

Re-Design dan Modifikasi Generator Cooler Heat Exchanger Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) untuk Meningkatkan Performasi

Ria Mahmudah dan Djatmiko Ichسانی

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arif Rahman Hakim, Surabaya 60111

e-mail: djatmiko@me.its.ac.id

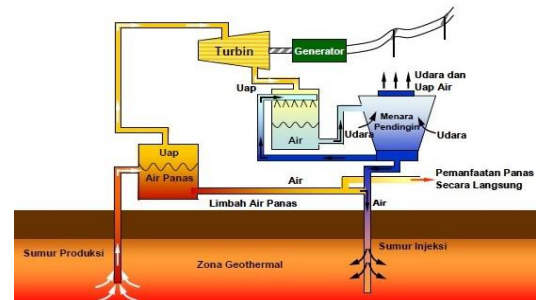
Abstrak—Cooler Generator adalah alat yang berfungsi untuk menjaga temperature udara yang ada di dalam generator akibat kenaikan beban pada generator. Dan apabila kerja dari generator cooler tidak maksimal dalam menjaga temperatur di dalam generator maka akan terjadi *overheating* dan kerusakan pada generator, yang akan menyebabkan generator akan *shutdown*. Hal tersebut akan mengganggu proses produksi pada pembangkit listrik. Hal ini sering terjadi pada pembangkit listrik, salah satunya adalah PLTP dimana desain generator cooler sudah tidak dapat lagi menjaga temperatur didalam generator karena kenaikan beban. Sehingga perlu dilakukan desain ulang generator cooler untuk mendapatkan hasil yang maksimal yang dapat menjaga temperatur didalam generator agar generator tidak cepat mengalami *overheating* dan kerusakan. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan analisa perhitungan termodinamika dan perpindahan panas. Dilakukan *trial error* konfigurasi geometri heat exchanger berupa diameter tube dan P/D_o yang didapat dari standart TEMA untuk mendapatkan UA yang maksimal dan mendapatkan nilai *effectiveness* tinggi. Dimana dalam *re-desain* ini menggunakan volume heat exchanger yang tetap dan jumlah dan jenis fin yang digunakan juga tetap. Dari analisa perhitungan, bahwa semakin besar nilai P/D_o maka nilai *effectiveness*, NTU dan *Pressure drop* akan semakin kecil, begitu juga sebaliknya. Dari analisa didapatkan konfigurasi geometri generator cooler yang menghasilkan performa yang maksimal yaitu P/D_o = 1,42 dengan D_o = 19,05 mm ; D_i = 16,3 mm ; S_T = 28,6 mm ; S_L = 24,7 mm ; N_t = 420. Dari perhitungan didapatkan bahwa geometri desain baru memiliki *effektiveness* 0,91 dan menghasilkan T_{h,o} = 40,8 °C pada beban T_{h,i} = 74,11 °C.

Kata Kunci—Compact Heat Exchanger, Generaor Cooler, Fin dan Tube.

I. PENDAHULUAN

SEMAKIN berkembangnya perekonomian di Indonesia maka kebutuhan akan energi juga semakin besar, terutama energi listrik. Sehingga Indonesia memiliki banyak pembangkit listrik salah satunya adalah pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP).

PLTP adalah pembangkit listrik yang memanfaatkan panas bumi untuk memanaskan air sehingga menjadi uap panas yang bertekanan tinggi untuk menggerakkan turbin. Putaran turbin ini yang selanjutnya digunakan untuk memutar generator yang merupakan salah satu alat vital di instalasi pembangkit listrik. Generator adalah salah satu alat vital dalam pembangkit listrik, dimana fungsi dari generator adalah untuk merubah energi mekanik dari turbin menjadi energi listrik. Di dalam fungsinya sebagai penghasil listrik putaran generator pada rotornya juga menghasilkan energi panas.



Gambar 1 Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi[1]



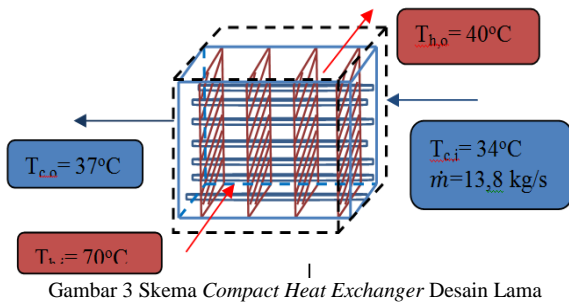
Gambar 2 Generator Cooler di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi.

