



Analisis Efektifitas Thermal pada Sistem Pendingin Udara Generator Melalui Modifikasi Laju Aliran 2 Fase Menjadi 4 Fase di PLTA Saguling

Rio Arman Saputra^{1*}, Muhammad Safi'i², Althesa Androva³

¹⁻³Program Studi Teknik Mesin, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang, Indonesia

Email: rioarmanss@gmail.com^{1*}, muhammadsafii@upgris.ac.id², althesaandrova@upgris.ac.id³

*Penulis Korespondensi: rioarmanss@gmail.com

Abstract. Generator air cooling system (Air Cooler) at the Saguling Hydroelectric Power Plant (PLTA Saguling) plays a crucial role in maintaining the operational reliability and efficiency of the 206.10 MVA generator units. Replacing the tube material from Cu-Ni to AISI 304 Stainless Steel resulted in reduced thermal performance because of its lower thermal conductivity. This study aims to analyze the thermal effectiveness before and after modifying the heat exchanger flow configuration from a 2-pass to a 4-pass system using the Log Mean Temperature Difference (LMTD) and Number of Transfer Units (NTU) methods. The analysis was conducted using actual operational data obtained from the plant under normal operating conditions. The modification successfully increased the air-side heat transfer rate (Q_{air}) from 342.28 J/s to 477.22 J/s and the water-side heat transfer rate (Q_{water}) from 419.06 J/s to 656.64 J/s. The thermal effectiveness (ϵ) also increased significantly from 63% to 72%, indicating improved heat transfer performance. These findings demonstrate that modifying the pass configuration effectively enhances cooling system performance and supports reliable generator operation at the Saguling Hydroelectric Power Plant.

Keywords: Air-Cooler Generator; Heat Exchanger; LMTD; NTU; Thermal Effectiveness.

Abstrak. Sistem pendingin udara generator (Air Cooler) di Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Saguling memiliki peran penting dalam menjaga keandalan operasional dan efisiensi unit generator berkapasitas 206,10 MVA. Penggantian material pipa dari Cu-Ni menjadi AISI 304 Stainless Steel mengakibatkan penurunan kinerja termal karena material tersebut memiliki konduktivitas termal yang lebih rendah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektifitas termal sebelum dan sesudah modifikasi konfigurasi aliran *heat exchanger* dari sistem 2-pass menjadi 4-pass menggunakan metode Log Mean Temperature Difference (LMTD) dan Number of Transfer Units (NTU). Analisis dilakukan berdasarkan data operasional aktual yang diperoleh dari pembangkit pada kondisi operasi normal. Hasil modifikasi menunjukkan peningkatan laju perpindahan panas pada sisi udara (Q_{air}) dari 342,28 J/s menjadi 477,22 J/s, serta pada sisi air (Q_{water}) dari 419,06 J/s menjadi 656,64 J/s. Efektivitas termal (ϵ) juga meningkat secara signifikan dari 63% menjadi 72%, yang menunjukkan peningkatan kinerja perpindahan panas. Temuan ini membuktikan bahwa modifikasi konfigurasi *pass* secara efektif meningkatkan kinerja sistem pendingin serta mendukung keandalan operasi generator di PLTA Saguling.

Kata kunci: Efektivitas Termal; Generator Air Cooler; LMTD; NTU; Penukar Kalor.

1. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Saguling memegang peranan krusial dalam sistem kelistrikan Jawa-Bali, khususnya sebagai penyedia energi puncak (peaking) dan pemulih daya utama ketika terjadi gangguan jaringan (black start). Untuk menjaga kontinuitas dan keandalan pasokan listrik, performa generator hidro harus dijaga dalam kondisi optimal. Selama proses konversi energi mekanik menjadi energi listrik, generator menghasilkan rugi-rugi tembaga, rugi-rugi inti, dan rugi-rugi mekanis yang bermanifestasi sebagai energi panas (termal) (Muna et al., 2023). Akumulasi panas yang berlebihan pada stator dan rotor dapat mempercepat penuaan isolasi, memicu korsleting, hingga menyebabkan kegagalan katastropik pada generator (Szamel & Oloo, 2024). Oleh karena itu, sistem pendingin udara generator (generator air cooling system) yang efektif mutlak diperlukan guna

menjaga temperatur operasi tetap berada di bawah batas termal yang diizinkan (Doost & Majlessi, 2015).

