

PENGARUH PENAMBAHAN JUMLAH PELAT TERHADAP UNJUK KERJA PENUKAR KALOR (HE) REAKTOR TRIGA 2000

Henky Poedjo Rahardjo dan Veronica Indriati Sri Wardhani

PTNBR - BATAN, Jl. Tamansari No. 71 Bandung, 40132

ABSTRAK

PENGARUH PENAMBAHAN JUMLAH PELAT TERHADAP UNJUK KERJA PENUKAR KALOR (HE) REAKTOR TRIGA 2000. Untuk mengurangi adanya gelembung di dalam teras reaktor TRIGA 2000 Bandung pada daya di atas 1000 kW adalah dengan meningkatkan efektivitas penukar kalor(HE). Salah satu cara untuk peningkatan efektivitas tersebut yaitu dengan menambah jumlah pelat di dalam HE. Supaya penambahan jumlah pelat sesuai dengan yang diinginkan, maka perlu dilakukan suatu analisis untuk melihat perbandingan unjuk kerja dalam beberapa variasi penambahan pelat. Analisis dilakukan dengan metoda NTU-Efektivitas. Batasan variabel yang berpengaruh terhadap efektivitas diambil dari pengalaman operasi sejak tahun 2000 sampai 2005. Selain itu diasumsikan bahwa sifat-sifat fluida kerja tidak berubah banyak terhadap suhu dan tekanan serta endapan pengotor pada pelat HE kecil. Hasil yang diperoleh menyatakan bahwa penambahan jumlah pelat akan menaikkan efektivitas penukar kalor. Akan tetapi untuk laju alir primer yang rendah(600 gpm) dan laju alir sekunder yang tinggi(6000 lt/mnt.) kenaikan efektivitasnya kecil walaupun jumlah pelat ditambah, dan efektivitasnya sudah di atas 98 %.

Kata kunci: Jumlah pelat, penukar kalor, unjuk kerja, efektivitas

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF ADDITION THE NUMBER OF PLATE TO HEAT EXCHANGER PERFORMANCE OF TRIGA 2000 REACTOR. In order to reduce the existing bubble in the core of Bandung TRIGA 2000 reactor on its operation above 1000 kW, is done by increasing the effectivity of the heat exchanger (HE). One of the methods for increasing this effectivity is done by adding the number of plate to heat exchanger. To get an appropriate number of plate to be added on achieving its requirement, the analysis to know how the comparison of its performance on variation of addition the number of plate, is needed. The analysis is done by using the NTU-Effectivity method. The variables which influence its effectivity is got from the operational experiences since of the year 2000 until 2005. Besides that, it is assumed that the properties of working fluid has not much changed on its temperature and its pressure and small fouling deposit on the plate of HE. The results show that generally the addition of the number of plate will increase the effectivity of the heat exchanger. But for the low flow rate of the primary(600 gpm) and the high flow rate of the secondary(6000 gpm), a little bit of increasing effectivity is obtained for the addition the number of plate, and the effectivity has been reached to above 98%.

Key words: number of plate, heat exchanger, performance, effectivity

1. PENDAHULUAN

Salah satu usaha untuk mengurangi gelembung di dalam teras reaktor TRIGA 2000 Bandung jika beroperasi di atas 1000 kW adalah dengan meningkatkan efektivitas penukar kalor

(HE). Dari pengalaman operasi, penukar kalor reaktor TRIGA 2000 yang mempunyai pelat sebanyak 144 buah masih belum cukup untuk menurunkan suhu masuk tangki reaktor. Hal ini terbukti dengan adanya suhu yang keluar HE

masih diatas 32 °C, yang berarti tidak sesuai dengan rancangannya.[1,2] Dengan kondisi tersebut akan berakibat tambahnya jumlah gelembung yang ada di dalam teras reaktor saat beroperasi di atas 1000 kW. Melalui kerjasama BATAN-Bandung dengan ANSTO-Australia dicoba untuk mengurangi jumlah gelembung tersebut dengan menambah jumlah pelat penukar kalornya. Supaya penambahan jumlah pelat sesuai dengan yang diinginkan, maka perlu dilakukan suatu analisis untuk melihat perbandingan unjuk kerja berbagai variasi penambahan pelat.

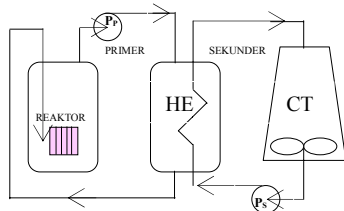
Analisis dilakukan dengan metode NTU-Efektivitas. Dalam melakukan analisis ini, variabel-variabel yang mempengaruhi efektivitas diambil dari pengalaman operasi sejak tahun 2000 sampai 2005. Selain itu diasumsikan bahwa sifat-sifat fluida kerja tidak berubah banyak terhadap suhu dan tekanan.

