

EFEKTIVITAS ALAT PENUKAR KALOR PADA SISTEM PENDINGIN GENERATOR PLTA

Khairil Anwar*

Abstract

This paper discuss about effectiveness of heat exchanger in the cooling system of hydropower generator. Data obtained from generator cooled PLTA at Sulewana, Poso. The type of heat exchanger is compact heat exchanger, with dimensions: : $S_L=0.021$ m, $S_D=0.029$ m, $S_T=0.04$ m, $L=1.5$ m, $D_{Tubing}=0.019$ m. The result shows that air temperature continues to decrease after passing through the cooler. Air temperature during the first pass through to the cooler is 75°C and continues to decline as a generator that drives the movement of air through the cooler, and the cooling water continues to rise from the initial temperature of 28°C to 34°C . While the effectiveness of heat exchanger, has increase due to deacresing air temperature circulated inside the generator by 37 %.

Keyword: Heat transfer, Heat Exchanger, Generator cooler, NTU method, Effectiveness

1. Pendahuluan

Generator merupakan salah satu komponen vital dalam sebuah pembangkit listrik. Generator berfungsi untuk mengubah energi mekanik yang berasal dari turbin menjadi energi listrik. Komponen utama generator terdiri dari bagian berputar yang dinamakan rotor dan bagian yang diam yang dinamakan stator. berbeda halnya dengan turbin, generator memerlukan pendinginan yang baik untuk memperpanjang umur pemakaian. hal ini disebabkan karena temperatur kerja yang sangat tinggi dapat menyebabkan kerusakan pada komponen generator.

Terjadinya panas pada generator / alternator disebabkan karena adanya rugi tembaga dan rugi Besi. Yang dimaksud dengan rugi tembaga adalah panas yang disebabkan karena adanya arus pembebanan yang mengalir melalui penghantar tembaga stator dan rotor. Sedangkan rugi besi adalah kerugian yang diakibatkan dari panas yang ditimbulkan dengan adanya arus pusar (eddy current) yang terjadi pada inti stator maupun rotor. Selain panas yang diakibatkan seperti tersebut diatas, juga terjadi panas yang diakibatkan dari gesekan dan angin. Panas yang berlebihan diakibatkan dari seperti yang diuraikan diatas pada generator perlu dicegah, hal ini dapat mengakibatkan kerusakan isolasi penghantar atau

terbakar, oleh sebab itu perlu adanya pendinginan. Kerugian-kerugian yang menyebabkan panas tersebut harus diusahakan kecil sehingga tidak lebih dari 2% dari output alternator.

Untuk menjaga agar suhu dalam generator tetap stabil sesuai dengan suhu yang diharapkan maka digunakan sebuah alat penukar kalor. Alat penukar kalor merupakan piranti yang digunakan untuk melakukan perpindahan energi *thermal* dari satu fluida ke fluida lain. pada proses pendinginan generator, fluida yang akan didinginkan adalah udara panas dan fluida yang mendinginkan berupa fluida cair yang mengalir dalam berkas tabung. Untuk meningkatkan laju perpindahan kalor pada fluida maka disepanjang pipa dipasang sirip.

Umumnya penukar kalor digunakan dalam jangka panjang dan tanpa merubah kondisi operasinya. Untuk itu yang perlu diperhatikan adalah jenis fluida yang bekerja di dalamnya, dimensi yang dibutuhkan, serta bentuk konfigurasinya. Dalam analisis kinerja alat penukar kalor, hukum pertama termodinamika menyatakan bahwa perpindahan kalor rata-rata antara fluida panas sama dengan perpindahan kalor rata-rata pada fluida dingin. Untuk mempermudah analisis penukar kalor diperlukan kombinasi laju aliran massa dengan panas spesifik fluida sehingga menjadi satu kuantitas yang disebut *kapasitas*

* Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Tadulako, Palu

panas rata-rata. Untuk itu, tulisan ini bertujuan untuk menganalisis kinerja alat penukar kalor yang digunakan untuk mendinginkan generator, seberapa efektif dan berapa besar laju perpindahan panas yang terjadi antara air dan udara yang akan didinginkan di dalam alat penukar kalor tersebut.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Sistem Pendingin Generator

Generator merupakan perangkat yang digunakan untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Tenaga listrik yang dihasilkan generator dapat berupa arus searah (DC) maupun arus bolak-balik (AC). Hal ini bergantung dengan konstruksi dari generator dan sistem pengambilan arusnya.

