



ANALISIS UNJUK KERJA ALAT PENUKAR KALOR REAKTOR SERBA GUNA G. A. SIWABESSY PADA OPERASI DAYA 30 MW

Nailul Atifah¹, Abdul Aziz Rohman Hakim², Budi Ebo Wicaksono³,
Dimas Mahesa Anggoro Sutarjo⁴

^{1,3,4}Teknik Mesin Universitas Pamulang, ²Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran BRIN

E-mail : ¹dosen00410@unpam.ac.id, ²abdu054@brin.go.id, ³wicaksono20bdi@gmail.com,
⁴dimasmahesaanggorosutarjo@gmail.com

Masuk : 16 Februari 2023

Direvisi : 8 Maret 2023

Disetujui : 15 Maret 2023

Abstrak: Sistem pendinginan suatu reaktor riset merupakan hal yang sangat penting dan sangat berpengaruh pada kinerja reaktor. Sistem pendingin memegang peranan utama dalam memindahkan panas yang dihasilkan dari reaksi fisi di teras reaktor. Setelah dioperasikan selama lebih dari tiga puluh tahun, kemampuan alat penukar kalor dalam memindahkan panas dari sistem pendingin primer ke sistem pendingin sekunder harus tetap tersedia bagi operasi reaktor. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui unjuk kerja alat penukar kalor dalam kesesuaiannya dengan desain awal. Pada penelitian ini dilakukan analisis perpindahan panas pada alat penukar kalor dengan menggunakan metode *effectiveness-Number of Transfer Unit* (e-NTU) dan metode *Log Mean Temperature Difference* (LMTD). Data yang digunakan merupakan hasil pengukuran pada saat reaktor beroperasi pada daya 30 MW. Hasil analisis dengan Metode LMTD, panas yang bisa diterima oleh HE sebesar 13,57 MW. Nilai ini lebih rendah 9,5 % dari 15 MW. Sedangkan dengan Metode e-NTU, panas yang bisa diterima HE sebesar 14,41 MW. Nilai ini lebih rendah 3,9 % dari 15 MW. Dengan Metode LMTD diperoleh nilai *effectiveness* sebesar 54 %, sedangkan dengan Metode e-NTU diperoleh nilai *effectiveness* sebesar 57 %. Dapat disimpulkan bahwa HE Reaktor RSG-GAS masih memiliki unjuk kerja sesuai kebutuhan operasi reaktor dan masih sesuai dengan desain awal.

Kata kunci: alat penukar kalor, unjuk kerja, LMTD, e-NTU

Abstract: The cooling system of a research reactor is very important and very influential on the performance of the reactor. The cooling system plays a major role in transferring the heat generated from the fission reaction in the reactor core. After being in operation for more than thirty years, the ability of the heat exchanger to transfer heat from the primary cooling system to the secondary cooling system must still be available for reactor operation. This study aims to determine the performance of heat exchangers in accordance with the initial design. In this research, heat transfer analysis was carried out in heat exchangers using the *effectiveness-Number of Transfer Unit* (e-NTU) method and the *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) method. The data used is the result of measurements when the reactor is operating at a power of 30 MW. The results of the analysis with the LMTD method, the heat that can be received by HE is 13.57 MW. This value is 9.5 % lower than 15 MW. Whereas with the e-NTU method, the heat that can be received by HE is 14.41 MW. This value is 3.9 % lower than 15 MW. With the LMTD method, a *effectiveness* value of 54% was obtained, while the e-NTU method obtained a *effectiveness* value of 57%. It can be concluded that the HE of the RSG-GAS Reactor still has performance according to the operational requirements of the reactor and is still in accordance with the initial design.

Keywords: heat exchanger, performance, LMTD, e-NTU

PENDAHULUAN

Reaktor Serba Guna G.A Siwabessy (RSG-GAS) merupakan reaktor non-daya yang digunakan untuk penelitian, melayani kegiatan iradiasi, serta pendidikan dan pelatihan. Reaktor RSG-GAS dibangun dengan konsep reaktor kolam terbuka. Reaktor RSG-GAS menggunakan air sebagai pendingin dan sekaligus sebagai moderator. Teras reaktor tersusun atas bahan bakar, batang kendali, berilium elemen dan berilium blok. Berilium digunakan sebagai reflektor neutron[1].