Panas pada rotor dan stator dapat timbul pada dua kondisi operasi yaitu pada beban rendah dan beban tinggi. Sehingga perlu adanya sebuah alat yang disebut generator cooler atau compact heat exchanger yang terdiri dari fin dan tube, dimana fungsinya adalah untuk menstabilkan temperatur udara yang ada didalam generator. Ketika beban dari generator naik atau turun maka panas bangkitan yang akan terjadi dapat lebih besar dari kondisi awal, sehingga generator cooler yang ada di PLTP, sudah tidak mampu untuk mendinginkan generator dikarenakan beban pendinginannya sudah naik.

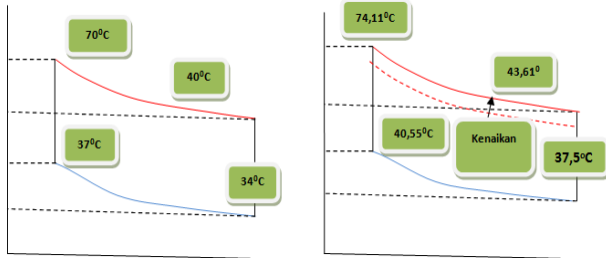
Maka perlu dilakukan desain ulang untuk cooler generator agar menghasilkan performa yang maksimal.

Penelitian terkait dilakukan oleh Nanang Tri Wahyuna yaitu simulasi compact heat exchanger dengan menggunakan CFD, yang berjudul *Simulasi Perpindahan Panas untuk Meningkatkan Performa Generator Cooler di PLTP Kamojang* yaitu tentang visualisasi profil aliran dan kontur secara keseluruhan berupa profil kecepatan dan kontur temperatur pada kondisi existing dan modifikasi dari compact heat exchanger. Dan untuk Mengetahui pengaruh variasi dari perbedaan tube terhadap nilai temperatur keluaran tube[2].

Selain itu penelitian juga dilakukan oleh Buyruk. Buyruk melakukan penelitian tentang pengaruh perubahan jarak



Gambar 3 Skema Compact Heat Exchanger Desain Lama



Gambar 4 Distribusi Temperatur Kondisi (a) Desain dan (b) Existing

transversal dan jarak longitudinal antar tube pada aliran melintasi susunan tube banks. Hasil yang diperoleh dari penelitian tersebut adalah bahwa distribusi local nusselt number untuk barisan tube pertama sangat mirip dengan distribusi yang dihasilkan pada konfigurasi single row untuk konfigurasi angka Reynold yang sama. Buyruk menemukan adanya 2 angka nusselt number minimum untuk kasus single tube dan single tube row pada teta (θ) = 100° dan 140°[3].

Pada perencanaan tugas akhir ini akan dilakukan desain ulang compact heat exchanger dengan analisa perhitungan thermodinamika dan perpindahan panas untuk mendapatkan heat exchanger dengan performa yang maksimal. Untuk perhitungan dalam perencanaan compact heat exchanger desain baru adalah dengan menggunakan persamaan thermal resistance untuk mendapatkan nilai UA dari konfigurasi compact heat exchanger desain baru[4].

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_c A_c} = \frac{1}{U_h A_h}$$

$$= \frac{1}{(\eta_o h A)_c} + \frac{R''_{f,c}}{(\eta_o A)_c} + R_w + \frac{R''_{f,h}}{(\eta_o A)_h} + \frac{1}{(\eta_o h A)_h} \quad (1)$$

Dimana:

UA = Overall Heat Transfer

η_o = efisiensi fin total

h = koefisien konveksi (watt/m².K)

A = luasan perpindahan panas (m²)