Generator terdiri atas bagian yang berputar yang disebut rotor dan bagian yang diam yang disebut stator, dan celah udara yang memisahkan antara stator dan rotor. Putaran rotor yang terus menerus terhadap stator menyebabkan meningkatnya temperatur udara dalam generator.

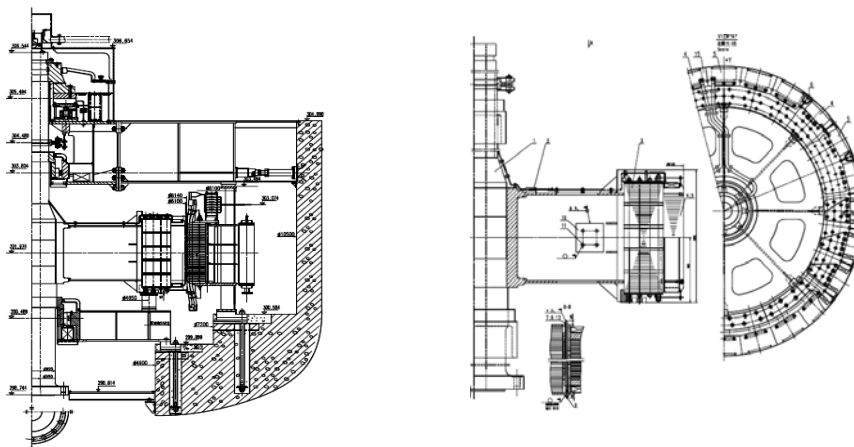
Sistem sirkulasi udara:

Sebuah sistem sirkulasi udara tertutup digunakan untuk mendinginkan generator. Fan dipasang pada kedua sisi dari bagian tengah rotor untuk menghasilkan tekanan udara yang dibutuhkan. Udara pendingin masuk dari kedua ujung rotor ke dalam ruang di antara kutub dan

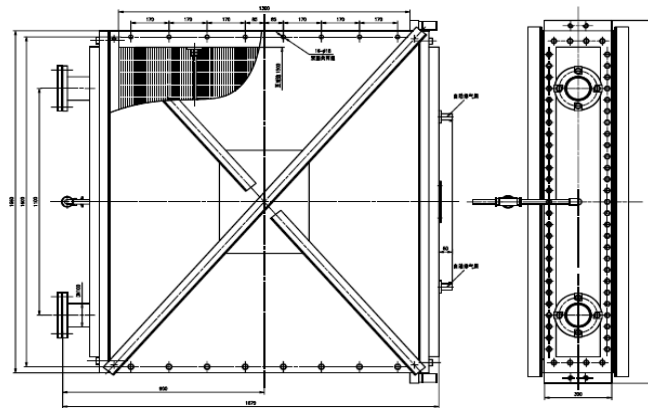
celah udara. Efek sentrifugal dari kutub yang berputar mengalihkan udara dalam arah radial ke dalam saluran pendingin inti stator dan melewati stator frame ke penukar kalor air-udara, di mana udara hangat didinginkan. Penukar kalor dipasang ke stator frame.

Sistem Pendinginan Udara:

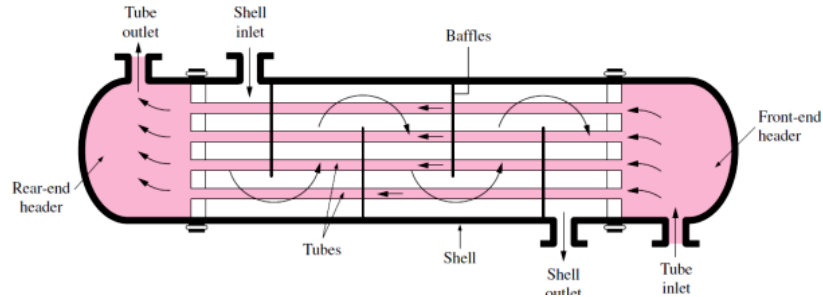
Sistem pendinginan generator adalah dengan sirkulasi udara sirkuit tertutup. Udara hangat didinginkan oleh sebuah alat penukar kalor air-udara. Ada delapan pendingin udara permukaan dipasang dalam silinder mesin untuk mendinginkan udara yang digunakan untuk pendinginan bagian rotor dan stator. Pendingin udara yang digunakan adalah jenis penukar kalor udara ke air yang bersirip, di mana udara sekitar dari mesin lewat dan kemudian disirkulasikan kembali oleh aksi sentrifugal dari rotor. Luluang udara disediakan di kedua sisi stator untuk mencapai sirkulasi pendingin udara yang terkontrol. Aliran air pendingin dikontrol baik dari katup inlet maupun outlet. Pemantauan temperatur pendingin udara permukaan berasal dari unit controller dan komputer. Kadang – kadang terdapat pengotoran berupa kerak yang menempel pada pipa pendingin yang kemungkinan dapat mengurangi efektivitas pendinginan, sehingga pembersihan berkala mutlak dilakukan atau mengambil sumber air pendingin yang lebih baik sebagai tindakan preventif untuk mencegah pengotoran pada alat penukar kalor.



