alat bantu (*auxiliary*). Uap yang dihasilkan dari *boiler* dikonversikan menjadi energi kinetik dan disalurkan untuk menjalankan turbin uap yang telah disambungkan dengan *generator* untuk menghasilkan

energi listrik. Banyak yang mempengaruhi efektivitas dari kondensor di antaranya yaitu NTU (*Number of Transfer Units*), tekanan vakum, dan suhu *inlet cooling water*. Uap yang telah digunakan untuk memutar turbin didinginkan dengan menggunakan air laut atau air sungai di dalam kondensor untuk dijadikan air kondensat dan dipompakan lagi ke dalam *boiler* untuk dijadikan uap bertekanan tinggi. Dari fenomena di atas, maka ingin diketahui pengaruh dan korelasi nilai NTU (*Number of Transfer Units*), tekanan vakum, dan suhu *inlet cooling water* terhadap efektivitas kondensor pada PLTU di Pelabuhan Tarahan, Bandar Lampung.

Analisis Kinerja *Condensor Shell and Tube* unit 2 di PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) sektor telah dikaji sebelumnya, hasil kajian menunjukkan bahwa pada tahun 2018 suhu rata-rata panas saldo (Q) diperoleh sebesar 356.017.533,46 kJ/jam, sedangkan pada tahun 2019 hasil keseimbangan panas rata-rata (Q) sebesar 640.293.647.066 kJ/jam, faktor *fouling* sebesar tidak mempengaruhi neraca. Rata-rata koefisien perpindahan panas kotor (UD) di tahun 2018 sebesar 204.274,25 kJ/jam.m².°C, dan perpindahan panas bersih rata-rata koefisien (UC) sebesar 206,378 kJ/jam.m².°C, sedangkan pada tahun 2019 rata-rata panasnya koefisien perpindahan diperoleh dari rata-rata koefisien perpindahan panas bruto (UD) sebesar 366.544,07 kJ/jam.m².°C, dan koefisien perpindahan panas bersih (UC) adalah 448.554 kJ/jam.m².°C. Faktor pengotoran sangat berpengaruh terhadap perpindahan panas koefisien karena semakin besar *fouling* pada tabung akan mengakibatkan hambatan dari laju perpindahan panas dalam tabung, sehingga koefisien perpindahan panas berkurang [2,3].

Kajian ini juga sejalan dengan kajian terdahulu mengenai Kajian Kinerja Kondensor Unit 2 di PLTU Ombilin. Hasil kajian yaitu semakin tertunda pelaksanaan *overhaul*, nilai efektivitas semakin menurun, nilai tekanan vakum semakin meningkat, dan nilai LMTD semakin menurun dengan catatan selisih suhu air pendingin rendah. Penyebab penurunan kinerja kondensor karena lima faktor yakni kebocoran *tube*, kesalahan alat ukur, performa *fan cooling tower* rendah, kekotoran *tube*, dan performa CWP rendah.

Analisis Efektivitas Kondensor di PLTU PT Semen Tonasa BTG Unit I 2x25 MW menunjukkan bahwa hasil analisis dari kajian ini menunjukkan bahwa penurunan kinerja kondensor dipengaruhi oleh *fouling*. Pada pengamatan dalam proses *overhaul* yang dilakukan setiap 2 tahun sekali, terjadi penurunan nilai NTU sebesar 31,69% dan nilai efektif sebesar 22,29% pada periode April 2016 hingga Maret 2018 [4,5].

Pengaruh *Vacuum Pump* pada Nilai Efektivitas Kondensor PLTU PT Antam Pomalaa 2x30 MW UBPN SULTRA menunjukkan bahwa nilai

efektivitas antara data kondensor pada awal operasi mengalami penurunan jika dibandingkan data aktual saat ini, di mana nilai efektivitas awal operasi menunjukkan 0,1498 dan nilai efektivitas saat ini menunjukkan 0,1295, dan untuk nilai efektivitas kondensor saat ini masih dapat dikategorikan efektif, serta tingkat kevakuman yang dihasilkan oleh *vacuum pump* yang terpasang pada kondensor juga tinggi [14].

