

Evaluasi Efektivitas Perpindahan Panas *Generator Air Cooler* pada PT. X

Moch. Gilang Muharam^{1,*}, Alvera Apridialianti Melkias¹, dan Indriyani¹

¹Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012

E-mail: moch.gilang.tken21@polban.ac.id*

Abstract

The generator air cooler at PT. X functions as a heat exchanger in the process of cooling air in the generator. As an air cooler for the generator, the generator air cooler must have good effectiveness. Good effectiveness is considered from the heat transfer between the cooling water in the air cooler generator as the cooling medium and the air being circulated, so the heat absorption is expected to be maximized. Based on the calculations conducted, the fin efficiency of the air cooler generator is 41.6%, the overall heat transfer coefficient (U) is 59.49 W/m²°C, the heat transfer rate on the fins is 312.2703 kW, the heat transfer rate on the tubes is 84.39696 kW, the number of transfer units (NTU) is 0.853, and the overall effectiveness of the air cooler generator system is 53.06%, showing a decrease of 33.94% from the maximum effectiveness of 87%.

Keywords: Generator Air Cooler, fin efficiency, Number of Transfer Unit, Effectiveness

Abstrak

Generator air cooler pada PT. X merupakan suatu alat yang berfungsi sebagai media penukar kalor dalam proses pendinginan udara di generator. Sebagai pendingin udara di generator, *generator air cooler* harus mempunyai efektivitas yang baik. Efektivitas yang baik ditinjau dari perpindahan panas antara air pendingin di *generator air cooler* sebagai media pendingin udara yang dialirkan, sehingga penyerapan panasnya diharapkan maksimum. Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, didapatkan nilai efisiensi sirip pada *generator air cooler* sebesar 41.6%, koefisien perpindahan panas menyeluruh (U) 59.49 W/m²°C, laju perpindahan panas pada sirip sebesar 312.2703 kW, laju perpindahan panas pada *tube* sebesar 84.39696 kW, *number of transfer unit* (NTU) sebesar 0.853, serta efektivitas keseluruhan sistem *generator air cooler* sebesar 53.06% dengan penurunan 33.94% dari efektivitas maksimal sebesar 87%.

Kata Kunci: Generator Air Cooler, Efisiensi Sirip, Number of Transfer Unit, Efektivitas

1. Pendahuluan

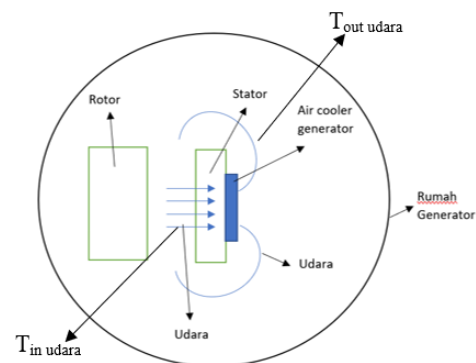
Generator air cooler merupakan suatu alat yang berfungsi sebagai media penukar kalor dalam proses pendinginan di generator. *Generator air cooler* pada PT. X menggunakan sirkulasi udara untuk dijadikan sebagai media pendinginnya. Udara yang berada di antara rotor dan stator pada generator akan keluar secara alamiah akibat adanya perputaran rotor yang tinggi dan perbedaan temperatur sehingga terjadi perpindahan panas antara udara panas yang mengalir melewati *generator air cooler* yang menempel pada bagian stator. Udara tersebut akan didinginkan oleh penukar kalor tipe *plate*. Udara yang telah didinginkan akan bersirkulasi kembali dengan masuk melalui saluran udara bagian atas dan bawah generator untuk mendorong kembali udara panas yang terjebak dalam ruang antara rotor dan stator dengan bantuan *blade-blade* kecil yang berada pada bagian atas dan bawah rotor dengan posisi arah yang saling berlawanan.

Generator air cooler merupakan sebuah komponen dalam proses penurunan temperatur udara di dalam generator, dan salah satu penyebab yang dapat mempengaruhi penurunan kinerja dari *generator air cooler* adalah faktor *live time* dimana setiap 5 tahun sekali *generator air cooler* pada PT. X dilakukan penggantian alat. Berdasarkan hal tersebut

sangat perlu dilakukan perhitungan efektivitas perpindahan panas *generator air cooler* pada PT. X.