Sistem pendingin RSG-GAS meliputi sistem pendingin primer, sistem pendingin sekunder dan sistem pendingin kolam. Sistem pendingin primer mengambil panas dari hasil reaksi fisi di dalam teras reaktor dan dipindahkan melalui alat penukar panas ke sistem pendingin sekunder. Panas yang diambil oleh sistem pendingin sekunder di buang ke lingkungan melalui menara pendingin (*Cooling Tower*). Sistem pendingin kolam mempunyai fungsi untuk mendinginkan teras reaktor pada saat sistem pendingin primer tidak beroperasi. Sistem pendingin primer terdiri atas tiga pompa primer dan dua alat penukar panas (HE). Ketiga pompa primer dan HE tersusun dalam dua jalur pengoperasian. Hal ini berarti bahwa meskipun tersedia tiga pompa primer, dalam pengoperasian reaktor hanya menggunakan dua pompa primer. Sedangkan sistem pendingin sekunder terdiri dari tiga pompa sekunder dan tujuh menara pendingin. Identik dengan sistem pendingin primer, ketiga pompa sekunder dan tujuh menara pendingin tersusun dalam dua jalur pengoperasian[1].

Heat exchanger adalah sebuah perangkat untuk memindahkan panas dari satu fluida ke fluida lain tanpa kontak langsung dan tanpa terjadi perpindahan massa. HE dapat berfungsi sebagai pemanas maupun pendingin[2]. Berdasarkan arah aliran fluidanya, HE dikelompokkan menjadi tipe paralel, tipe searah dan tipe berlawanan arah[3]. Perpindahan panas terjadi karena adanya perbedaan temperatur antara dua bahan. Mekanisme perpindahan panas dapat terjadi melalui tiga cara yaitu konduksi, konveksi dan radiasi[4]. HE jenis shell dan tube memiliki beberapa kelebihan, antara lain: variasi material yang digunakan, tegangan termal dapat diredam, pressure drop dapat divariasikan sesuai kapasitas dan dapat mengakomodasi perpindahan panas kondensasi dan pendidihan[5]. Heat exchanger jenis shell dan tube digunakan secara luas di dunia industri, terutama industri yang melibatkan proses kimia seperti pabrik pupuk[6]. Tipe ini banyak digunakan untuk sistem pendingin pada berbagai reaktor riset di dunia, karena sifat aliran pendingin yang harus terpisah antara pendingin primer yang bersentuhan langsung dengan bahan bakar nuklir dan sistem pendingin sekunder yang harus tidak terkontaminasi[7].

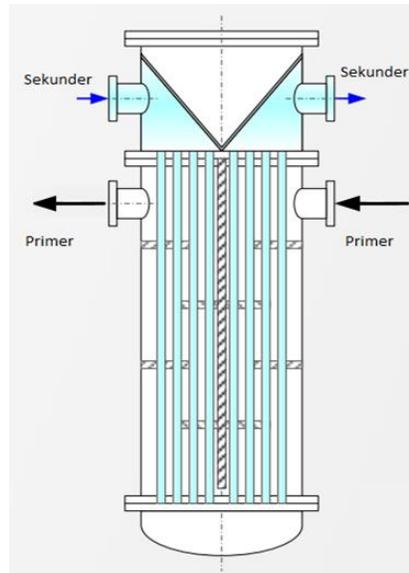
Sistem pendinginan merupakan salah satu dari bagian utama reaktor riset. Sistem pendingin memegang peranan utama dalam memindahkan panas yang dihasilkan dari reaksi fisi di teras reaktor[8]. Salah satu komponen utama sistem pendingin adalah heat exchanger. Penggunaan HE dalam waktu yang lama dapat menimbulkan akumulasi pengotor pada bagian tube HE. Akumulasi tersebut membentuk lapisan yang dapat menyebabkan kenaikan hambatan termal dan menyebabkan penurunan laju perpindahan panas dalam HE[9]. Sistem pendingin RSG-GAS pada sisi sekundernya (sisi tube) telah dilengkapi dengan sistem pembersih tube. Sistem tersebut memasukkan bola-bola sponge yang elastis ke dalam aliran sekunder. Bola-bola tersebut akan melewati tube sehingga kotoran yang menempel dipermukaan tube akan terbawa oleh bola-bola sponge tersebut. Meskipun demikian, masih ada kemungkinan beberapa tube tidak dilalui oleh bola-bola tersebut sehingga dapat dialpisi oleh kerak-kerak. Untuk mengatasi hal tersebut maka HE di-overhaul (diinspeksi dan dibersihkan) secara rutin setiap lima tahun[10]. Inspeksi dan pembersihan (overhaul) HE dapat menaikkan kinerja sebesar 16%[11] dan 7,85%[12]. Setelah dioperasikan selama lebih dari tiga puluh tahun, perlu dilakukan analisis unjuk kerja alat penukar kalor dalam memindahkan panas dari sistem pendingin primer ke sistem pendingin sekunder. Hasil analisis unjuk kerja alat penukar kalor dapat memberikan informasi apakah kinerja alat penukar kalor masih sesuai dengan desain awal. Pada penelitian ini dilakukan analisis perpindahan panas pada alat penukar kalor dengan menggunakan metode *effectiveness-Number of Transfer Unit* (e-NTU) dan metode *Log Mean Temperature Difference* (LMTD). Dari hasil analisis dapat diketahui apakah kinerja HE saat ini masih sesuai dengan desain awal saat HE mulai dioperasikan dan memenuhi kebutuhan operasi reaktor.