Dari analisis ini efektivitas HE dapat meningkat sesuai yang diinginkan jika jumlah pelat ditambah dan dapat menurunkan suhu keluaran sisi primer penukar kalor, sehingga diharapkan gelembung di dalam teras reaktor dapat berkurang.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem pendingin primer dan sekunder reaktor TRIGA 2000 Bandung

Reaktor TRIGA 2000 Bandung adalah reaktor penelitian yang mempunyai daya maksimum 2 MW. Reaktor ini didinginkan melalui dua sistem, yaitu sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder, seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem pendingin primer dan sekunder reaktor TRIGA 2000 Bandung

Sistem pendingin primer digunakan untuk memindahkan panas yang keluar dari teras reaktor ke sistem pendingin sekunder melalui penukar kalor yang berjenis pelat. Fluida kerja pendingin primer (fluida panas) bekerja melalui

pompa primer dengan laju alir maksimum 950 gpm.[1,2] Ada dua buah pompa sentrifugal di dalam sistem pendingin primer, tetapi hanya satu pompa yang bekerja pada saat reaktor beroperasi, karena satu pompa yang lain hanya sebagai cadangan.

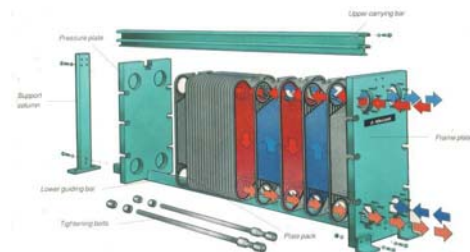
Sistem pendingin sekunder (fluida dingin) digunakan untuk memindahkan panas yang diterima dari sistem pendingin primer yang kemudian dibuang ke udara melalui menara pendingin (*cooling tower*).

Dua buah pompa sentrifugal digunakan untuk menggerakkan fluida kerja sistem pendingin sekunder tetapi hanya satu pompa yang bekerja pada saat reaktor beroperasi, sedang satu pompa yang lain sebagai cadangan. Pada sistem pendingin sekunder ini dilengkapi dengan pipa dan katup *bypass* yang berguna untuk mengatur dan menyeimbangkan laju alir sekunder pada saat reaktor beroperasi. Laju alir sistem pendingin sekunder maksimum 1200 gpm [1,2].

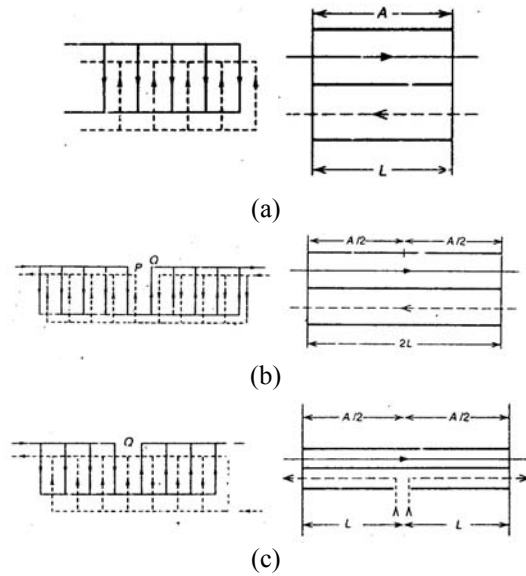
Unjuk kerja sistem pendingin Reaktor TRIGA 2000 sangat bergantung pada unjuk kerja penukar kalornya, yang dinyatakan dalam efektivitas.

2.2. Penukar kalor jenis pelat

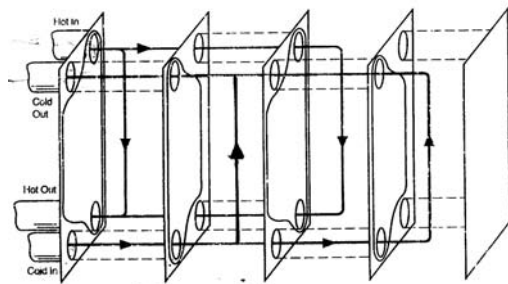
Penukar kalor untuk fluida tak campur mempunyai beberapa jenis antara lain: pipa dan tabung (*shell and tube*), pipa ganda, pipa spiral, pelat, sirip pelat, tabung sirip, dan sebagainya. Dalam makalah ini hanya ditinjau penukar kalor jenis pelat. Penukar kalor jenis pelat terdiri dari pelat-pelat tipis yang berfungsi sebagai pemisah antara fluida panas dan fluida dingin dan pelat tebal sebagai bingkai (*frame*), seperti terlihat pada Gambar 2. Penukar kalor jenis pelat tersebut dibedakan dalam 3(tiga) macam laluan, yaitu: laluan tunggal (*single-pass*), laluan ganda-laluan ganda (*two pass-two pass*) dan laluan ganda-laluan tunggal (*two pass-one pass*), lihat Gambar 3a, 3b dan 3c. Untuk sistem pendingin primer reaktor TRIGA 2000 Bandung digunakan penukar kalor aliran pelat jenis pelat lawan arah laluan tunggal (*single-pass counterflow*), lihat Gambar 4.