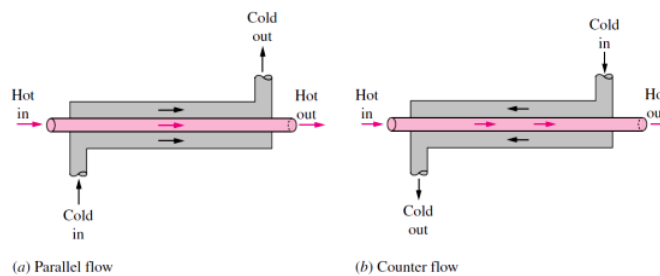
Gambar 1. Generator Assembly



Gambar 2. Alat penukar kalor untuk pendingin generator



Gambar 3. Shell and Tube heat exchanger



Gambar 4. Double pipe heat exchanger

2.2 Alat Penukar Kalor

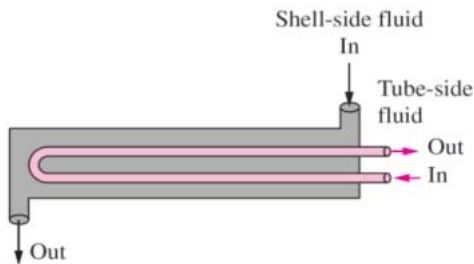
Penukar Kalor merupakan sebuah alat yang berfungsi untuk menurunkan dan atau meningkatkan temperatur sebuah sistem dengan memanfaatkan suatu media pendingin atau pemanas sehingga kalor dapat berpindah dari temperatur yang tinggi ke temperatur yang lebih rendah. Ada beberapa jenis penukar kalor, seperti Shell and Tube, double pipe dan, Compact heat exchanger.

Shell and Tube merupakan jenis penukar kalor yang terdiri dari sebuah tabung (Shell) yang di dalamnya tersusun berkas pipa (Tube). Pada jenis alat penukar kalor ini, fluida panas mengalir di dalam tube sedangkan fluida dingin mengalir di luar tube atau di dalam shell atau sebaliknya.

Karena kedua aliran fluida melintasi penukar kalor hanya sekali, maka susunan ini disebut penukar kalor satu lintas (*single-pass*). Jika kedua fluida itu mengalir dalam arah yang sama,

maka penukar kalor ini bertipe aliran searah (*parallel flow*). Jika kedua fluida itu mengalir dalam arah yang berlawanan, maka penukar kalor ini bertipe aliran berlawanan.

Penukar kalor *Shell and Tube* memiliki beberapa variasi dan diberi nama sesuai dengan konfigurasi pipa dan tabungnya seperti berikut:

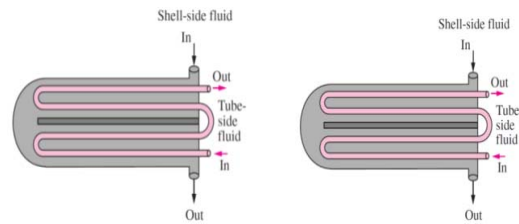


Gambar 5. *Shell and Tube heat exchanger (one shell pass and two tube passes)*

Dalam penukar kalor kita mengenal koefisien perpindahan panas total atau biasa dituliskan dengan U dan ini identik dengan

koefisien perpindahan panas konveksi h dimana sama-sama bersatuan $W/m^2 \cdot ^\circ C$:

$$\frac{1}{U} \approx \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_p}$$



Gambar 6. *Shell and Tube heat exchanger (two shell passes and four tube passes)*

2.3 Analisis Penukar Kalor

Umumnya penukar kalor digunakan dalam jangka panjang dan tanpa merubah kondisi operasinya. Dalam merencanakan sebuah penukar kalor hal-hal yang perlu diperhatikan adalah jenis fluida yang bekerja di dalamnya, dimensi yang dibutuhkan, serta konfigurasinya.