R''_{f,h} = foaling factor

Untuk mengetahui kemampuan dari compact heat exchanger maka dilakukan perhitungan dengan metode NTU (Number of Transfer Units),[4]

$$NTU \equiv \frac{UA}{C_{min}} \quad (2)$$

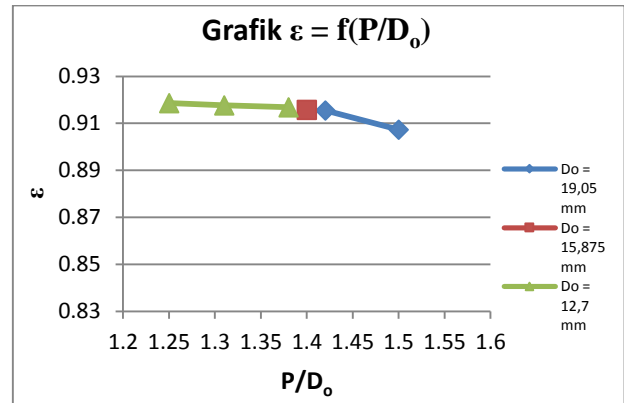
$$\varepsilon = f\left(NTU, \frac{C_{min}}{C_{max}}\right) \quad (3)$$

$$C_c = \dot{m}_c c_{p,c}$$

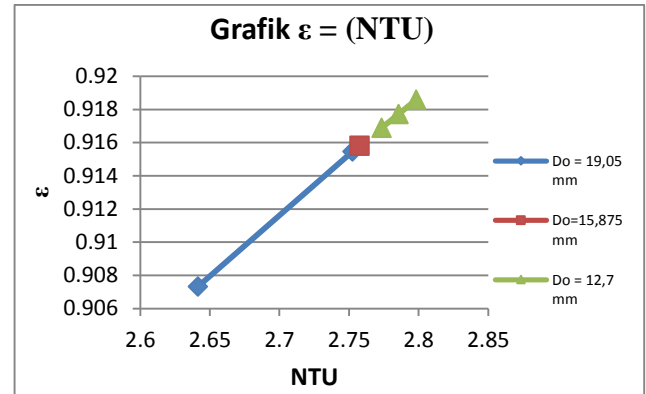
dan

$$C_h = \dot{m}_h c_{p,h} \quad (4)$$

Secara umum, tujuan dilakukannya penelitian ini adalah mengetahui pengaruh diameter dan P/D_o terhadap performa dari compact heat exchanger yaitu temperatur keluaran yang



Gambar 5 Grafik ε = f(P/D_o)



Gambar 6 Grafik ε = f(NTU)

dihasilkan oleh compact heat exchanger, dan mendapatkan konfigurasi yang maksimal untuk desain ulang compact heat exchanger.

II. METODE PENELITIAN

A. Analisa Desain Lama Generator Cooler

Untuk melakukan desain ulang pada compact heat exchanger maka dilakukan analisa perhitungan performa dari compact heat exchanger desain lama, dimana dengan data temperatur dan dimensi dari heat exchanger desain lama.

Untuk menganalisa performansi dari generator cooler heat exchanger pada kondisi awal (desain awal) dilakukan dengan menggunakan metode NTU.

Heat Capacity Rates:

$$C_c = \dot{m}_{air} \times C_{p,air} = 57.656,4 \text{ J/s.K}$$

$$C_h = \dot{m}_{udara} \times C_{p,udara} = 5.765,64 \text{ J/s.K}$$

Dari perhitungan didapatkan bahawa C_h < C_c ,

sehingga C_{min} = C_h

$$q_{max} = C_{min} \times (T_{h,i} - T_{c,i}) = 207.663,04 \text{ Watt}$$

$$q_{act} = C_h \times (T_{h,i} - T_{h,o}) = 172.969,2 \text{ Watt}$$

Effectiveness dari generator cooler pada desain awal:

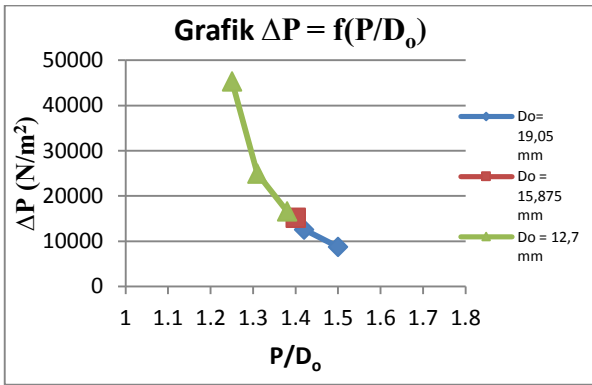
$$\varepsilon = \frac{q_{act}}{q_{max}}$$