Gambar 2. Penukar kalor jenis pelat.



Gambar 3a,3b dan 3c. Tiga macam laluan pada penukar kalor jenis pelat.



Gambar 4. Bentuk aliran penukar kalor TRIGA 2000 Bandung

2.3. Efektivitas penukar kalor pelat aliran lawan arah laluan tunggal

Salah satu cara untuk melihat unjuk kerja penukar kalor digunakan metoda NTU-Efektifitas. Metoda ini digunakan jika suhu masuk atau suhu keluar penukar kalor tidak diketahui. NTU (*Number of Transfer Units*) dapat dinyatakan sebagai,

$$NTU = \frac{AU}{\dot{M}C_p} \quad (1)$$

dengan,

A = luas permukaan pelat (m^2)

\dot{M} = laju alir fluida pendingin (kg/s)

C_p = panas jenis fluida pendingin (J/kg.K)

U = koefisien perpindahan kalor menyeluruh ($W/m^2.K$) dan

$$1/U = 1/\alpha_h + 1/\alpha_c + t/\lambda_p + R_f \quad (2)$$

α = koefisien perpindahan panas fluida kerja ($W/m^2.K$),

$$= \lambda_p Nu / D_e$$

λ_p = Konduktivitas termal pelat ($W/m.K$)

t = tebal pelat (m)

R_f = tahanan pengotor ($m^2.K/W$)

$R_f \rightarrow 0$ jika tidak ada pengotor.

D_e = diameter ekuivalen laluan (m^2)

h,c = subscript panas dan dingin

Jika didefinisikan NTU minimum merupakan harga NTU yang ditentukan oleh fluida kerja dengan kapasitas panas minimum $(\dot{M}C_p)_{min}$ sehingga,

$$NTU_{min} = \frac{AU}{(\dot{M}C_p)_{min}} \quad (3)$$

Adapun hubungan NTU minimum dengan efektifitas untuk penukar kalor jenis pelat dapat dinyatakan sebagai,

$$NTU_{min} = \frac{\ln[(1 - C_r E)/(1 - E)]}{(1 - C_r)} \quad (4)$$

dengan,

$$C_r = \frac{(\dot{M}C_p)_{min}}{(\dot{M}C_p)_{max}} \quad (5)$$

didefinisikan,

$$P = \frac{(T_{c,out} - T_{c,in})}{(T_{h,in} - T_{c,in})} \quad (6)$$

$$R = \frac{(T_{h,in} - T_{h,out})}{(T_{c,out} - T_{c,in})} \quad (7)$$

Jika $(\dot{M}C_p)_{min} = (\dot{M}C_p)_h$, maka efektifitas dapat dinyatakan sebagai [3] :

$$E = P R \quad (8)$$

Dari persamaan (6), (7) dan (8) diperoleh,

$$T_{ho} = T_{hi} - E(T_{hi} - T_{ci}) \quad (9)$$

Untuk jumlah pelat penukar kalor N buah, maka luas permukaan perpindahan kalor totalnya adalah

$$A = N L W \quad (10)$$

dengan,
L dan W adalah tinggi dan lebar pelat (m)
Laju aliran massa di antara ke dua pelat dapat dinyatakan sebagai,

$$\dot{m}_h = \frac{2\dot{M}_h}{N + 1} \quad (11)$$

Sedang kecepatan fluida dapat dituliskan sebagai,

$$u = \frac{\dot{m}_h}{\rho S} \quad (12)$$

S adalah luas tampang lintang laluan fluida antara dua pelat (m²) dan ρ adalah rapat massa (kg/m³).