Analisis Pengaruh Tingkat Kevakuman Kondensor terhadap Perpindahan Panas dan Efektivitas Kondensor telah dikaji sebelumnya, hasil perhitungan pada lima titik kevakuman, didapatkan nilai efektivitas paling tinggi yaitu pada tekanan 704,015 mmHg, sedangkan pada tekanan *vacuum gauge* sebesar 704 mmHg memiliki nilai efektivitas tidak jauh di bawah nilai efektivitas pada tekanan vakum 704,015 mmHg, dan dari perhitungan lima titik tersebut didapatkan nilai efektivitas kondensor yang optimum terletak pada tekanan *vacuum gauge* sebesar 702-704 mmHg karena tidak terjadi perbedaan efektivitas yang jauh, sehingga diharapkan tekanan kondensor dapat dipertahankan pada rentang tekanan *vacuum gauge* sebesar 702-704 mmHg [15].

Rumusan dari kajian ini adalah apakah terdapat pengaruh dan korelasi nilai NTU (*Number of Transfer Units*), tekanan vakum, dan suhu *inlet cooling water* terhadap efektivitas kondensor pada PLTU. Tujuan kajian ini yakni untuk mengetahui pengaruh dan korelasi nilai NTU (*Number of Transfer Units*), tekanan vakum, dan suhu *inlet cooling water* terhadap efektivitas kondensor pada PLTU.

2. Metode

Kondensor yang diterapkan dalam PLTU Pelabuhan Tarahan memiliki fungsi sebagai alat penukar panas, yang berfungsi untuk mengondensasikan uap yang berasal dari turbin tekanan rendah (*low pressure turbine*) menjadi air. Proses ini dilakukan dengan menggunakan air laut sebagai media pendingin. Tujuan utama dari kondensor ini adalah untuk mengubah fase uap buangan (*exhaust steam*) yang keluar dari turbin tekanan rendah menjadi fase cair (air), sehingga dapat digunakan kembali dalam siklus uap. Dalam upaya meningkatkan efisiensi PLTU, tekanan di dalam kondensor perlu dipertahankan pada tingkat yang rendah, menciptakan kondisi vakum. Oleh karena itu, kondensor beroperasi dalam keadaan vakum. Agar kondisi vakum tercipta, udara dan gas-gas yang tidak dapat terkondensasi harus dihilangkan dari ruang kondensor. Tujuan ini dicapai dengan menggunakan *vacuum pump*, yang berfungsi untuk mengekstraksi gas-gas tersebut dan menjaga kevakuman di dalam kondensor. Setelah mengalami proses kondensasi, uap diubah menjadi air kondensat (*condensate water*). Air kondensat ini kemudian disirkulasikan kembali ke dalam *boiler* dan dipanaskan kembali menjadi uap untuk dimanfaatkan kembali dalam siklus uap.

Proses penukar panas dalam kondensor dilakukan dengan memanfaatkan air laut sebagai air pendingin. Uap mengalir di luar pipa-pipa (*shell side*) kondensor, sedangkan air laut mengalir di dalam pipa-pipa (*tube side*) sebagai air pendingin. Sumber air pendingin yang digunakan adalah air laut, yang tersedia dalam jumlah yang cukup besar di sekitar lokasi PLTU. Dengan menggunakan air laut sebagai media pendingin, panas yang terdapat dalam uap dapat ditransfer ke air laut dan kemudian dibuang, sehingga uap dapat mengalami kondensasi dan menjadi air kembali dalam kondensor. Proses ini membantu menjaga kondisi vakum yang diperlukan untuk mencapai efisiensi yang lebih tinggi dalam pembangkit listrik tenaga uap [12].

Selama proses konversi uap menjadi air, beberapa parameter harus diperhatikan untuk menjaga kinerja kondensor agar efisien. Parameter ini melibatkan tingkat vakum dalam kondensor, suhu, dan tekanan air pendingin, serta suhu uap yang akan dikondensasi. Semua parameter ini memiliki dampak signifikan terhadap efektivitas kondensor secara spesifik dan efisiensi keseluruhan pembangkit. Efisiensi kondensor dapat terpengaruh jika terjadi penurunan vakum kondensor dalam kondisi operasi tertentu [13].