Generator Air Cooler

Generator air cooler merupakan sebuah alat yang memiliki fungsi untuk mendinginkan udara yang ada dalam rumah generator. Pendingin generator yang digunakan di PT. X dengan menggunakan sirkulasi udara. Udara yang berada didalam ruang antara rotor dan stator akan didinginkan oleh *radiator* (compact heat exchanger) yang berjumlah 12 buah. Media pendingin yang digunakan untuk mendinginkan udara merupakan air yang bersumber dari *draft tube*.



Gambar 1. Tampak samping sirkulasi udara dalam generator

Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor adalah transfer energi panas yang terjadi karena perbedaan suhu antara dua benda atau material. Panas merupakan bentuk energi yang dapat bergerak dari area bersuhu tinggi ke area bersuhu lebih rendah. Persamaan yang mengaitkan laju perpindahan kalor antara dua sistem termodinamika sistem tersebut adalah persamaan dasar dalam ilmu perpindahan kalor. Terdapat tiga mekanisme perpindahan kalor: konduksi, konveksi, serta radiasi

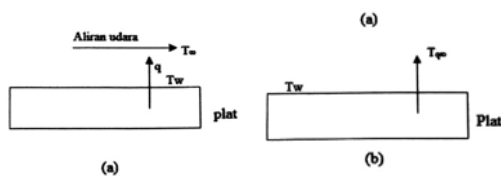
Perpindahan Panas Konduksi

Perpindahan panas secara merambat melalui atom-atom ataupun tumbukan antar molekul dari pada suatu benda pada bagian yang dipanaskan menuju bagian yang lebih rendah temperaturnya disebut sebagai perpindahan panas secara konduksi [1].

persamaan konduksi hubungan antara laju perpindahan panas q yang berbanding lurus dengan konduktivitas panas k [2], luas perpindahan panas A serta rasio antara beda temperatur terhadap jarak $A \frac{dT}{dx}$

Perpindahan Panas Konveksi

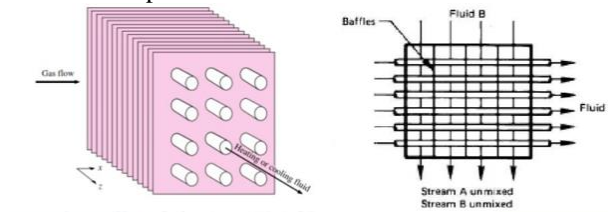
Transfer panas dari aliran fluida ke objek yang dilaluinya merupakan transfer panas melalui konveksi. Proses ini terjadi dari atau ke pelat melalui aliran fluida. Konveksi terbagi menjadi dua jenis, yakni konveksi alami dan konveksi dipaksa.



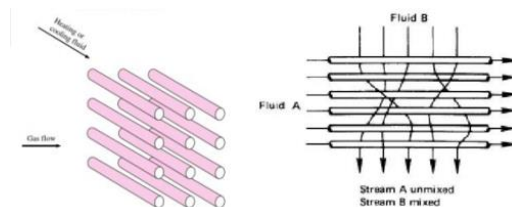
Gambar 2. (a) Perpindahan panas konveksi paksa, (b) konveksi alami

Jenis Penukar Kalor Aliran Silang (Cross-flow)

Jenis penukar kalor ini memiliki karakteristik fluida panas dan dingin bergerak dalam arah melintang atau tegak lurus seperti yang ditunjukkan pada gambar 4 (Cross Flow). Penukar kalor aliran silang fluida tak campur disebut juga penukar kalor bersirip dimana menghalangi gerakan fluida pada saat proses perpindahan panas dan gerakan fluida dalam satu arah gerak melintang menuju kearah aliran fluida lainnya. Sedangkan untuk aliran silang fluida campur adalah kebalikan dari tak campur yakni tidak memiliki sirip.



Gambar 3. Penukar kalor aliran silang fluida tak campur



Gambar 4. Penukar kalor aliran silang fluida campur

Efisiensi Sirip

Efisiensi sirip pada perancangan *plate fin-tubes heat exchanger* menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\eta_{fin} = \frac{\tanh mL}{mL} \tag{3}$$

Keterangan:

- η_{fin} = efisiensi sirip
- h_h = koefisien perpindahan kalor keseluruhan di udara ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
- m = kedalaman aliran perpindahan panas (m^2)
- k = konduktivitas kalor ($W/m \text{ } ^\circ C$)
- L = panjang pipa (m)
- t = tebal pipa (m)

Koefisien Perpindahan Panas pada Pipa

Bilangan *Reynold* merupakan bilangan yang menentukan koefisien perpindahan panas pada sisi pipa [3].