Jika angka Reynold adalah,

$$Re_h = \frac{u_h De \rho}{\eta} \quad (13)$$

η adalah viskositas fluida kerja dalam (N.s)/ m²

Dari persamaan empirik dinyatakan,

$$Nu = 0,4 (Pr)^{0,4} Re^{0,64} \quad (14)$$

dan,

$$Pr = \frac{C_p \eta}{\lambda} \quad (15)$$

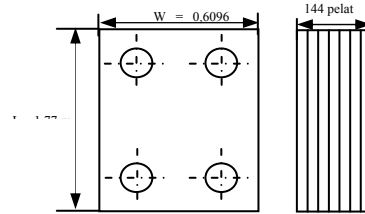
dengan λ adalah konduktivitas termal fluida kerja (W/m.K).

3. PENGUMPULAN DATA ANALISIS

Dimensi penukar kalor diperlukan untuk menentukan luas permukaan perpindahan kalor pelat penukar kalor. Adapun dimensi penukar kalor sistem pendingin reaktor TRIGA 2000 Bandung seperti terlihat pada Gambar 6.

Selain dimensi diperlukan pula pengumpulan data operasi penukar kalor. Hal ini untuk memperkirakan harga variabel operasi yang dapat dicapai oleh reaktor TRIGA 2000

seperti laju aliran massa dan suhu fluida kerja di sisi primer maupun sisi sekunder. Data yang cukup mewakili diambil saat reaktor beroperasi pada tahun 2000 dan tahun 2005, lihat Tabel 1, 2, 3, dan 4.



Gambar 6. Dimensi Penukar Kalor

Dari data operasi tersebut di atas terlihat bahwa laju alir yang dapat dicapai oleh pompa primer hanya berkisar antara 700 s/d 950 gpm, sedang pompa sekunder berkisar antara 3000 s/d 6000 lt/mnt. Suhu masuk sisi sekunder yang dipengaruhi oleh suhu lingkungan berkisar antara 27°C s/d 30°C. Data tersebut di atas akan menjadi pertimbangan dalam analisis unjuk kerja penukar kalor jika dilakukan penambahan pelat.

Tabel 1. Pengukuran pada 29 Agustus 2000

MW	SISI PRIMER			SISI SEKUNDER		
	m (gpm)	T _{hi} (°C)	T _{ho} (°C)	m (lt/mnt)	T _{ci} (°C)	T _{co} (°C)
1	757	36,43	29,38	4705	28	31,8
1	768	36,19	29,26	4696	27,8	31,7
1	785	37,16	30,18	4703	28,6	32,5
1	794	37,2	30,33	4711	28,8	32,6
1	795	37,21	30,34	4699	28,9	32,7
1,5	768	38,1	30,63	4699	28,8	33,4
1,5	767	38,55	30,6	4712	28,7	33,3
1,5	781	38,66	30,82	4708	29,1	33,8
1,5	795	39,18	31	4698	29,7	34,9
1,5	796	40,23	31,52	4711	29,6	34,7

Tabel 2. Pengukuran pada 8 Maret 2005

MW	SISI PRIMER			SISI SEKUNDER		
	m (gpm)	T _{hi} (°C)	T _{ho} (°C)	m (lt/mnt)	T _{ci} (°C)	T _{co} (°C)
1	918	38	35	3404	28	31,5
1	908	38	35,5	3337	28	31,7
1	887	39,25	36	3340	28,2	32,1
1	893	39,5	36,5	3380	28,5	32,5
1	878	39,5	36,5	3349	28,5	32,5
1,5	910	39,5	36,3	3402	28,5	32,4
1,5	893	40,3	37,5	3392	29,1	33,2
1,5	905	40,3	37,4	3410	28,9	32,8
1,5	915	40,2	37,5	3405	29,0	33,3
1,5	899	40,4	37,6	3398	29,2	33,5

Tabel 3. Pengukuran pada 7 April 2005

MW	SISI PRIMER			SISI SEKUNDER		
	m (gpm)	T _{hi} (°C)	T _{ho} (°C)	m (lt/mnt)	T _{ci} (°C)	T _{co} (°C)
1	786	32	28	4990	27,5	30,5
1	918	33	28,5	5990	27,5	30,5
1	870	32	28,5	5053	27,5	30,5
1	988	32	28,5	5088	27,5	30,5
1	918	32	28,5	5048	27,5	30,1
1,5	866	38	31,5	5096	30	34
1,5	832	38	31,5	5058	30	34
1,5	842	38	31,5	4987	30	34
1,5	852	38	31,5	5004	30	34
1,5	844	38	31,5	5064	30	34