METODOLOGI

2.1 Alat Penukar Panas (*Heat Exchanger-He*)

Reaktor RSG-GAS menggunakan alat penukar panas yang berfungsi untuk mempertukarkan panas dari sistem pendingin primer ke sistem pendingin sekunder. Gambar HE RSG-GAS ditunjukkan oleh Gambar 1. Sistem pendingin primer menyerap panas dari reaksi fisi di teras reaktor, selanjutnya pendingin tersebut akan mengalir ke dalam HE pada sisi *shell* yang bertemperatur lebih tinggi, dan akan didinginkan oleh pendingin sekunder yang berada pada sisi *tube*. Pendingin sekunder didinginkan oleh udara dalam menara pendingin sehingga terlepas sejumlah massa uap panas ke lingkungan. Sistem pendingin primer bersifat (*close loop*), sedangkan sistem

pendingin sekunder bersifat (*open loop*). Untuk mendukung pengoperasian sitem berjalan aman dan selamat, pemelihara melakukan pemantauan kualitas air pendingin secara rutin. Pemantauan kualitas air pendingin primer dilakukan berkaitan dengan umur pakai reaktor. Kolam reaktor didesain menggunakan logam (AlMg3) yang memiliki potensi bereaksi dengan air pendingin primer, untuk itu air pendingin primer harus bebas mineral dan dikendalikan pH dan konduktivitasnya. Kondisi bebas mineral pendingin primer dijaga oleh resin penukar ion. Pemantauan kualitas air pendingin sekunder dilakukan sebagai upaya mengatasi masalah pertumbuhan lumut, pembentukan kerak dan pembentukan korosi yang dapat mengurangi efisiensi perpindahan panas[1].



Gambar 1. Shell dan Tube Heat Exchanger

Tabel 1. Parameter Desain Alat Penukar Panas Reaktor RSG-GAS[1]

No.	Parameter	Nilai
1	Jumlah unit penukar panas	2 x 50%
2	Tipe	Multi-pass, shell and tube, 2/2
3	Tekanan desain	10 bar
4	Suhu desain	60 °C
5	Tingkat kerapatan seal	10^{-3} mbar.l/det
6	Kapasitas tiap unit penukar panas	16.200 kW
7	Suhu masuk pendingin primer	49 °C
8	Suhu keluar pendingin primer	40 °C
9	Laju alir massa primer tiap unit penukar panas	430 kg/det
10	Suhu masuk pendingin sekunder	32 °C
11	Suhu keluar pendingin sekunder	40 °C
12	Laju alir massa sekunder tiap unit penukar panas	485 kg/det
13	Tekanan operasi masuk primer	1,4 bar
14	Tekanan operasi keluar primer	0,9 bar
15	Tekanan operasi masuk sekunder	0,4 bar
16	Tekanan operasi keluar sekunder	0,5 bar
17	Rugi tekanan pada sisi shel (primer)	0,0 bar
18	Rugi tekanan pada sisi tube (sekunder)	0,4 bar
19	Luas perpindahan panas	780 m ²

20	Jumlah pipa tiap saluran	816
21	Dimensi pipa-pipa	22 mm Ø x 1 mm tebal
22	Panjang pipa	7.410 mm
23	Diameter luar sel	1.300 mm
24	Panjang keseluruhan	±9.000 mm