$$Re_d = \frac{\rho_{in \text{ air}} v d_{in} (\frac{n_{tube}}{4})}{\mu} \tag{4}$$

Keterangan:

- ρ = Massa jenis fluida (Kg/m^3)
- d_{in} = Diameter pipa (m)
- μ = Viskositas dinamik ($Kg/m.s$)
- Re_d = Bilangan Reynold

$$Nu_d = Re_d^{0,8} Pr^{\frac{1}{3}} (\frac{d}{L})^{0,55} \tag{5}$$

Koefisien perpindahan kalor pada bagian pipa:

$$h_c = Nu_d \frac{k}{d_{in}} \tag{6}$$

Keterangan:

- h_c = Koefisien perpindahan panas ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
- Nu_d = Bilangan *Nusselt*
- k = Konduktivitas kalor ($W/m \text{ } ^\circ C$)
- d_{in} = Diameter pipa (m)

Perpindahan Panas pada Sirip

Nilai *Prandtl number* (Pr) dihasilkan dari data tabel termodinamika, Nilai dari *Stanton number* dipersamakan dalam:

$$St = \frac{Nu_d}{Re_d Pr} \tag{7}$$

Reynold number pada aliran bebas melalui permukaan *plate* yakni:

$$Re_L = \frac{\rho v l_{fin}}{\mu} \tag{8}$$

Keterangan:

ρ = Densitas udara (kg/m³)
 v = Kecepatan udara (m/s)
 l_{fin} = Panjang benda yang dilalui aliran (m)
 μ = Viskositas absolut udara (kg/m.s)

Aliran transisi dapat menggunakan persamaan:

$$Nu_L = Pr^{\frac{1}{3}}(0,037 Re_L^{0,8} - 0,871) \quad (9)$$

Nilai konveksi yang terjadi pada sistem dapat menggunakan persamaan:

$$h = St G C_p \quad (10)$$

Keterangan:

h = Koefisien perpindahan kalor (W/m²°C)
 C_p = Panas jenis spesifik (kJ/kg °C)
 G = Mass velocity (kg/m²°C)
 \dot{m} = Laju aliran massa (kg/s)
 St = Stanton number

Koefisien Perpindahan Kalor Menyeluruh pada Sistem

Koefisien perpindahan panas total sistem dapat dihitung berdasarkan luas permukaan luar atau dalam tabung, tergantung pada suhu fluida dan sirip. Saat koefisien transfer panas total telah ditentukan, pengaruh suhu lingkungan terhadap permukaan sirip dan tabung memungkinkan untuk menguraikan koefisien konveksi dan konduksi perpindahan panas yang terjadi menjadi:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{\eta_{udara} h_{air} A_{tube}} + \frac{R_{fc}}{\eta_{udara} A_{tube}} + \frac{\ln \frac{d_{out}}{d_{in}}}{2\pi K l_{tube} n_{tube}} + \frac{R_{fc}}{\eta_{udara} A_{sirip}} + \frac{1}{\eta_{udara} h_{udara} A_{sirip}} \quad (11)$$

Keterangan:

U = Perpindahan panas menyeluruh (W/m²°C)
 h_c = Koefisien perpindahan kalor sisi tube (W/m²°C)
 h_h = Koefisien perpindahan kalor sisi sirip (W/m²°C)
 A_{tube} = Luas penampang tube (m²)
 A_{fin} = Luas penampang sirip (m²)
 l = Panjang tube (m)
 R_f = Faktor pengotoran (m².°C/W)

Laju Perpindahan Panas Penukar Kalor

Laju perpindahan panas dapat memakai persamaan sebagai berikut:

$$q = \dot{m}_h C_h (T_2 - T_1) \quad (12)$$

Nilai C_{min} dapat dicari dengan:

$$\dot{m}_h \cdot C_h = C_{min} \quad (13)$$

Keterangan:

q = Laju perpindahan panas (Watt)
 C_{min} = Kapasitas panas minimal (W/°C)
 T_1 = Temperatur masuk (°C)
 T_2 = Temperatur keluar (°C)

Log Mean Temperature Difference (ΔT_{LMTD})

Dalam membandingkan dua jenis temperatur berbeda dengan dua fluida berbeda, dapat dicari perbedaan temperaturnya dengan rumus:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{h2} - T_{c2}) - (T_{h1} - T_{c1})}{\ln \left(\frac{T_{h2} - T_{c2}}{T_{h1} - T_{c1}} \right)} \quad (14)$$

Keterangan:

T_{h1} = Temperatur udara panas (°C)
 T_{c1} = Temperatur air dingin (°C)
 T_{h2} = Temperatur udara dingin (°C)
 T_{c2} = Temperatur air panas (°C)

Metode NTU-Efektivitas

Metode efektivitas ini memiliki sejumlah keunggulan dalam menganalisis situasi dimana perbandingan antara jenis penukar kalor dilakukan untuk memilih yang paling optimal.