Tabel 1. Representasi nilai koefisien perpindahan kalor total U pada penukar kalor (Cengel 2002)

Tipe penukar kalor	U ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)*
Air ke air	850-1700
Air ke oli	100-350
Air ke bensin atau minyak tanah	300-1000
Pemanas air pengisi ketel	1000-8500
Uap ke minyak bakar ringan	200-400
Uap ke minyak bakar berat	50-200
Kondensor uap	1000-6000
Kondensor Freon (pendingin air)	300-1000
Kondensor amoniak (pendingin air)	800-1400
Kondensor alkohol (pendingin air)	250-700
Gas ke gas	10-40
Air ke udara pada pipa bersirip (air di dalam pipa)	30-60 [†]
Uap ke udara pada pipa bersirip (Uap di dalam pipa)	400-850 [†]
	30-300 [†]
	400-4000 [‡]

*Untuk konversi ke $Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$ kalikan dengan 0.176

[†] Area permukaan didasarkan pada sisi air

[‡] Area permukaan didasarkan pada sisi uap atau air

Hukum pertama Thermodinamika juga sangat diperlukan ketika kita menganalisis alat penukar kalor, dimana menyatakan bahwa perpindahan kalor rata-rata antara fluida panas sama dengan perpindahan kalor rata-rata pada fluida dingin (Cengel,2002).

$$\dot{Q} = m_c C_{p,c} (T_{c,out} - T_{c,in})$$

dan

$$\dot{Q} = m_h C_{p,h} (T_{h,in} - T_{h,out})$$

dimana :

m_c, m_h = laju aliran massa

$C_{p,c}, C_{p,h}$ = panas spesifik

$T_{c,in}, T_{h,in}$ = temperatur masuk

$T_{c,out}, T_{h,out}$ = temperatur keluar

c dan h adalah fluida dingin dan panas.

Untuk mempermudah analisis penukar kalor diperlukan kombinasi laju aliran massa dengan panas spesifik fluida sehingga menjadi satu kuantitas yang disebut *kapasitas panas rata-rata* (Cengel 2002).

$$C_h = m_h C_{p,h} \text{ dan } C_c = m_c C_{p,c}$$

Dari persamaan di atas kita substitusikan ke persamaan sebelumnya sehingga menjadi:

$$\dot{Q} = C_h (T_{h,in} - T_{h,out})$$

dan

$$\dot{Q} = C_c (T_{c,out} - T_{c,in})$$

2.4 Efektivitas dengan metode NTU (Number of Transfer Unit)

Hubungan efektivitas pada penukar kalor secara khas melibatkan besaran tanpa dimensi UA_s/C_{min}

$$NTU = \frac{UA_s}{C_{min}} = \frac{UA_s}{(m C_p)_{min}}$$

dimana U adalah koefisien perpindahan panas total dan A_s adalah luasan area perpindahan panas pada penukar kalor. Selain itu rasio kapasitas c juga perlu digunakan untuk menganalisis alat penukar kalor

$$c = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

Efektivitas penukar kalor dapat kita lihat sebagai fungsi dari NTU dan c seperti berikut:

$$\varepsilon = \text{fungsi}(UA_s/C_{min}), \\ C_{min}/C_{max} = \text{fungsi}(NTU, c)$$

Sedangkan hubungan antara NTU dan efektivitas terhadap jenis jenis penukar kalor dapat kita lihat pada tabel berikut:

Tabel 2. Korelasi NTU terhadap penukar kalor: $NTU = (UA_s/C_{min})$, dan $c = C_{min}/C_{max} = (m C_p)_{min} / (m C_p)_{max}$