2.2 Perhitungan Perpindahan Panas pada He

Proses perpindahan panas bergantung kepada medan aliran atau kepada angka Reynolds. Laju relatif antara difusi kalor dan momentum bergantung kepada angka Prandtl. Jadi proses perpindahan panas bergantung pada angka Reynold dan angka Prandtl. Untuk mencari angka Prandtl kita dapat memakai rumus[13] :

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \tag{1}$$

Dimana :

- Pr : Bilangan Prandtl
- Cp : Panas spesifik air pada tube atau shell
- μ : Viskositas air pada tube atau shell
- k : Konduktivitas air pada tube atau shell

Dan angka reynold[13].

$$Re = \frac{De \cdot G}{\mu} \tag{2}$$

Dimana :

- Re : Bilangan Reynold
- De : Diameter egiuvalen shell atau tube
- μ : Viskositas air pada tube atau shell

Sedangkan kecepatan massa didefinisikan sebagai berikut :

$$G = \frac{m}{A} \tag{3}$$

Dimana :

- m : Laju alir pada sisi shell atau tube
- A : Luas area shell atau tube

Panas spesifik, viskositas dan konduktivitas termal dicari dengan melihat tabel pada suhu rata-rata. Rumus suhu rata-rata :

$$T = \frac{(T1 + T2)}{2} \tag{4}$$

Dimana :

- T1 : Suhu pada fluida masuk
- T2 : Suhu pada fluida keluar

Untuk mencari diameter egiuvalen yaitu dengan melihat bentuk *pitch* penukar panas untuk bentuk *triangular pitch*[14].

$$Des = \frac{4 \cdot As}{\pi/2 \cdot Do} = \frac{4 \cdot (Pt/2 \cdot 0,86 Pt - \pi/2 \cdot Do^2/4)}{\pi/2 \cdot Do} \tag{5}$$

Dimana :

- Des : Diameter egiuvalen sisi shell
- As : Luas area sisi shell
- Do : Diameter luar tube
- Pt : Panjang shell di antara tube
- Pi : 3,14

Sedangkan untuk mencari diameter egiuvalen tube dengan menggunakan persamaan[14]:

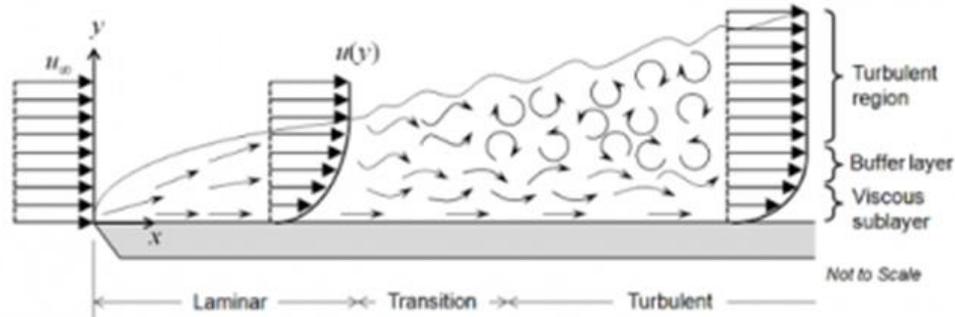
$$Det = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot At \tag{6}$$

Dimana :

Det : Diameter ekuivalen sisi tube

At : Luas area tube

Ketika bilangan Reynold menunjukkan diatas 2100 aliran adalah turbulen dapat dilihat Gambar 2.



Gambar 2 Tipe Aliran Fluida[13]

Puncak rata-rata perpindahan panas ada di daerah turbulen untuk $Re > 10000$ dan $0,7 > Pr > 700$ juga $L/D > 60$ dinyatakan dalam perumusan *Dittus Boelter*[13].

$$Nu = h \cdot D/k = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \tag{7}$$

Dimana :

Nu : Bilangan Nusselt

h : Koefisien film

D : Diameter ekuivalen

Pr : Bilangan Prandtl

Re : Bilangan Reynolds

k : Konduktivitas

Penggunaan persamaan no.7 diasumsikan faktor koreksinya dianggap sama dengan satu.

2.3 Kemampuan Menerima Panas

Penukar panas shell-tube adalah untuk mendinginkan air panas dan memanaskan air dingin. Untuk itu penukar panas tipe *shell-tube* harus mempunyai kemampuan untuk menerima panas dengan baik. Hal itu dipengaruhi oleh.