Nilai *number of transfer unit* (NTU) pada kasus ini dapat dicari dengan:

$$NTU = \frac{U \cdot A}{C_{min}} \quad (15)$$

Keterangan:

U = Koefisien perpindahan kalor menyeluruh (W/m²°C)
 A = Luasan area perpindahan kalor pada penukar kalor (m²)
 C_{min} = Kapasitas panas minimal (W/°C)

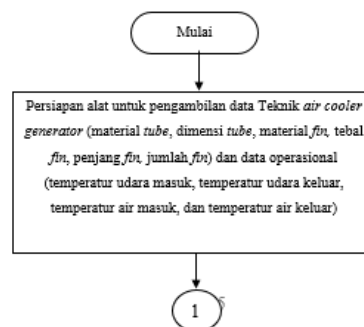
Efektivitas yang lebih baik ketika fluida panas adalah fluida dengan suhu minimum, kecuali jika ada pertukaran antara laju aliran massa dan kapastitas kalor dari kedua fluida. Sebagai gantinya, efektivitas yang menunjukkan pada fluida tak campur serta aliran silang ditulis:

$$\epsilon = \left(\frac{1}{C_{min}/C_{maks}} \right) \left\{ 1 - \exp \left[- \left(C_{min}/C_{maks} \right) (1 - e^{-NTU}) \right] \right\} \quad (16)$$

$C = mc$ didefinisikan sebagai tingkat kapasitas.

2. Metodologi

2.1 Skema Diagram Alir Penelitian



- Perhitungan efisiensi sirip;
- Perhitungan koefisien perpindahan panas menyeluruh
- Perhitungan laju perpindahan panas;
- *Log Mean Temperature Difference* (ΔT_{LMTD})
- Perhitungan efektivitas-metode NTU (Number of Transfer Unit)

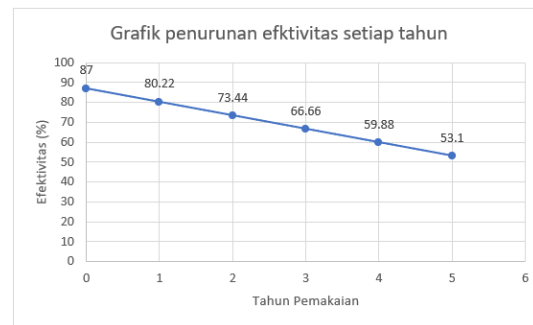
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil dari perhitungan yang telah dilakukan yakni:

- Efisiensi sirip 41.6%
- Koefisien perpindahan panas menyeluruh 59.49 $W/m^2\text{ }^\circ C$
- Laju perpindahan panas pada sirip 312.2703 kW
- Laju perpindahan panas pada *tube* 84.3969 kW
- *Log Mean Temperature Difference* (ΔT_{LMTD}) 11.237 $^\circ C$
- Efektivitas *generator air cooler* 53.06%

Beberapa parameter yang didapat sangat berpengaruh terhadap nilai efektivitas sistem. *Generator air cooler* pada PT. X memiliki nilai efektivitas maksimal sebesar 87% yang mana *live time* dari alat ini adalah 5 tahun. *Generator air cooler* pada PT. X ini memiliki nilai efektivitas aktual sebesar 53.06% setelah pemakaian selama 5 tahun dimana terjadi penurunan nilai efektivitas sebesar 33.94%. Salah satu penurunan efektivitas ini dipengaruhi oleh penurunan dari nilai kapasitas panas jenis air dan udara. Penurunan nilai dari parameter tersebut terjadi karena adanya kotoran pada *tube* atau adanya pengendapan (kerak) yang menyebabkan nilai dari koefisien perpindahan panas menyeluruh (U) dan kapasitas panas jenis air (C_{air}) dan udara (C_{udara}) menurun.