Media pendinginan ruang generator di PLTA Saguling menggunakan udara tertutup yang disirkulasikan melewati 8 buah air cooler compact heat exchanger pada setiap unitnya (The New Japan Engineering Consultants Inc, 1985a). Masalah muncul ketika tube bermaterial Cu-Ni diganti menjadi AISI 304 guna mengatasi kebocoran. Meskipun ketahanan korosi meningkat, karakteristik termal AISI 304 yang memiliki konduktivitas termal rendah ($k = 24 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) menyebabkan penurunan temperatur fluida (ΔT) yang tidak maksimal (Graves et al., 1991). Generator air cooler merupakan suatu alat yang berfungsi sebagai media penukar kalor dalam proses pendinginan di generator (Muharam et al., n.d.). Pendingin udara yang digunakan adalah Closed cooling water system yaitu sistem pendingin utama siklus tertutup dengan menggunakan media air pendingin yang sama secara berulang dalam sirkulasi tertutup (Muhammad & Yulianto, 2018). Luluhan udara disediakan di kedua sisi stator untuk mencapai sirkulasi pendingin udara yang terkontrol. Aliran air pendingin dikontrol baik dari katup inlet maupun outlet (Anwar, n.d.). Sistem pendingin konvensional pada generator umumnya memanfaatkan media fluida dalam konfigurasi laju aliran dua fase (seperti pola aliran udara-air atau distribusi fluida masuk-keluar tertentu) (Doost & Majlessi, 2015). Namun, seiring dengan meningkatnya beban operasi dan faktor penuaan komponen (aging effect), sistem dua fase seringkali mengalami keterbatasan dalam mentransfer beban termal yang tinggi. Fenomena seperti distribusi temperatur yang tidak merata (hotspot), penurunan koefisien perpindahan panas akibat degradasi fluida, serta resistensi termal yang tinggi pada sirkuit pendingin menjadi kendala utama yang dapat menurunkan efisiensi generator (Deng et al., 2021). Ketika laju aliran dua fase tidak lagi mampu mengimbangi laju pembangkitan panas, diperlukan inovasi rekayasa termal untuk meningkatkan kapasitas pelepasan panas tanpa harus mengubah dimensi fisik generator secara masif (Li et al., 2025).