- 1.) Koefisien pemindah panas global (U_g)
- 2.) Luas perpindahan panas (A)
- 3.) Selisih temperatur rata-rata ($LMTD$)

Hubungan di atas dikatakan dalam persamaan *Fourier*[14]:

$$Q = U_g \cdot A \cdot LMTD \tag{8}$$

Dimana $LMTD$ yang dipakai mengikuti aturan *counterflow* sesuai dengan penukar panas RSG-GAS yaitu aliran berlawanan arah. Semakin besar nilai $LMTD$ maka semakin besar jumlah panas yang dapat dipindahkan[15].

$$LMTD = \frac{(dT1-dT2)/\ln (dT1/dT2)}{\tag{9}$$

Dimana :

$dT1$: $Thi - Tco$

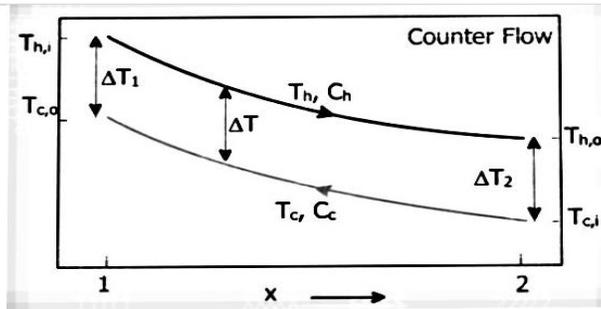
$dT2$: $Tho - Tci$

Thi : Temperatur masuk fluida panas

Tho : Temperatur keluar fluida panas

Tci : Temperatur masuk fluida dingin

Tco : Temperatur keluar fluida dingin



Gambar 3 LMTD pada counter flow[15]

Koefisien pemindah panas global (U_g) adalah suatu syarat yang diperlukan dalam berlangsungnya kondisi proses yang dapat dijelaskan oleh persamaan Fourier dari koefisien film dengan mengabaikan tahanan tube atau shell[14]. Ilustrasi terkait U_g dapat dilihat pada Gambar 4.

$$1/U_g = R_i + R_o = 1/h_o + 1/h_i \tag{10}$$

Atau

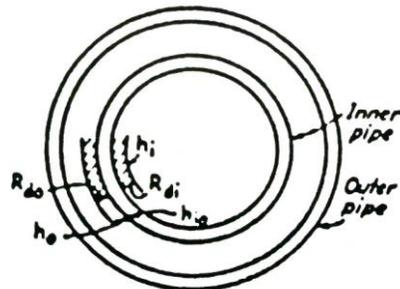
$$U_g = h_i \cdot h_o / (h_i + h_o) \tag{11}$$

Dimana :

U_g : Koefisien pemindah panas global

h_i : Koefisien film pada sisi tube

h_o : Koefisien film pada sisi shell



Gambar 4. Koefisien Pemindah Panas Global[14]

Untuk menggambarkan efektivitas sebuah penukar panas shell-tube pertama kita harus melihat perpindahan panas rata-rata maksimum Q_{maks} [15].

1.) Kondisi $C_c < C_h$ $T_{c,o} = T_{h,i}$

$$q_{maks} = C_c (T_{h,i} - T_{c,i}) \tag{12}$$

2.) Kondisi $C_h < C_c$ $T_{h,o} = T_{c,i}$

$$q_{maks} = C_h (T_{h,i} - T_{c,i}) \tag{13}$$

Untuk selanjutnya dapat ditulis :

$$q_{maks} = C_{min} (T_{h,i} - T_{c,i}) \tag{14}$$

Dimana

$$C_{min} = (m \cdot cp)_{min}$$

Sekarang dapat definisikan efektivitas (e) adalah perbandingan perpindahan panas rata-rata nyata dengan perpindahan panas maksimum yang mungkin yaitu[13]:

$$e = q / q_{maks} \tag{15}$$

dapat juga di tulis[15] :

$$e = f (Ntu \ Cmin/Cmaks) \tag{16}$$

NTU (*Number of Transfer Unit*) adalah bilangan untuk menganalisis penukar panas *shell-tube* dan didefinisikan dalam persamaan[15] :

$$NTU = U \cdot A/Cmin = dT maks/LMTD \tag{17}$$

Dimana LMTD yang dipakai seperti ditunjukkan dalam Persamaan (9).