Perhitungan efektivitas kondensor menggunakan Persamaan 1 berikut, di mana ϵ merupakan *effectiveness heater*, NTU adalah *Number of Transfer Unit*, dan C adalah *capacity ratio*.

$$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + \frac{C_{min}}{C_{max}})]}{1 + \frac{C_{min}}{C_{max}}} \quad (1)$$

Persamaan efektivitas melibatkan parameter yang bersifat tak berdimensi. Parameter ini sering disebut sebagai *Number of Transfer Unit* (NTU). Nilai NTU digunakan sebagai indikator dari ukuran permukaan alat penukar panas (APK), di mana semakin besar nilai NTU, maka semakin besar ukuran APK yang diperlukan. Persamaan 2 berikut digunakan untuk menghitung NTU, di mana A adalah luas perpindahan kalor (m^2), U adalah koefisien perpindahan panas menyeluruh ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), dan C_{min} adalah kapasitas panas minimum.

$$NTU = \frac{U \cdot A}{C_{min}} \quad (2)$$

Selain NTU, terdapat besaran tak berdimensi lain yang signifikan dalam alat penukar panas (APK), yaitu nilai C . *Capacity ratio* (C) diukur tanpa satuan dan dapat dihitung dengan membandingkan kapasitas panas maksimum dan minimum yang dapat ditampung oleh alat penukar panas. Persamaan 3 berikut digunakan untuk menghitung *capacity ratio*, di mana C_{min} adalah nilai terkecil yang diperoleh dari C_c dan C_h , dan C_{max} adalah nilai terbesar yang diperoleh dari C_c dan C_h . Persamaan 4 digunakan untuk memperoleh C_c , sedangkan Persamaan 5 digunakan untuk memperoleh C_h , di mana C_c merupakan *heat capacity rate* fluida dingin ($kJ/s^\circ C$), \dot{m}_c adalah laju aliran massa pendingin (kg/s), C_{pc}

merupakan kalor spesifik entalpi fluida pendingin (kJ/kg°C), Ch merupakan *heat capacity rate* fluida panas (kJ/s°C), mh adalah laju aliran massa fluida panas (kg/s), dan Cph adalah kalor spesifik entalpi fluida panas (kJ/kg°C).

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}} \tag{3}$$

$$Cc = mc \times Cpc \tag{4}$$

$$Ch = mh \times Cph \tag{5}$$

Koefisien perpindahan panas menyeluruh dapat dihitung dengan menggunakan nilai laju perpindahan panas (Q) dan perhitungan perbedaan suhu rata-rata logaritmik (LMTD, *log mean temperature difference*). Persamaan 6 berikut digunakan untuk menghitung nilai laju perpindahan panas (Q).

$$Q = U \cdot A \cdot LMTD \tag{6}$$

Dengan kondensor yang mempunyai arah aliran yang berlawanan (*counter flow*) maka LMTD dapat dihitung dengan Persamaan 7 berikut, di mana T_1 adalah suhu masuk fluida panas (°C), T_2 adalah suhu keluar fluida panas (°C), t_1 adalah suhu masuk fluida dingin (°C), dan t_2 adalah suhu keluar fluida dingin (°C).

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)} \tag{7}$$

Tabel 1. Rata-rata hasil perhitungan efektivitas kondensor per minggu.