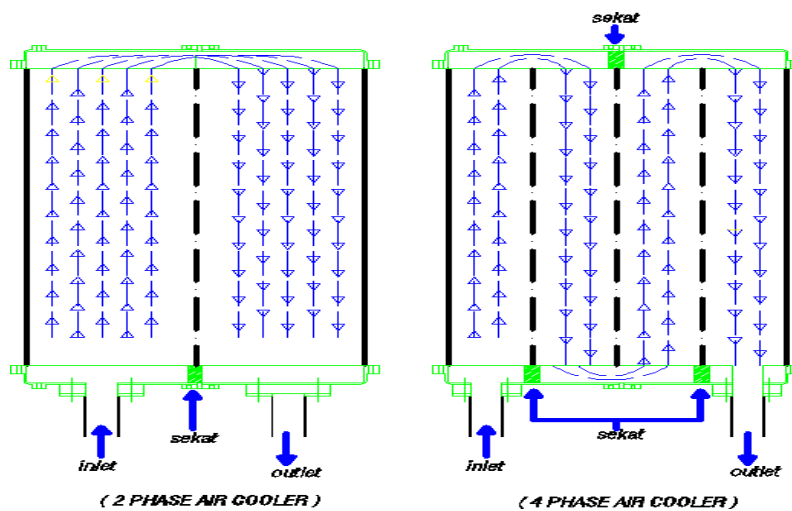
Salah satu solusi inovatif yang diusulkan dalam penelitian ini adalah memodifikasi sirkuit pendingin dengan mengubah karakteristik laju aliran dari dua fase menjadi empat fase. Modifikasi ini bertujuan untuk memecah atau mendistribusikan kembali jalur aliran fluida pendingin menjadi empat tahapan atau zona sirkulasi yang lebih optimal. Dengan membagi aliran menjadi empat fase, luas permukaan kontak efektif perpindahan panas dapat ditingkatkan, turbulensi aliran fluida pendingin dapat dioptimalkan, dan waktu tinggal (residence time) fluida penyerap panas dapat diatur secara lebih presisi (Kim et al., 2008; Ponce-Ortega et al., 2008). Langkah modifikasi ini diharapkan mampu menurunkan resistensi termal total pada sistem pendingin, mengeliminasi titik-titik panas lokal (hotspot), dan meningkatkan efisiensi termal (thermal effectiveness) pendingin udara generator secara signifikan (Kim et al., 2008; Ponce-Ortega et al., 2008).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara komparatif efektivitas termal sistem

pendingin udara generator di PLTA Saguling sebelum dan sesudah dilakukan modifikasi laju aliran dari dua fase menjadi empat fase. Analisis dilakukan dengan mengevaluasi parameter termal utama, termasuk koefisien perpindahan panas konveksi, laju penyerapan kalor (Q), perbedaan temperatur rata-rata logaritmik (LMTD), dan efektivitas pendingin (ϵ). Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi empiris dan rekomendasi teknis bagi pengelolaan aset di PLTA Saguling dalam memitigasi risiko overheating, serta menjadi rujukan ilmiah dalam bidang rekayasa termal dan optimasi sistem pendingin pembangkit listrik tenaga air.

2. METODE PENELITIAN

Model Fisik



Gambar 1. Modifikasi laju aliran Sistem Pendingin udara Generator dari 2 Fase menjadi 4 Fase.

Gambar 1 merupakan Sistem Pendingin udara yang sudah dimodifikasi yang awalnya laju alirannya 2 Fase dibuat menjadi 4 Fase.

Berikut Spesifikasi dan Dimensi Material Sistem Pendingin Udara (Generator The New Japan Engineering Consultants Inc, 1985a):

- a. Tube sheet : stainless steel AISI 304 (Seamless),
- b. Fin : aluminium alloy 99.2%,
- c. Profil Heade dan Frame : Steel Galvanized
- d. $\varnothing \text{ tube} = \frac{5}{8} \text{ inch}$
- e. Thickness = 0.8 mm
- f. N_{tube} (2 Fasa) = 180 tube – 5 rows
- g. N_{tube} (4 Fasa) = 216 tube – 6 rows
- h. Panjang Tube = 2400 mm

Langkah Penelitian

Dalam Penelitian ini, penulis menggunakan metode observasi data Historis operasi

realtime di lapangan pada alat, dan juga data dari penelitian hasil modifikasi yang sudah diterapkan pada PLTA Saguling. Selanjutnya, penulis akan mengolah data yang sudah dikumpulkan untuk menganalisis Efektifitas Thermal antara laju aliran 2 Fase dan 4 Fase menggunakan dua metode perhitungan Numerik standar transfer panas: Metode LMTD (Log Mean Temperature Difference) untuk mencari kapasitas panas, dan Metode NTU (Number of Transfer Units) untuk menentukan efektivitas.