$$dT maks = Thi -Tho = Tco - Tci$$

$$\epsilon = Ch (Thi - Tho)/Cmin (Thi - Tci) \tag{18}$$

2.4 Data Parameter Operasi He Pada Daya 30 MW

Data hasil pengukuran parameter HE pada operasi reaktor daya 30 MW ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Parameter HE pada operasi daya 30 MW

No.	Parameter	Nilai	Satuan
1	Tpi	44	°C
2	Tpo	36	°C
3	Tsi	30	°C
4	Tso	37	°C
5	Fp	430	Kg/s
6	Fs	485	Kg/s
7	Dos	1300	mm
8	Dot	23	mm
9	Dit	22	mm
10	Pt	28	mm
11	L (tinggi tube)	7410	mm
12	A (bidang kontak)	780	m ²

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan dengan Persamaan (1) diperoleh bilangan Prandtl untuk sisi *shell* 4,67 dan sisi *tube* 4,99. Perhitungan dengan Persamaan (2) diperoleh bilangan Reynolds untuk sisi *shell* 26401,18 dan sisi *tube* 44695,98. Berdasarkan nilai bilangan Prandtl dan nilai bilangan Reynolds tersebut maka tipe aliran fluida dalam alat penukar kalor adalah aliran turbulen. Hal ini menunjukkan bahwa perpindahan panas yang terjadi berada dalam daerah puncak rata-rata perpindahan panas. Bilangan Nusselt yang digunakan menggunakan pendekatan persamaan *Dittus Boelter*. Nilai koefisien perpindahan panas dihitung dengan Persamaan (7). Dari hasil perhitungan diperoleh nilai koefisien perpindahan panas untuk sisi *shell* 5173,59 J/s.m².K dan sisi *tube* 5213,89 J/s.m².K.

Kemampuan memindahkan panas pada alat penukar panas tipe *shell* dan *tube* dipengaruhi oleh koefisien pemindah panas global, luas perpindahan panas dan selisih temperatur rata-rata. Hubungan ketiganya dinyatakan dalam Persamaan *Fourier* (8). Dari hasil perhitungan diperoleh nilai *Ug* sebesar 2596,83 W/m².C. Pada Metode LMTD, dari perhitungan diperoleh nilai LMTD sebesar 6,49 °C. Kemampuan menerima panas sebesar 13,57 MW. Kemampuan menerima panas maksimum yang mungkin sebesar 25,22 MW. Sehingga dengan Persamaan (15) diperoleh nilai *effectiveness* sebesar 54%. Pada Metode e-NTU, dengan Persamaan (17) diperoleh nilai NTU sebesar 2,25. Kemampuan menerima panas sebesar 14,41 MW. Dengan Persamaan (18) diperoleh nilai *effectiveness* sebesar 57%. Nilai *effectiveness* yang tinggi berhubungan dengan beda temperatur yang kecil antara fluida panas dan fluida dingin. Tingginya laju perpindahan panas dihasilkan oleh beda temperatur yang tinggi (*driving potensial* yang lebih besar).

Metode LMTD digunakan untuk analisa kinerja HE karena temperatur masuk fluida dan temperatur keluar fluida sudah diketahui melalui pendekatan keseimbangan energi. Meskipun demikian, pada penelitian ini juga digunakan metode e-NTU. Pada saat reaktor beroperasi, setiap HE didesain memindahkan panas masing-masing 50% dari daya operasi reaktor. Hal ini berarti pada operasi reaktor 30 MW, setiap HE memindahkan 15 MW. Dari hasil analisis dengan Metode LMTD, panas yang bisa diterima oleh HE sebesar 13,57 MW. Nilai ini lebih rendah 9,5 % dari 15 MW. Sedangkan dengan Metode e-NTU, panas yang bisa diterima HE sebesar 14,41 MW. Nilai ini lebih rendah 3,9 % dari 15 MW. Dengan Metode LMTD diperoleh nilai *effectiveness* sebesar 54 %, sedangkan dengan Metode e-NTU diperoleh nilai *effectiveness* sebesar 57 %. Kedua metode tersebut dapat digunakan untuk analisis unjuk kerja HE di Reaktor RSG-GAS dengan deviasi kurang dari 10%. Yang menjadi acuan atau standar untuk menentukan layak tidaknya kinerja komponen pendingin di Reaktor RSG-GAS adalah bahwa nilai temperatur pendingin primer yang keluar dari HE $\leq 42^{\circ}\text{C}$. Dapat disimpulkan bahwa HE Reaktor RSG-GAS masih mampu memindahkan panas sesuai dengan desain awal Alat Penukar Panas Reaktor RSG-GAS yaitu 16.200 kW per unit.