No	Minggu ke-	LMTD (°C)	Tfc (°C)	Cpc (kJ/kg°C)	Tfh (°C)	Cph (kJ/kg°C)	hfg (kJ/kg)	Q (kJ/s °C)	U (kW/m²°C)	NTU	ε (%)
1	Minggu ke 1	29,477	37,630	157,066	68,621	2623,632	2466,566	997900,60	29,477	4,8538	0,8112
2	Minggu ke 2	29,551	37,542	157,260	68,411	2623,273	2466,013	984084,936	29,551	4,7686	0,8112
3	Minggu ke 3	29,381	37,660	157,752	37,660	2623,051	2465,298	1005375,158	29,381	4,8858	0,8111
4	Minggu ke 4	30,670	37,286	156,188	69,254	2624,719	2468,531	999559,798	30,670	4,7082	0,8120
5	Minggu ke 5	29,663	37,649	157,708	68,734	2623,825	2466,117	1004093,487	29,663	4,8290	0,8083
6	Minggu ke 6	28,896	37,348	156,355	67,656	2621,977	2465,622	1005926,538	28,896	5,0101	0,8082
7	Minggu ke 7	29,804	37,558	157,325	68,731	2623,929	2466,603	1023336,876	29,804	4,9122	0,8066
8	Minggu ke 8	28,705	37,613	157,516	67,855	2622,306	2464,789	1035509,226	28,705	5,1558	0,8079
9	Minggu ke 9	30,037	37,222	155,868	68,649	2623,675	2467,807	1003686,658	30,037	4,8264	0,8073
10	Minggu ke 10	29,694	37,908	158,719	69,134	2624,485	2465,766	1028846,370	29,694	4,9133	0,8054
11	Minggu ke 11	30,377	37,589	157,453	69,511	2625,150	2467,696	1048972,537	30,377	4,9351	0,8067
12	Minggu ke 12	29,806	38,031	159,535	69,481	2625,009	2465,474	1068380,297	29,806	5,0573	0,8055
13	Minggu ke 13	28,562	37,968	159,039	68,348	2623,187	2464,148	1076426,672	28,562	5,3361	0,8075

Pada Gambar 1 di bawah, garis regresi menunjukkan tren yang condong turun dari kiri ke kanan. Hal tersebut mengindikasikan bahwa terdapat hubungan negatif antara nilai NTU dan efektivitas kondensor.

Variabel independen adalah variabel yang sering disebut sebagai variabel stimulus, *predictor*, *antecedent*. Dalam Bahasa Indonesia sering disebut sebagai variabel bebas. Variabel bebas adalah merupakan variabel yang mempengaruhi atau yang menjadi sebab perubahannya atau timbulnya variabel dependen (terikat). Variabel ini bersifat menerangkan dan mempengaruhi variabel lain yang tidak bebas [16]. Dalam kajian ini terdapat variabel independen yaitu Perhitungan Efektivitas.

Variabel terikat (*dependent variable*) disebut sebagai variabel output, kriteria, konsekuen. Dalam Bahasa Indonesia sering disebut variabel terikat. Variabel terikat merupakan variabel yang dipengaruhi atau yang menjadi akibat karena adanya variabel bebas [16]. Dalam kajian ini yang menjadi variabel terikat (*dependent variable*) yaitu Kondensor Unit 2 (Y).

3. Hasil dan Pembahasan

Number of Transfer Unit, NTU adalah suatu metode yang digunakan untuk menghitung laju perpindahan panas pada alat penukar panas. *Number of Transfer Unit* (NTU) adalah sebuah parameter yang tidak berdimensi yang banyak digunakan dalam analisis penukar panas [10,11]. Tabel 1 berikut memuat rata-rata hasil perhitungan efektivitas kondensor per minggu.

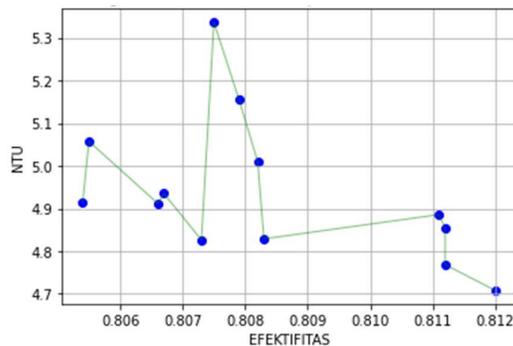
Dengan kata lain, semakin tinggi nilai NTU, kemungkinan efektivitas kondensor lebih rendah. Meskipun demikian, penting untuk dicatat bahwa *scatter plot* juga menunjukkan variasi dalam data di

sekitar garis regresi. Visualisasi tersebut menggambarkan hubungan antara nilai efektivitas dan NTU pada kondensor dengan menggunakan *scatter plot* dan garis penghubung.