Reduksi Data

Berdasarkan Observasi data historis operasi pada kondisi aktual khususnya pada temperatur Air dan Udara Air Cooler, penulis mendapatkan data sebagai berikut :

Tabel 1. Data Aktual Temperatur Air pada Air Cooler 2 Fase PLTA Saguling

A/C	In	Out	ΔT
Nomor	(°C)	(°C)	
1	60.6	40.9	19.7
2	60.6	42.0	18.6
3	60.6	41.1	19.5
4	60.6	42.0	18.6
5	60.6	40.5	20.1
6	60.6	41.4	19.2
7	60.6	41.0	19.6
8	60.6	40.0	20.6

Tabel 2. Data Aktual Temperatur Udara pada Air Cooler 2 Fase PLTA Saguling

A/C	In	Out	ΔT
Nomor	(°C)	(°C)	
1	29.7	33.5	3.8
2	29.7	33.5	3.8
3	29.7	33.5	3.8
4	29.7	35.5	5.8
5	29.729.729.729.7	33.0	3.3
6		32.5	2.8
7		33.5	3.8
8		33.5	3.8

Sedangkan untuk hasil Observasi dari penelitian sebelumnya mengenai modifikasi Laju Aliran 2 fase menjadi 4 Fase (Sujana et al., 2012) di dapatkan data :

- Kondisi 2 Fasa: Suhu udara masuk ($T_{h,in}$): 60.6 °C, Suhu udara keluar ($T_{h,out}$): 41.1°C (Rata-rata $\Delta T_{udara} = 19.5^{\circ}C$), Suhu air masuk ($T_{c,in}$): 29.7 °C, Suhu air keluar ($T_{c,out}$): 33.5°C (Rata-rata $\Delta T_{air} = 3.8^{\circ}C$, Kecepatan aliran air aktual: 1.47 m/s.
- Kondisi 4 Fasa (Pasca Modifikasi): Suhu udara masuk ($T_{h,in}$): 60.6 °C, Suhu udara keluar ($T_{h,out}$): 34.6 °C (Rata-rata $\Delta T_{udara} = 26^{\circ}C$, Suhu air masuk ($T_{c,in}$): 29.7 °C, Suhu air keluar ($T_{c,out}$): 35.5°C, Kecepatan aliran air aktual: 2.47 m/s.

Tabel 3. Data Operasional Hasil Modifikasi Jumlah Fase Air Cooler PLTA Saguling

A/C	Q_{udara}	Q_{air}	V_{air}
Fase	(J/s)	(J/s)	(m/s)
2	342.28	419.06	1.47

4	477.22	656.64	2.47
---	--------	--------	------

Dari data hasil observasi penulis, maka penulis dapat mencari efektifitas termal sistem pendingin udara generator dengan metode LMTD (Log Mean Temperature Difference) untuk mencari kapasitas panas dan untuk menentukan efektifitas termal menggunakan Metode NTU (Number of Transfer Unit). Perhitungan LMTD dapat dicari menggunakan rumus (Incropera & DeWitt, 1981):

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

....(i)

Dimana :

$$\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,out}$$

$$\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,in}$$

....(ii)

Karena konfigurasi berubah menjadi multi-pass (2-pass atau 4-pass), digunakan faktor koreksi (F_t) (The New Japan Engineering Consultants Inc, 1985b):

$$\Delta T_{actual} = F_t \cdot \Delta T_{LMTD}$$

.....(iii)

Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh (U) dapat dihitung menggunakan rumus (The New Japan Engineering Consultants Inc, 1985b):

$$\epsilon = \frac{Q_{Aktual}}{Q_{Maks}}$$

.....(iv)

Dimana :

$$Q_{maks} = C_{min} \cdot (T_{h,in} - T_{c,in})$$

.....(v)

Perhitungan Number of Transfer Units (NTU):

Untuk jenis aliran cross-flow compact heat exchanger dengan kedua fluida unmixed, hubungan antara efektifitas dan NTU dinyatakan melalui persamaan empiris berikut (*The New Japan Engineering Consultants Inc, 1985b*):

$$\epsilon = 1 - \exp\left[\frac{\exp(-C_r \cdot NTU^{0.78}) - 1}{C_r \cdot NTU^{0.22}}\right]$$