Heat exchanger type	NTU relation
1 <i>Double-pipe:</i> Parallel-flow	$NTU = -\frac{\ln [1 - \varepsilon(1 + c)]}{1 + c}$
Counter-flow	$NTU = \frac{1}{c - 1} \ln \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon c - 1} \right)$
2 <i>Shell and tube:</i> One-shell pass 2, 4, . . . tube passes	$NTU = -\frac{1}{\sqrt{1 + c^2}} \ln \left(\frac{2/\varepsilon - 1 - c - \sqrt{1 + c^2}}{2/\varepsilon - 1 - c + \sqrt{1 + c^2}} \right)$
3 <i>Cross-flow (single-pass)</i> C_{max} mixed, C_{min} unmixed	$NTU = -\ln \left[1 + \frac{\ln (1 - \varepsilon c)}{c} \right]$
C_{min} mixed, C_{max} unmixed	$NTU = -\frac{\ln [c \ln (1 - \varepsilon) + 1]}{c}$
4 <i>All heat exchangers</i> with $c = 0$	$NTU = -\ln(1 - \varepsilon)$

Tabel 3. Korelasi efektivitas pada penukar kalor: $NTU=(UA_s/C_{min})$, dan $c=C_{min}/C_{max} = \frac{(m \cdot C_p)_{min}}{(m \cdot C_p)_{max}}$

Heat exchanger type	Effectiveness relation
1 <i>Double pipe:</i>	
Parallel-flow	$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + c)]}{1 + c}$
Counter-flow	$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - c)]}{1 - c \exp[-NTU(1 - c)]}$
2 <i>Shell and tube:</i>	
One-shell pass 2, 4, . . . tube passes	$\epsilon = 2 \left\{ 1 + c + \sqrt{1 + c^2} \frac{1 + \exp[-NTU\sqrt{1 + c^2}]}{1 - \exp[-NTU\sqrt{1 + c^2}]} \right\}^{-1}$
3 <i>Cross-flow (single-pass)</i>	
Both fluids unmixed	$\epsilon = 1 - \exp \left\{ \frac{NTU^{0.22}}{c} [\exp(-c NTU^{0.78}) - 1] \right\}$
C_{max} mixed, C_{min} unmixed	$\epsilon = \frac{1}{c} (1 - \exp \{1 - c[1 - \exp(-NTU)]\})$
C_{min} mixed, C_{max} unmixed	$\epsilon = 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{c} [1 - \exp(-c NTU)] \right\}$
4 <i>All heat exchangers with $c = 0$</i>	$\epsilon = 1 - \exp(-NTU)$

(sumber : Cengel, 2002)

Dari nilai efektivitas ini dapat diperhitungkan perpindahan panas total sebagai berikut:

$$Q = \epsilon \cdot Q_{max}$$

3. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan di PT. Poso Energy, Desa Sulewana Kabupaten Poso, Provinsi Sulawesi Tengah. Pengambilan data dilakukan dengan cara observasi dan pengukuran langsung di lapangan pada obyek penelitian, serta informasi-informasi tambahan berupa spesifikasi penukar kalor dan gambar desain yang diperoleh dari departemen engineer.

Data yang diperoleh meliputi data primer dan data sekunder.

3.1 Data primer

Observasi yaitu pengamatan awal untuk memperoleh gambaran tentang informasi secara umum tentang lokasi penelitian (tahap awal), pada tahapan observasi selanjutnya adalah pengumpulan data.

Wawancara dilakukan secara langsung dengan informan yang berada di lokasi penelitian. Wawancara dilakukan untuk memperoleh informasi sehubungan dengan objek penelitian.

Dokumentasi yaitu mencari data melalui berbagai pihak, baik foto dan dokumen, yang diperoleh pada kawasan penelitian.

3.2 Data Sekunder

Merupakan data pelengkap yang diperoleh dari perusahaan, data-data ini berupa literatur yang berhubungan dengan obyek yang akan diteliti.

3.3 Metode Analisis Data

Analisis dimulai dari tahap prosedur pengambilan data. Data yang diambil merupakan data yang terkait dengan obyek yang akan diteliti.