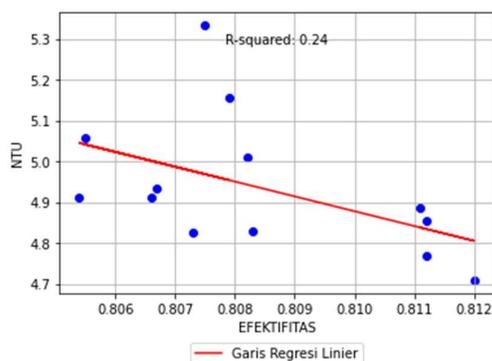
Dari visualisasi ini, dapat dilihat adanya pola umum bahwa semakin tinggi nilai NTU, kemungkinan efektivitas kondensor lebih rendah. Garis penghubung memberikan gambaran visual tentang arah hubungan negatif antara kedua variabel tersebut.

Besarnya nilai NTU (*Number of Transfer Unit*) dipengaruhi oleh besarnya nilai laju perpindahan panas (Q) yang ditentukan oleh laju aliran massa uap dan perbedaan suhu uap yang masuk dan keluar, serta besarnya nilai *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) ditentukan oleh nilai suhu masuk dan keluar uap serta nilai suhu masuk dan keluar air pendingin, dan nilai kapasitas minimum (C_{min}) ditentukan oleh aliran uap. Semakin besar nilai dari LMTD dan C_{min} maka nilai NTU akan semakin kecil.

Adapun pembuktian dari pernyataan grafik pengaruh nilai NTU (*Number of Transfer Units*) terhadap nilai efektivitas dapat dilihat pada korelasi linear pada Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 1. Pengaruh nilai NTU terhadap efektivitas.



Gambar 2. Korelasi nilai NTU terhadap efektivitas.

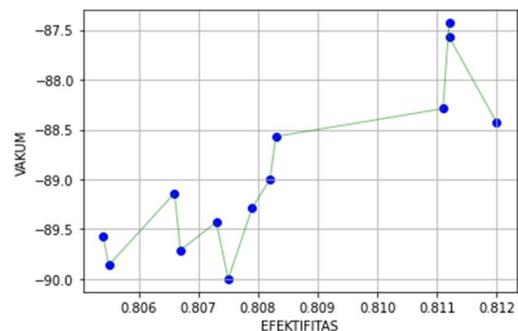
Melalui visualisasi ini, dapat diamati pola bahwa semakin tinggi nilai NTU, kemungkinan efektivitas kondensor cenderung lebih rendah. Garis regresi linier merah mencoba mewakili tren umum dari data tersebut dan membantu untuk memahami arah hubungan negatif antara efektivitas dan NTU.

Selain itu, terdapat nilai *R-squared* yang dicantumkan sebesar 0,24. Nilai *R-squared* adalah metrik statistik yang mengukur seberapa baik garis regresi linier cocok dengan data yang tersedia. Nilai *R-squared* berkisar antara 0 hingga 1. Semakin dekat nilai *R-squared* dengan 1, semakin baik garis regresi menjelaskan variasi dalam data. Dalam hal ini, nilai *R-squared* menjauhi nilai 1 yang artinya kurang menjelaskan variasi dalam data.

Nilai korelasi yang didapatkan sebesar (-0,4) yang mengindikasikan adanya hubungan negatif yang lemah antara nilai NTU dan efektivitas kondensor.

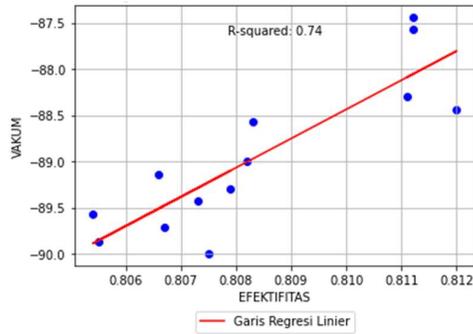
Penurunan nilai efektivitas pada kondensor dapat dipengaruhi oleh tekanan vakum yang tersedia. Tekanan vakum pada kondensor diukur dalam satuan kPa. Semakin rendah tekanan vakum pada kondensor, maka nilai efektivitasnya akan semakin tinggi. Artinya, semakin mendekati kondensor mencapai kevakuman penuh (tekanan vakum yang rendah), maka perpindahan panas dari uap ke air pendingin akan berlangsung dengan lebih efisien, sehingga efektivitas kondensor akan meningkat.