.....(vi)

Dimana rasio kapasitas panas C_r adalah $C_r = \frac{C_{min}}{C_{maks}}$

....(vii)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Metode LMTD :

- Kondisi 2 Fasa :

$$\Delta T_{LMTD,2F} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{27.1 - 11.4}{\ln\left(\frac{27.1}{11.4}\right)} = \frac{15.7}{0.8658} = 18.13^\circ C$$

....(viii)

- Kondisi 4 Fasa :

$$\Delta T_{LMTD,4F} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{25.1 - 4.9}{\ln\left(\frac{25.1}{4.9}\right)} = \frac{2.2}{1.6336} = 12.37^\circ C$$

.....(ix)

Penurunan nilai LMTD pada kondisi 4 fasa menandakan profil perpindahan panas mendekati kondisi akhir fluida yang lebih rapat, mengindikasikan pelepasan kalor ruang yang lebih intensif pada luasan penukar kalor yang sama (Incropera & DeWitt, 1981).

Analisis Laju Perpindahan Panas Aktual :

- Kondisi 2 Fasa :

$$Q_{aktual} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T =$$

$$Q_{udara} = 342.28 \text{ J/s}, Q_{air} = 419.06 \text{ J/s} \text{ (Li et al., 2025)}$$

....(x)

- Kondisi 4 Fasa :

$$Q_{aktual} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T =$$

$$Q_{udara} = 477.22 \text{ J/s}, Q_{air} = 656.64 \text{ J/s} \text{ (Li et al., 2025)}$$

.....(xi)

Peningkatan laju aliran air dari 1,47 (m/s) ke 2,47 (m/s) memicu turbulensi aliran di dalam tube (menaikkan Bilangan Reynolds dan Nusselt), sehingga koefisien perpindahan panas konveksi meningkat tajam (Anwar, n.d.).

Perhitungan Metode Efektifitas NTU :

- Berdasarkan analisis laju kapasitas panas $C = \dot{m} \cdot C_p$) didapatkan bahwa kapasitas panas udara merupakan nilai minimum ($C_{min} = C_{udara}$) :

$$C_{min,2F} = 17.82 \frac{W}{K}, C_{min,4F} = 18.35 \frac{W}{K}$$

Perhitungan Q_{maks} :

.....(xii)

- $Q_{maks,2F} = 17.82 \times (60.6 - 29.7) = 550.64 \text{ W}$

.....(xiii)

- $Q_{maks,4F} = 18.35 \times (60.6 - 29.7) = 567.02 \text{ W}$

....(xiv)

- Perhitungan Efektivitas Thermal :

- Kondisi 2 Fasa : $\epsilon_{2F} = \frac{Q_{aktual,udara}}{Q_{maks}} = \frac{342.28}{550.64} = 0.63 \rightarrow 63\%$

.....(xv)

- Kondisi 4 Fasa : $\epsilon_{4F} = \frac{Q_{aktual,udara}}{Q_{maks}} = \frac{477.22}{567.02} = 0.72 \rightarrow 72\%$ (berdasarkan nilai ukur efektifitas sistem)

.....(xvi)

- Perhitungan Number of Transfer Unit (NTU) :

$$\epsilon = 1 - \exp \left[\frac{\exp(-C_r \cdot NTU^{0.78}) - 1}{C_r \cdot NTU^{0.22}} \right]$$

Dimana rasio kapasitas panas adalah : $C_r = \frac{C_{min}}{C_{maks}}$

.....(xvii)

- Pada 2 Fasa $C_r = \frac{17.82}{107.4} = 0.166$

....(xviii)

- Pada 4 Fasa $C_r = \frac{18.35}{107.64} = 0.170$

.....(xix)