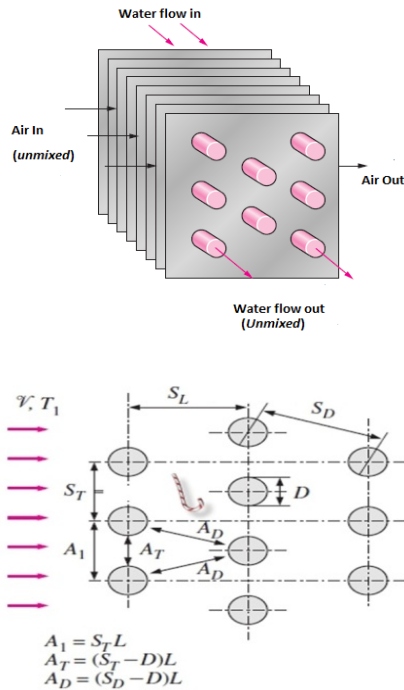
Data temperatur dan dimensi penukar kalor

$T_{udara \text{ in}}$ (°C)	= 75
$T_{air \text{ in}}$ (°C)	= 28
S_L (m)	= 0.021
S_D (m)	= 0.029347
S_T (m)	= 0.04
L (m)	= 1.5
D_{tubing} (m)	= 0.019
V_{udara} (m/s)	= 21
A_t	= 0.033
D_t	= 0.015521
A_l	= 0.0615
N_L	= 3
N_t	= 38

Berdasarkan data yang telah diambil kemudian, dianalisis besarnya laju energi panas yang berpindah dari generator ke dalam cooler water. Analisis ini dihitung berdasarkan persamaan heat transfer secara konduksi maupun secara konveksi paksa.

Seluruh hasil analisis adalah untuk mengetahui jumlah laju perpindahan kalor yang terjadi pada cooling water generator.

Komponen akhir yang dapat dianalisis adalah tingkat pendinginan dari cooling water yaitu untuk memperoleh temperatur yang diinginkan.



Gambar 7. Skema dan konfigurasi susunan pipa penukar kalor

4. Hasil dan Pembahasan

Jenis cooler yang digunakan untuk menjaga temperatur udara pada generator yakni radiator plat. Pada sistem pendinginan ini, air sebagai media pendingin mengalir dalam pipa-pipa sedangkan udara panas yang di dinginkan bergerak melewati pipa-pipa pendingin yang dipasangkan sirip-sirip untuk mempercepat proses perpindahan kalor.

Analisis perhitungan merupakan tahapan pergerakan udara satu kali melewati cooler dan dalam air cooler, udara yang didinginkan berkali-kali bergerak melewati cooler sehingga penurunan temperatur terjadi secara bertahap. Hal ini terlihat pada tabel 4a dan 4b:

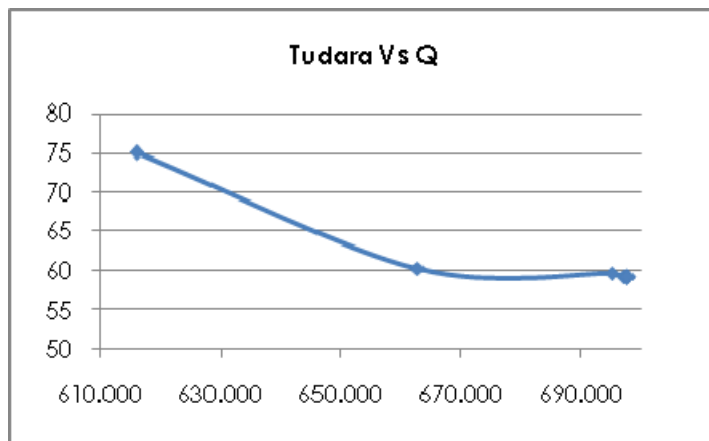
Saat pertama melewati air cooler perpindahan kalor yang terjadi sebesar 615.982 KW. Peningkatan laju perpindahan kalor pada cooler terjadi secara bertahap seiring dengan meningkatnya kapasitas kalor yang terjadi pada cooler. Berdasarkan hasil perhitungan terlihat bahwa temperatur udara terus menurun setelah melewati cooler.