Pada Gambar 3 di bawah, garis penghubung hijau yang menghubungkan setiap titik data membentuk pola garis, yang secara visual memperlihatkan hubungan antara kedua variabel ini. Dalam konteks ini, garis penghubung naik dari kiri ke kanan, menunjukkan hubungan positif antara efektivitas dan tekanan vakum. Artinya, semakin tinggi tekanan vakum (semakin negatif), semakin tinggi efektivitas yang dapat dicapai oleh kondensor.



Gambar 3. Pengaruh tekanan vakum terhadap efektivitas kondensor.

Adapun pembuktian dari pernyataan grafik pengaruh tekanan vakum terhadap efektivitas kondensor dapat dilihat pada korelasi linear pada Gambar 4 di bawah ini.



Gambar 4. Korelasi tekanan vakum terhadap efektivitas kondensor.

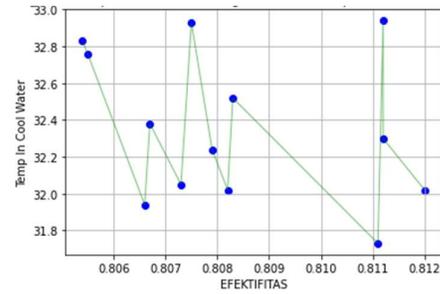
Garis merah yang terbentuk oleh garis regresi linier adalah garis yang terbaik cocok untuk menggambarkan pola data tersebut. Garis ini mencerminkan tren umum hubungan antara efektivitas dan tekanan vakum. Pada kasus ini, garis regresi menunjukkan kemiringan yang naik, mengindikasikan hubungan positif antara efektivitas dan tekanan vakum. Dengan kata lain, semakin tinggi tekanan vakum (semakin negatif), maka semakin tinggi pula efektivitas yang mungkin terjadi pada kondensor.

Nilai *R-squared* (koefisien determinasi) sebesar 0,74 mengindikasikan bahwa sekitar 74% variasi dalam efektivitas dapat dijelaskan oleh variasi dalam tekanan vakum dalam model regresi linier. Semakin tinggi nilai *R-squared*, semakin baik garis regresi mampu menjelaskan variasi dalam data. Dengan *R-squared* sebesar 0,74, garis regresi mampu menjelaskan sebagian besar variasi yang ada dalam efektivitas berdasarkan variasi dalam tekanan vakum. Namun, sebagian kecil variasi masih mungkin disebabkan oleh faktor lain yang tidak dimasukkan dalam model. Nilai *R-squared* ini memberikan informasi penting tentang seberapa baik model linier ini sesuai dengan data yang diamati.

Nilai korelasi yang didapatkan sebesar 0,8 yang mengindikasikan adanya hubungan positif yang kuat antara tekanan vakum dan efektivitas kondensor.

Terdapat beberapa parameter yang mempengaruhi efektivitas kondensor yaitu suhu air pendingin, sirkulasi air pendingin, dan kebersihan dari kondensor itu sendiri. Adapun dalam kajian ini membahas tentang suhu air pendingin (*temperature inlet cooling water*).

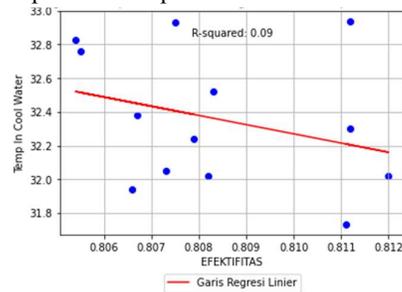
Dari tabel hasil perhitungan efektivitas dapat dibuat grafik hubungan suhu *inlet cooling water* terhadap efektivitas kondensor pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Suhu inlet cooling water terhadap efektivitas kondensor.