Sehingga didapatkan bahwa effectiveness pada desain awal adalah 0,833. Dimana ,

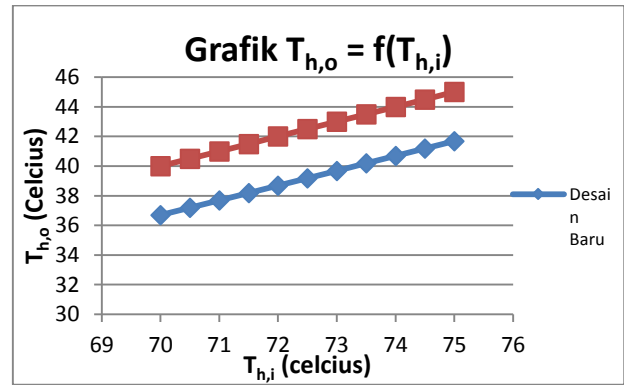
$$C_{min}/C_{max} = C_r = 0,1$$

ε = f(NTU, C_{min}/C_{max}) sehingga didapatkan dari figure Text Book Fundamental of Heat and Mass Transfer, 6th edition[4], NTU ≈ 2

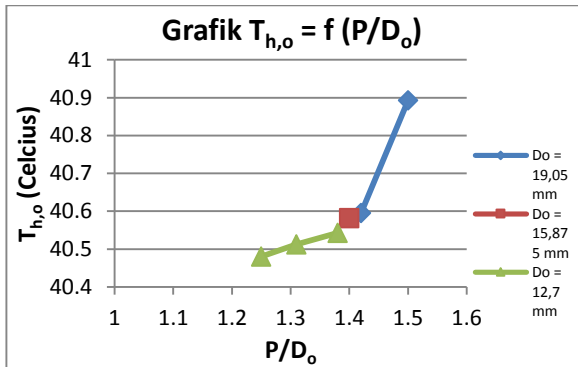
Pada kondisi operasi dengan nilai effectiveness dan q_{act} yang sama yaitu 0,833 dan 172.969,2 Watt, akan tetapi beban pendinginan naik sehingga compact heat exchanger sudah tidak mampu lagi untuk mendinginkan generator.



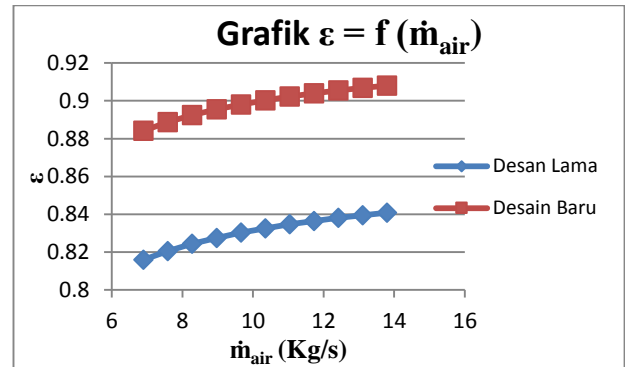
Gambar 7 Grafik $\Delta P = f(P/D_o)$



Gambar 9 Grafik $T_{h,o} = f(T_{h,i})$



Gambar 8 Grafik $T_{h,o} = f(P/D_o)$



Gambar 10 Grafik $\epsilon = f(\dot{m}_{air})$

Dari Gambar 4 distribusi temperatur terlihat bahwa temperatur naik dari kondisi desain terhadap kondisi *existing* akibat kenaikan beban pendinginan, sehingga perlu dilakukan desain ulang generator cooler atau compact heat exchanger.

B. Perencanaan Generator Cooler Desain Baru

Perencanaan generator cooler dengan melakukan *trial and error* diameter tube, dan P/D_o pada spesifikasi susunan tube yang ada pada standard TEMA untuk mendapatkan nilai UA yang maksimal, dengan batasan volume heat exchanger tetap sama dengan desain awal dan *pressure drop* dipertahankan tetap rendah. Hasil yang akan diperoleh dari perencanaan *generator cooler* ini adalah jumlah tube dan diameter tube untuk performa generator tube maksimum. Berikut adalah langkah-langkah dalam perencanaan generator cooler :

- 1) Mendapatkan propertis dari masing-masing fluida dengan variabel yang sudah diketahui.
- 2) Mencari nilai C_{hot} , C_{cold} dan menentukan C_{min} dan C_{max} .
- 3) Menghitung dan menganalisa konfigurasi yang digunakan untuk desain generator cooler desain baru.
- 4) Menetapkan dan menganalisa konfigurasi yang maksimal untuk desain baru sesuai dengan batasan yang ada.
- 5) Menghitung temperatur yang dihasilkan generator cooler dengan konfigurasi geometri yang baru.
- 6) Menganalisa performa dari konfigurasi generator cooler yang baru.
- 7) Membandingkan hasil re-desain dengan kondisi awal generator cooler.