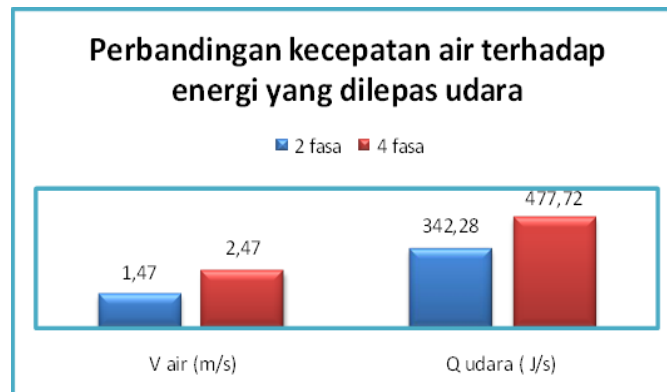
Tabel 4. Data Hasil Observasi dan Perhitungan Hasil Modifikasi Jumlah Fase Air Cooler PLTA Saguling)

A/C	Q_{udara}	Q_{air}	V_{air}	Efektifitas Termal	Number Transfer
Fase	(J/s)	(J/s)	(m/s)	(ϵ)	Unit (NTU)
2	342.28	419.06	1.47	63%	1.22
4	477.22	656.64	2.47	72%	1.78

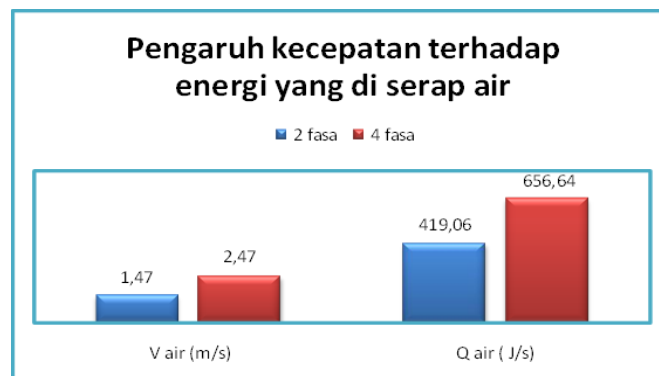
Grafik Hasil: Pengaruh Kecepatan Terhadap energi panas yang diserap air :

Gambar 2. Grafik perbandingan pengaruh kecepatan terhadap energi panas yang dilepas air.

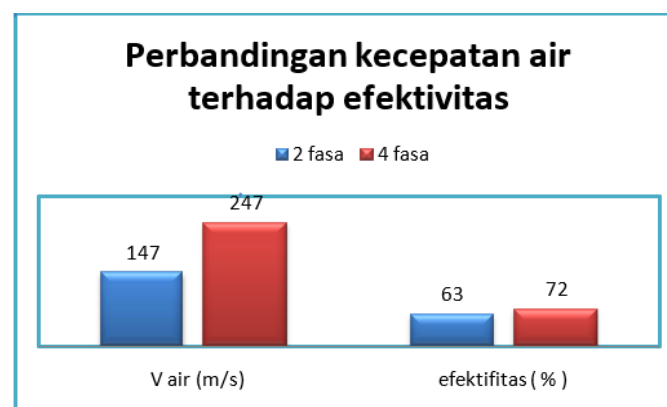
Pengaruh Kecepatan terhadap energi panas yang dilepas udara :



Gambar 3. Grafik perbandingan pengaruh kecepatan terhadap energi panas yang dilepas udara.



Pengaruh Kecepatan air terhadap efektifitas



Gambar 4. Grafik perbandingan pengaruh kecepatan air terhadap efektifitas.