Kerak akan meningkatkan ketahanan termal pada *tube*, sehingga efektivitas perpindahan panas akan menurun karena kerak pada *tube* akan menghambat proses perpindahan panas yang terjadi sehingga panas yang seharusnya diserap *tube* terhalang oleh kotoran-kotoran tersebut, hal ini menyebabkan panas tidak dapat diserap secara maksimal oleh sistem *air cooler generator*. Seiring dengan berjalannya waktu, kerak akan terus terakumulasi dan sering kali disertai dengan korosi dan penyempitan lebih lanjut jika tidak dilakukan pembersihan secara berkala serta ketika hal itu terjadi, maka proses perpindahan panas akan menjadi kurang efisien disertai dengan tidak maksimalnya penyerapan temperatur pada air dan juga tidak maksimalnya penurunan temperatur pada udara. Penyempitan *tube* akibat adanya kerak akan menyebabkan debit air berkurang sehingga suplai air pendingin berkurang hal tersebut akan menyebabkan turunnya nilai dari efektivitas *generator air cooler*. Ditinjau dari penurunan efektivitas *generator air cooler* yang mencapai 33.94% menunjukkan bahwa setiap tahunnya efektivitas *generator air cooler* mengalami penurunan efektivitas sebesar 6.78%



Gambar 8. Grafik penurunan efektivitas *generator air cooler*

Penurunan efektivitas ini dapat diatasi dengan cara membersihkan *tube* dari kotoran-kotoran yang mengendap sehingga proses perpindahan panas dapat berjalan dengan normal kembali. Pembersihan ini dapat dilakukan dengan metode CIP (clean in place) yang mana metode pembersihan ini dilakukan dengan cara menginjeksi cairan kimia berupa NaOH sebagai deterjen utama, Asam nitrat sebagai penghilang kerak dan stabilisasi pH, klorin dioksida sebagai disinfektan yang dipompakan ke dalam saluran air pendingin (*tube*) tanpa harus memindahkan dan membongkar alat sehingga pembersihan dapat dilakukan secara efektif.

3. Simpulan

Generator air cooler pada PT. X setelah pemakaian 5 tahun memiliki nilai efektivitas sebesar 53.06% dengan penurunan efektivitas sebesar 33.94% dari nilai efektivitas maksimal sebesar 87% hal ini disebabkan karena adanya kotoran yang mengendap pada *tube-tube generator air cooler* yang menyebabkan terhambatnya proses perpindahan panas.

Saran

Penulis menyarankan dalam membersihkan *tube* dengan cara injeksi cairan kimia atau *clean in place* (CIP) melalui *tube* utama untuk menghilangkan kerak dan kotoran yang menempel pada *tube* sehingga tidak diperlukan pembongkaran alat yang menyebabkan jangka waktu yang lebih lama.

Daftar Pustaka

- [1] A.Kahoul, H. M. R. Performance Study of Generator Air Cooler For The Hydro-Power Plant at Aswan High Dam. *Hydro-Power Generation Company, Aswan Egypt*. 2013, 9-13.
- [2] Abdul Rahman, F. Pengaruh Konsentrasi Silikon Oksida (SiO_2) Dalam Air Terhadap Efektivitas Generator Air Cooler pada Sistem PLTA. *Prosiding Seminar Hasil Penelitian (SNP2M)*, 2017, 1-2.
- [3] Aprianto, E. Analisa Unjuk Kerja Perpindahan Panas Air Cooler Generator Tipe Plate Finned-Tubes Compact Heat Exchanger pada Unit 7 PLTA Cirata. *Fakultas Teknik Unjani*, 2014.
- [4] Arisma, S. N. Mengoperasikan Sistem Udara Tekan (Udara untuk Control dan Services) PLTA Besar dan Mengoperasikan Sistem

- Penunjang (Auxiliary) PLTA Besar, Purwakarta: PT Pembangkit Jawa-Bali Unit Pembangkit Cirata, 2014.
- [5] Dewin Purnama, R.N. Analisis Perbandingan Laju Perpindahan Panas Antara Stainless Steel dan CuNi pada Air Cooler Generator PLTA. *Teknologika*, 2022, 1-8.
- [6] Holman, J. Heat Transfer Tenth Edition, New York: Mach Graw Hill. :2010. 521-586
- [7] Makmur Saini, S.A. Uji Performa Termoelektrik pada Generator Air Cooler. *Sinergi*, 2021, 1-2.
- [8] Sadik Kakac, H. L. Heat Exchanger Selection, Rating and Thermal Design. Florida: CRC PRESS. 2002