Tabel 4a. Hasil perhitungan efektivitas penukar kalor

T_{udara} °C	m_{air} Kg/s	m_{udara} Kg/s	C_h KW/°C	C_0 KW/°C	C	Q_{maks} Kw
75	1145.747	41.182	41.507	4786.702	115.323	1743.296
60.2	1145.747	42.505	42.857	4786.702	111.691	1799.984
59.6	1145.747	43.446	43.787	4786.702	109.317	1839.062
59.2	1145.747	43.505	43.845	4786.702	109.173	1841.490
59.1	1145.747	43.519	43.860	4786.702	109.137	1842.104
59.09	1145.747	43.521	43.861	4786.702	109.133	1842.165
59.08	1145.747	43.522	43.863	4786.702	109.130	1842.226

Tabel 4b. Hasil perhitungan efektivitas penukar kalor

T_{udara} °C	A_s m ²	NTU	ϵ	Q Kw	$T_{h_{out}}$ °C	$T_{c_{out}}$ °C	LMTD
75	10.202	0.007	0.353	615.982	60.160	33.341	81.910
60.2	10.202	0.007	0.368	662.946	59.531	33.936	80.911
59.6	10.202	0.007	0.378	695.270	59.122	34.360	79.958
59.2	10.202	0.007	0.379	697.276	59.097	34.387	79.892
59.1	10.202	0.007	0.379	697.784	59.091	34.394	79.875
59.09	10.202	0.007	0.379	697.834	59.090	34.394	79.874
59.08	10.202	0.007	0.379	697.885	59.089	34.395	79.872



Gambar 8. Hubungan Temperatur udara masuk dan perpindahan panas

Temperatur udara saat pertama melewati cooler yaitu 75°C dan terus menurun seiring dengan pergerakan generator yang mendorong udara melewati cooler. Sedangkan temperatur air pendingin terus meningkat dari temperatur awal sebesar 28°C menjadi 34 °C. Laju perpindahan kalor maksimal yang terjadi pada cooler sebesar 1743.29 Kw.

Sedangkan dari sisi efektivitas alat penukar kalor, terlihat mengalami peningkatan seiring dengan penurunan temperatur udara yang disirkulasikan di dalam generator yaitu sebesar 37% (temperatur udara di dalam generator akan terus menurun hingga mencapai temperatur ≤ 40 °C).

5. Kesimpulan

Dari hasil perhitungan dan pembahasan dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

- Laju aliran massa udara yang mengalir melewati cooler sekitar 1145.747 kg/s.
- Besarnya perpindahan kalor yang terjadi pada generator cooler pada tahap pertama sebesar 615.982KW dan mengalami peningkatan pada tahap berikutnya sampai 697.885 kW.
- Penurunan temperatur dari 78 °C sampai 59 °C membutuhkan sekitar 7 kali pusingan udara.
- Efektivitas generator cooler berdasarkan perhitungan metode NTU adalah sebesar 37 %.

6. Daftar Pustaka

- Apriadi, 2006, "Evaluasi Kinerja Sistem Pendingin Udara Pada Generator di PLTA Cirata (Studi Kasus Pada cirata II – Unit 7)". *D3-Final_Project. Polban.*
- Cengel, Yunus A., 2002, "Heat Transfer : A Practical Approach". *Second Edition. Mc Graw Hill.*
- Holman, J. P., 1986, "heat transfer", sixth Edition, McGraw-Hil Ltd.
- Inopera, DeWitt, Bergman, Lavine, 2006, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer". Sixth Edition. John Wiley and Sons.
- Kakac, S. Hongtan Liu., 2002, "Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design". Second edition. CRC Press.
- Kuntysh.V.B., A.B.Sykhotskii, A.E.Piir., 2011, "Heat Transfer and Resistance of Staggered Banks of Air-Cooled Heat Exchanger Formed From Tubes With Rolled Aluminium Fins Of Various Height". *Chemical and Petroleum Engineering, Vol. 46, Nos. 11–12, March, 2011*
- Kuntysh.V.B, A.É.Piir, A.I.Anikin, 2005, "Heat Exchange And Aerodynamic Drag In Cross-flow Staggered Banks of Aluminium-Finned Tubes". *Chemical and Petroleum Engineering, Vol. 41, Nos. 3–4.*
- Ramesh K. Shah and Dušan P. Sekulic, 2003, "Fundamentals of Heat Exchanger Design". John Wiley & Sons, Inc.
- Rizki Achmad Riva'I, 2006, "Analisa efektifitas Sistem Pendingin Generator Yang Menggunakan Fluida Kerja hidrogen (Studi Kasus di PT. PJB UP. Muara Karang)". *D3-final Project. Polban.*