Dari perencanaan tersebut ada beberapa variabel tetap dalam perencanaan yaitu volume heat exchanger, laju aliran massa kedua fluida, temperatur air masuk $T_{c,i}$ dan temperatur udara masuk $T_{h,i}$.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisa Re-Design Generator Cooler.

Dalam perencanaan spesifikasi yang digunakan didapat dari TEMA.

Semua konfigurasi tersebut dilakukan perhitungan dan analisa termodinamika dan perpindahan panas. Dari perhitungan didapatkan grafik sebagai berikut:

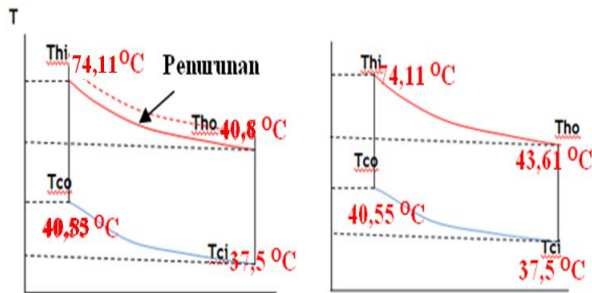
Dari Gambar 5 yaitu grafik effectiveness fungsi P/D_o , terlihat bahwa trendline grafik cenderung menurun, dimana dari grafik tersebut dapat dilihat bawa semakin besar P/D_o maka effectiveness yang dihasilkan akan semakin kecil.

Gambar 6 adalah grafik *effectiveness* fungsi NTU (*Number of Transfer Units* dimana grafik tersebut memiliki trendline yang linier keatas dalam satu garis. Dari grafik tersebut terlihat bahwa semakin besar NTU maka nilai effectiveness nya juga akan semakin besar. Hal tersebut sesuai dengan persamaan $\epsilon = f(NTU, Cr)$ dimana semakin besar NTU dengan nilai Cr yang sama maka nilai ϵ akan semakin besar juga.

Pada Gambar 7 adalah grafik *pressure drop* fungsi P/D_o , dari grafik tersebut terlihat *trendline* grafik yang cenderung menurun, dimana semakin besar P/D_o maka nilai *pressure drop* yang dihasilkan akan semakin kecil. Hal tersebut sesuai dengan persamaan yaitu:

$$\Delta P = \frac{G^2 v_i}{2} \left[(1 + \sigma^2) \left(\frac{v_o}{v_i} - 1 \right) + f \frac{A}{A_{ff} v_i} \right] , \text{ yaitu dimana}$$

dalam persamaan tersebut terdapat *free flow area* (A_{ff}) , semakin besar P/D_o maka *free flow area* yang terjadi akan semakin besar juga, sehingga dengan properties yang konstan yaitu volume spesifik pada kondisi inlet dan outlet (v_i dan v_o), maka nilai *pressure drop* yang terjadi akan semakin kecil.



Gambar 11 Distribusi Temperatur Pada Kondisi (A) Desain Baru dan (B) Desain Lama.

Tabel 1. Dimensi Compact Heat Exchanger Desain Lama

Dimensi Operasi		
D _{out} Tube	20,5	mm
D _{in} Tube	17,70	mm
S _T	48	mm
S _L	40	mm
N _T	17	-
N _L	9	-
Tebal Fin	0,25	mm
Pitch Fin	3	mm
Jumlah Tube	153	-
Panjang HE	1850	mm
Tinggi HE	880	mm
Lebar HE	360	mm

Grafik diatas adalah menunjukkan nilai T_{h,o} yang dihasilkan pada masing-masing konfigurasi apabila pembebanan T_{h,i} = 74,11°C dan T_{c,i} = 37,5 °C. Dari Gambar 8 terlihat grafik bahwa semakin besar P/D_o maka T_{h,o} juga akan semakin besar, dan semakin kecil P/D_o maka T_{h,o} juga semakin besar.