Modifikasi fasa dengan cara menambahkan sekat (screen) pada header memaksa fluida air pendingin berbelok melintasi tube secara bolak-balik hingga 4 kali fasa lintasan. Mekanisme ini secara dramatis meningkatkan kecepatan linier fluida di dalam pipa dari 1.47 m/s menjadi 2.47 m/s tanpa memerlukan penggantian pompa suplai utama. Sesuai dengan hukum perpindahan panas konveksi paksa (forced convection), peningkatan kecepatan fluida

berbanding lurus dengan peningkatan efektivitas penukar kalor. Peningkatan efektivitas sebesar 9% ini berhasil menurunkan temperatur ruang kerja generator ke batas aman operasional, sehingga menurunkan risiko unit trip akibat overheating.

KESIMPULAN

Studi analisis termal detail menggunakan metode LMTD dan (ϵ) NTU membuktikan bahwa rekayasa konfigurasi aliran sirkuit penukar kalor dari 2 fasa menjadi 4 fasa merupakan solusi yang sangat efektif. Melalui metode ini, performa buruk material tube AISI 304 dapat dikompensasi secara optimal melalui peningkatan koefisien konveksi fluida cair. Efektivitas termal penukar kalor meningkat dari 63% menjadi 72%, yang secara langsung mengamankan Equivalent Availability Factor (EAF) dan keandalan operasional sistem kelistrikan PLTA Saguling.

DAFTAR REFERENSI

- Ben-Mansour, R., et al. (2023). Experimental/numerical investigation and prediction of fouling in multiphase flow heat exchangers: A review. *Energies*, 16(6), 2812. <https://doi.org/10.3390/en16062812>
- Deng, D., Zeng, L., & Sun, W. (2021). A review on flow boiling enhancement and fabrication of enhanced microchannels of microchannel heat sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 175, 121332. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121332>
- Doost, A. K., & Majlessi, R. (2015). Heat transfer analysis in cooling system of hydropower's generator. *Open Journal of Applied Sciences*, 5(3), 98–107. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2015.53010>
- Graves, R. S., Kollie, T. G., McElroy, D. L., & Gilchrist, K. E. (1991). The thermal conductivity of AISI 304L stainless steel. *International Journal of Thermophysics*, 12(2), 409–415. <https://doi.org/10.1007/BF00500761>
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1981). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons.
- Kim, M. S., Lee, K. S., & Song, S. (2008). Effects of pass arrangement and optimization of design parameters on the thermal performance of a multi-pass heat exchanger. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29(1), 352–363. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.05.010>
- Li, J., et al. (2025). Prediction of critical heat flux using different methods: A review from empirical correlations to the cutting-edge machine learning. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 160, 108362. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108362>
- Muhammad, I., & Yulianto, S. (2018). *Redesign plate heat exchanger pada closed cooling water system PLTGU kapasitas 740 MW*.
- Muharam, M. G., Melkias, A. A., & Indriyani, D. (n.d.). *Evaluasi efektivitas perpindahan panas generator air cooler pada PT. X*.

- Muna, Z., et al. (2023). Studi perubahan beban terhadap rugi-rugi daya output generator sinkron tiga phase 20 MW pada generator turbin gas unit 2 pada PT Pupuk Iskandar Muda. *Jurnal Tektro*, 7(1).
- Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., & Jiménez-Gutiérrez, A. (2008). Design and optimization of multipass heat exchangers. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(5), 906–913. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.02.004>
- Sujana, J., Suprpto, Setiaji, S., & Widyantara, A. (2012). *Modifikasi jumlah fasa air cooler pada sistem pendingin udara generator–PLTA Saguling*.
- Szamel, L., & Oloo, J. (2024). Monitoring of stator winding insulation degradation through estimation of stator winding temperature and leakage current. *Machines*, 12(4), 220. <https://doi.org/10.3390/machines12040220>
- The New Japan Engineering Consultants Inc. (1985a). *Saguling Hydroelectric Power Plant operation and maintenance manual for generating equipment* (Vol. 1). Perusahaan Listrik Negara.
- The New Japan Engineering Consultants Inc. (1985b). *Saguling Hydroelectric Power Plant operation and maintenance manual for generating equipment* (Vol. 2). Perusahaan Listrik Negara.