Dalam hal ini, jika garis penghubung cenderung menurun dari kiri ke kanan, ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi suhu *inlet cooling water*, semakin rendah kemungkinan efektivitas kondensor. *Scatter plot* memberikan gambaran lebih rinci tentang sebaran data di sekitar garis penghubung, yang membantu dalam mengidentifikasi variasi dan pola dalam hubungan tersebut.

Pernyataan ini dapat dibuktikan dengan grafik korelasi linier antara suhu *inlet cooling water* terhadap efektivitas pada Gambar 6 di bawah.



Gambar 6. Korelasi suhu inlet cooling water terhadap efektivitas kondensor.

Pentingnya garis regresi terletak pada kemampuannya untuk mengidentifikasi tren umum dalam hubungan antara variabel. Jika garis regresi cenderung menurun dari kiri ke kanan, ini dapat diartikan sebagai adanya hubungan negatif antara efektivitas dan suhu *inlet cooling water*. Dengan kata lain, semakin tinggi suhu *inlet cooling water*, semakin rendah efektivitas kondensor.

Nilai *R-squared* yang terletak di atas plot memberikan informasi tentang sejauh mana garis regresi linier memadai untuk mewakili variasi dalam data. Jika nilai *R-squared* mendekati 1, ini menunjukkan bahwa garis regresi cukup baik dalam memodelkan variasi di antara efektivitas dan suhu *inlet cooling water*. Dalam hal ini *R-squared* bernilai 0,09 yang menjauhi 1, artinya garis regresi kurang baik dalam memodelkan variasi karena terdapat parameter lain yang mempengaruhi efektivitas kondensor selain suhu *inlet cooling water* seperti sirkulasi air pendingin, kebersihan pipa dan kebersihan dari kondensor itu sendiri.

Nilai korelasi yang didapatkan sebesar (-0,3) yang mengindikasikan adanya hubungan negatif yang lemah antara suhu *inlet cooling water* dan efektivitas kondensor.

4. Kesimpulan

Simpulan yang didapatkan bahwa nilai NTU kurang berpengaruh terhadap efektivitas kondensor dengan nilai *R-squared* sebesar 0,24. Nilai korelasi yang didapatkan sebesar (-0,4) yang berarti adanya hubungan negatif yang lemah antara nilai NTU dan efektivitas kondensor. Semakin tinggi nilai NTU (*Number of Transfer Units*), kemungkinan efektivitas kondensor lebih rendah. Tekanan vakum yang dihasilkan oleh *vacuum pump* berpengaruh terhadap efektivitas kondensor dengan nilai *R-squared* sebesar 0,74, mengindikasikan bahwa sekitar 74% variasi dalam efektivitas dapat dijelaskan oleh variasi dalam tekanan vakum dalam model regresi linier. Nilai korelasi yang didapatkan sebesar 0,8 yang berarti adanya hubungan positif yang kuat antara tekanan vakum dan efektivitas kondensor. Semakin tinggi tekanan vakum (semakin negatif), maka efektivitas kondensor akan meningkat. Suhu *inlet cooling water* tidak berpengaruh terhadap efektivitas kondensor dengan nilai *R-squared* sebesar 0,09, karena terdapat beberapa parameter lain yang mempengaruhi efektivitas kondensor seperti sirkulasi air pendingin, kebersihan pipa, dan juga kebersihan dari kondensor itu sendiri. Nilai korelasi yang didapatkan sebesar (-0,3) yang berarti adanya hubungan negatif yang lemah antara suhu *inlet cooling water* dan efektivitas kondensor.

Hasil analisis efektivitas kondensor di atas menghasilkan saran untuk menjaga suhu *inlet cooling water* agar tidak terjadi penurunan efektivitas pada kondensor, melakukan pengecekan pada alat *vacuum pump*, serta rutin melakukan pengecekan pada komponen-komponen kondensor lainnya untuk meningkatkan efektivitas kondensor, melakukan pembersihan kondensor secara berkala untuk menjaga kestabilan *heat exchanger*, dan mempertahankan suhu agar proses perpindahan panas dapat maksimal.