Dari grafik pada Gambar 5 sampai Gambar 8 maka dapat ditentukan konfigurasi yang memiliki hasil yang maksimal yaitu pada konfigurasi P/D_o = 1,5 dengan diameter D_o = 19,05 mm, hal tersebut dikarenakan pada setiap konfigurasi nilai *effectiveness* yang dihasilkan tidak memiliki selisih yang terlalu besar, dimana dapat dilihat dari besar temperatur udara panas yang keluar dari masing-masing konfigurasi compact heat exchanger (Gambar 8) yang terlihat selisihnya juga tidak terlalu besar. Akan tetapi nilai *pressure drop* yang dihasilkan memiliki selisih yang sangat besar (Gambar 7) sehingga dipilih konfigurasi P/D_o = 1,5 dimana nilai *pressure drop* paling rendah.

B. Analisa Performa Generator Cooler Desain Baru

Performa dari *heat exchanger* dapat ditinjau dari nilai *efektiveness* (ε). *Effectiveness* merupakan perbandingan laju perpindahan panas aktual terhadap kemampuan laju perpindahan panas maksimum *heat exchanger*. Untuk semua *heat exchanger* nilai *effectiveness* merupakan fungsi dari NTU dan Cr.

Analisa Temperatur T_{h,o} Terhadap Variasi Pembebanan T_{h,i}

Dilakukan perbandingan performa dengan analisa temperatur T_{h,i} dan T_{h,o} terhadap kenaikan beban pada generator cooler desain lama dan desain baru yang ditunjukkan pada Gambar 9 dimana dalam analisa ini menggunakan variabel tetap yaitu temperatur air masuk dan laju aliran massa air dan udara.

Tabel 2. Properties Fluida Compact Heat Exchanger [4]

Properties	Fluida		Satuan
	Air	Udara	
ρ	994	1,068	kg/m ³
C _p	4178	1.008	J/kg.K
Pr	4,852	0,763	-
K	0,625	0,0295	W/m.K
μ	724,6 x 10 ⁻⁶	1,853 x 10 ⁻⁵	Kg/m.s

Tabel 3. Spesifikasi Konfigurasi Desain Baru Generator Cooler[5]

Diameter Out (in)	Diameter Out (mm)	Tube Pitch (in)	Tube Pitch (mm)	P/do
3/4	19,05	1 1/16	26,98	1,42
5/8	15,875	7/8	22,2	1,40
1/2	12,7	5/8	15,875	1,25
		21/32	16,67	1,31
		11/16	17,46	1,38

Dari trendline grafik Gambar 9 menunjukkan bahwa saat temperatur udara masuk generator cooler heat exchanger (T_{h,i}) naik akibat kenaikan beban panas yang harus didinginkan oleh generator maka T_{h,o} juga akan naik. Dari grafik tersebut dilakukan variasi pembebanan T_{h,i} 70° C – 75°C.

Trendline grafik pada Gambar 9 adalah linier keatas yang menunjukkan semakin bertambahnya T_{h,i} akibat kenaikan beban maka T_{h,o} yang dihasilkan juga akan semakin besar. Hal tersebut sesuai dengan persamaan yaitu $q_{act} = C_h(T_{h,i} - T_{h,o})$, dengan nilai C_h dan q_{act} yang tetap maka semakin besar T_{h,i} maka T_{h,o} juga akan semakin besar.

Analisa Effectiveness Terhadap Penurunan ṁ_{air}

Dari Gambar 10 terlihat *trendline* grafik *effectiveness* terhadap penurunan laju aliran massa pada air pendingin. Dalam analisa ini menggunakan variabel tetap yaitu laju aliran massa udara dan temperatur air masuk heat exchanger. Penurunan laju aliran massa air pendingin yang digunakan yaitu 5 % sampai 50 % dari laju aliran massa awal.

Trendline yang terlihat pada grafik di atas adalah semakin menurunnya *effectiveness* seiring dengan menurunnya laju aliran massa air pendingin. Hal ini sesuai dengan perumusan yaitu $C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}}$ dimana C_{min} = ṁ_{udara} x Cp_{udara} dan C_{max} = ṁ_{air} x Cp_{air}. Sehingga semakin kecil ṁ_{air} maka C_{max} akan semakin kecil yang akan menyebabkan semakin besarnya nilai Cr. Dan apabila nilai Cr semakin besar maka nilai *Effectiveness* (ε) akan semakin menurun sesuai dengan rumus berikut:

$$\epsilon = 1 - \exp\left[\left(\frac{1}{Cr}\right) (NTU)^{0,22}\{\exp[-Cr(NTU)^{0,783}] - 1\}\right]$$