KESIMPULAN

Hasil analisis dengan Metode LMTD, panas yang bisa diterima oleh HE sebesar 13,57 MW. Sedangkan dengan Metode e-NTU, panas yang bisa diterima HE sebesar 14,41 MW. Nilai ini lebih rendah 3,9 % dari 15 MW. Dengan Metode LMTD diperoleh nilai *effectiveness* sebesar 54 %, sedangkan dengan Metode e-NTU diperoleh nilai *effectiveness* sebesar 57 %. HE Reaktor RSG-GAS masih mampu memindahkan panas sesuai dengan desain awal Alat Penukar Panas Reaktor RSG-GAS yaitu 16.200 kW per unit.

DAFTAR PUSTAKA

1. Laporan Analisis Keselamatan Rev. 11, PRSG-BATAN, 2018.
2. Abdul, C., Ariani, A., & Agung, I. M. "Efektivitas Heat Exchanger Shell and Tube 1-1 Sistem Fluida Gliserin-Air", In *Seminar Nasional Rekayasa Proses Industri Kimia* (Vol. 4, No. 1, pp. 14-17).
3. M. Furqon, Syukran, and Sariyusda, "Kaji Eksperimental Dan Analisa Kinerja Penukar Panas Udara Type Shell and Tube Jenis Aliran Berlawanan," *J. Mesin Sains Ter.*, vol. 4, p. 1, 2020.
4. Azwinur and Zulkifli, "Kaji Eksperimental Pengaruh Baffle Pada Alat Penukar Panas Aliran Searah Dalam Upaya Optimasi Sistem Pengering," *SINTEK J. J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 13, no. 1, p. 8, 2019, doi: 10.24853/sintek.13.1.8-14.
5. S. Siagian, "Analisa Efektivitas Alat Penukar Kalor Jenis Shell and Tube Hasil Perencanaan Mahasiswa Skala Laboratorium," *Bina Tek.*, vol. 12, no. 2, p. 211, 2017, doi:10.54378/bt.v12i2.75.
6. Erwan A. S., Widyaningrum, Muhammad F. M. dan AR Yelvia S., "Performance Analysis Of Heat Exchanger At Phosphate Acid Concentrated Unit Pt Petrochemical Gresik", *Jurnal Media Mesin*, vol. 23, no. 2, 2022
7. Hastuti, E.P dan Dibyo S., "Validasi Program Perhitungan Shell Dan Tube Untuk Desain Penukar Kalor Reaktor Riset", *Lokakarya Komputasi dalam Sains dan Teknologi Nuklir*, Oktober 2012.
8. K. Iman, "Evaluasi Kinerja Sistem Keselamatan Reaktor RSG-GAS Selama Beroperasi 25 Tahun", dalam *Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir*. Serpong, Indonesia. Vol.XI, No.1, 2014. pp.1-10.
9. Y. Cengel, "Heat Transfer: A Practical Approach," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
10. Reactor Safety Case, Badan Tenaga Atom Nasional, G.A. Siwabessy, 1986. Tube Cleaning Plant PAH 01 / 02, PUSPIPTEK, Serpong.
11. Iman, Kuntoro, and Dibyo Sukmanto. "Evaluation of RSG-GAS Cooling System After Overhaul of the Heat Exchanger JE-01 BC-01." (2002).
12. Rusjdi, Halim, Achmad Ghozali, and Nofirman Nofirman. "Pengaruh Overhaul Terhadap Efektifitas Kondensator Di PT. Indonesia Power Up Suralaya Unit III." *JURNAL POWERPLANT* 8.1 (2020): 59-70.

13. Holman, J. P. Heat Transfer: Chapter 4 – Unsteady-State Conduction, Tenth Edition. New York: McGraw-Hill. 2010.
14. KERN D.Q. Process Heat Transfer, Chapter 4, Mc Grow Hill Co, International Student Edition, 1950.
15. Nandy Putra. “Alat penukar Kalor”. Depok: Teknik Mesin Universitas Indonesia. 2011.