Ucapan Terima Kasih

Dengan ini penulis menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Asrul Sapri selaku Pembimbing Lapangan, Bapak Eko Sulistiyo S.T., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir, yang telah memberikan petunjuk, saran-saran serta bimbingannya, sehingga kajian ini dapat diselesaikan. Terima kasih yang sama penulis sampaikan kepada PLTU Pelabuhan Tarahan 2x8 MW PT Bukit Energi Servis Terpadu, dan seluruh karyawan PT Bukit Energi Servis Terpadu yang telah membimbing dan mengarahkan penulis selama kegiatan, orang tua, keluarga, serta teman-teman seperjuangan yang telah memberikan dukungan baik secara moral maupun material.

Daftar Pustaka

- [1] Pasra, N., & Hakim, F. (2015). Pengoperasian Water Treatment Plant Di PT. PJB Unit Pembangkitan Paiton. *Energi & Kelistrikan*, 7(1), 41-48.
- [2] Hairudin, H., & Mursadin, A. (2021). Analisis (Boles, 2006) Kinerja Condenser Shell And Tube Unit 2 Di PT. PLN (Persero) Sektor Asam-Asam Kalimantan Selatan. *Jtam Rotary*, 3(2), 203-218.
- [3] Hariyadi, S., & Setiyawan, A. (2014). Analisa Termodinamika Pengaruh Penurunan Tekanan Vakum pada Kondensor Terhadap Performa Siklus PLTU Menggunakan Software Gate Cycle. *Jurnal. Teknik. Pomits*, (3).
- [4] Effendi, A. R. (2020). Analisis Perubahan Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Kerja Turbin Dan Produksi Listrik PLTU Unit 1 Sebalang Menggunakan Simulasi Cycle Tempo. *Jurnal Powerplant*, 8(1), 1-29.
- [5] Jamal Chandra Bhuana (2021) Analisis Efektivitas Kondensor di PLTU PT. Semen Tonasa BTG Unit I 2x25 MW,
- [6] Mahmud, K. (2015). Pengaruh Variasi Temperatur Air Pendingin Kondensor Terhadap Tekanan Pada Beban Tetap. *JISI: Jurnal Integrasi Sistem Industri*, 2(1), 1-8.
- [7] Bhuana, J. C., Muh, I., & Maulana, A. (2021). Analisis Efektivitas Kondensor Di PLTU PT. Semen Tonasa Btg Unit I 2x 25 MW. *PoliGrid*, vol. 2 no. (1), p. 20-23.
- [8] Jurnal, R. T. (2017). Analisis Performa Kondensor Di PT. Indonesia Power Ujp Pltu Lontar Banten Unit 2: Prayudi, Hendri. *Jurnal Powerplant*, 4(4), 271-278.
- [9] Purba, S. (2018). Analisis Pengaruh Perubahan Tekanan Vakum Terhadap Kinerja Kondensor Unit 6 Pltu Suralaya (Doctoral Dissertation, Universitas Mercu Buana Jakarta).
- [10] Boles, C. A. (2016). *Thermodynamics An Engineering*. Michigan: McGraw-Hill Higher Education.
- [11] Holman, J. P. (2020). *Heat Transfer: Tenth Edition*. Southern Methodist Univesity: McGraw-Hil Higher Education.
- [12] Benny Suherman, A. L. (2022). *Buku Ajar Konversi Energi Listrik*. Yayasan Kita Menulis.
- [13] Ramadhan, A. (2017). "Analisa Keandalan Kondensor dengan Menggunakan Debris Filter di PLTU Belawan". *J. Surya Tek.*, vol. 5, no. 02, pp. 18-24.
- [14] La Ode Isranur Islami (2018) Pengaruh Vacuum Pump pada Nilai Efektivitas Kondensor PLTU PT. ANTAM POMALAA 2 x 30 MW UBPN SULTRA,
- [15] Selva Balingtiyas (2018), Analisis Pengaruh Tingkat Kevakuman Kondensor Terhadap Perpindahan Panas dan Efektivitas Kondensor
- [16] Sugiyono, (2019), *Penelitian Kualitatif dan R & D*, Jakarta: Rineka Cipta