, dimana nilai NTU tetap. Pada kurva warna merah adalah kurva *effectiveness* terhadap penurunan laju aliran massa air pada desain baru, sedangkan pada kurva warna biru adalah desain lama. Dapat dilihat bahwa generator cooler desain baru mempunyai harga *effectiveness* sebesar 0,88 (lebih besar dari *effectiveness* generator cooler desain lama pada kondisi normal yaitu 0,833) meskipun laju aliran massa pada air pendingin berkurang 50%. Sedangkan pada desain lama generator cooler memiliki nilai *effectiveness* sebesar 0,81 saat laju

aliran massa air berkurang 50%. Sehingga performa generator cooler desain baru lebih baik dari generator cooler desain lama.

Dari analisa yang telah dilakukan maka dapat dilakukan perbandingan dari performa generator pada kondisi existing dan desain baru dengan distribusi temperatur, yang ditunjukkan pada Gambar 11.

Dari Gambar 11 terlihat bahwa desain baru menghasilkan temperatur keluaran yang lebih rendah dari desain lama pada kondisi existing yaitu dimana pembebanan $T_{h,i} = 74,11^{\circ}\text{C}$.

IV. KESIMPULAN

Setelah dilakukan analisa dan perhitungan performa *generator cooler heat exchanger* pada desain baru, maka dapat diberikan beberapa kesimpulan pada perencanaan ini. Kesimpulan yang dapat disampaikan adalah sebagai berikut:

- 1) Semakin besar P/D_o dari sebuah konfigurasi heat exchanger maka nilai *effectiveness*, NTU dan *pressure drop* nya akan semakin kecil. Begitu juga sebaliknya, semakin kecil nilai P/D_o dari sebuah konfigurasi heat exchanger, maka nilai *effectiveness*, NTU dan *pressure drop* nya akan semakin besar.
- 2) Geometri desain baru generator cooler heat exchanger yang digunakan adalah diameter luar tube 19,05 mm ; diameter dalam tube 16,3 mm ; $S_T = 28,6$ mm ; $S_L = 24,7$ mm ; $N_T = 30$; $N_L = 14$; $N_{\text{tube}} = 420$.
- 3) Performa Generator cooler desain baru lebih baik dari desain lama, yang terlihat pada kenaikan temperatur $T_{h,i}$ karena peningkatan beban pendinginan, pada desain baru q_{act} yang dimiliki lebih besar dari desain lama sehingga menyebabkan $T_{h,o}$ yang dihasilkan lebih kecil. dan penurunan *effectiveness* terhadap penurunan laju aliran massa air pendingin sebesar 50 % pada desain lama mengalami penurunan nilai *effectiveness* yaitu 0,8 sedangkan pada desain baru 0,88.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis Ria Mahmudah mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung hingga penulisan jurnal ilmiah ini. Ucapan terima kasih kepada Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichسانی, M.Eng selaku dosen pembimbing tugas akhir penulis. Ucapan terima kasih pada kedua orang tua penulis dan segenap kolega yang senantiasa mendukung penulis. Ucapan terima kasih dan hormat kepada semua dosen, karyawan dan mahasiswa Teknik Mesin ITS yang telah mengajarkan tentang hidup dan kemahasiswaan yang bermakna selama penulis berkuliah di ITS.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wrigley.B., 2009, *Heat Exchanger*, < www. real-world-physics-problems.com >
- [2] Tri Wahyuna, Nanang., 2013. *Simulasi Perpindahan Panas Untuk Meningkatkan Performa Generator Cooler di PLTP Kamojang*, Tugas Akhir, Teknik Mesin ITS : Surabaya.
- [3] Buyruk, E., *Heat Transfer and Flow Structure Around Cylinder in Cross Flow*. Engineering and Environment Science, Tubitak, Turkey, 1999
- [4] Incropera., F.P and DeWitt, D.P., *Fundamental of Heat and Mass Transfer*, 6th edition. John Wiley and Sons, New York, 2007.
- [5] Byrne, George P., Treasurer, Jr Secretary., *Standards of Turbular Exchanger Manufacturers Association*, Fifth Edition, 331 Madison Avenue, New York, N.Y. 10017, 1968.