Tabel 4. Pengukuran pada 11 April 2005

MW	SISI PRIMER			SISI SEKUNDER		
	m (gpm)	T _{hi} (°C)	T _{ho} (°C)	m (lt/mnt)	T _{ci} (°C)	T _{co} (°C)
1	905	32,5	28,5	5024	28	30,5
1	907,5	32,5	28,5	5017	28	30,5
1	908,1	32,5	28,5	4996	28	30,5
1	908,6	32,5	28,5	5079	28	30,5
1	908,1	32,5	28,5	5074	28	30,5
1,5	902,1	37,5	32	5015	30	34,5
1,5	905,9	37,5	32	5009	30	34,5
1,5	903,2	37,5	32	5022	30	34,5
1,5	904,8	37,5	32	5058	30	34,5
1,5	905,4	37,5	32	4987	30	34,5

4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

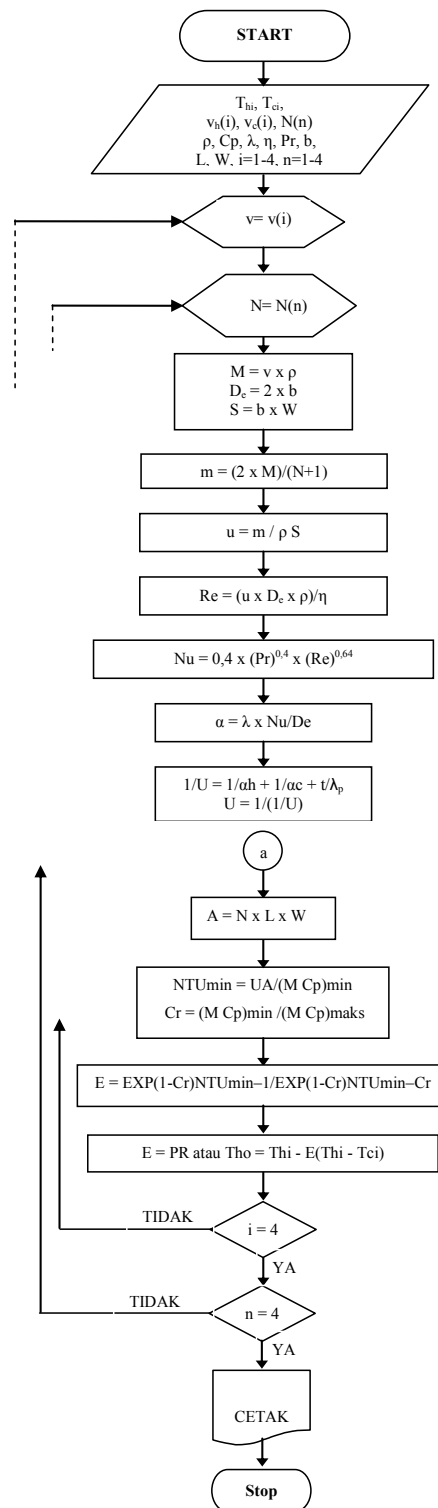
Berdasarkan data pengukuran yang diambil pada operasi reaktor tahun 2000 dan 2005 di atas, maka dalam analisis ini ditetapkan 4 variasi laju alir yaitu: 600 gpm, 700 gpm, 800 gpm dan 900 gpm untuk laju alir primer sedang untuk laju alir sekunder adalah: 4000 lt/mnt, 4500lt/mnt, 5000 lt/mnt dan 6000 lt/mnt.

Suhu masukan sisi sekunder diambil 5 variasi yaitu: 24°C, 26°C, 28°C, 30°C dan 32°C. Sedang suhu masukan sisi primer bervariasi dari 30 °C, 32°C, 35°C, 40°C, dan 45°C.

Adapun langkah-langkah perhitungannya seperti terlihat dalam diagram alir pada Gambar 7.

Dalam analisis ini dibuat beberapa asumsi sebagai berikut:

1. Sifat-sifat fluida kerja tidak berubah banyak terhadap suhu maupun tekanan (konstan).
2. Pelat HE dianggap dalam keadaan bersih, belum kotor atau pengotornya masih sangat tipis ($R_f \rightarrow 0$).



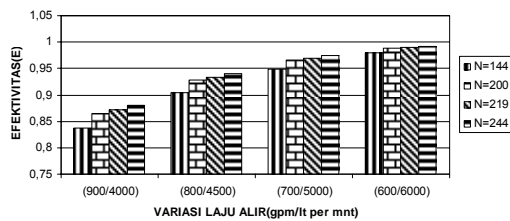
Gambar 7. Diagram alir perhitungan

Mula-mula dilakukan perhitungan NTU kemudian dihitung efektifitasnya dan dari efektifitas tersebut diperoleh suhu keluaran sisi

primer penukar kalor (T_{ho}). Dengan berbagai variasi pasangan laju alir volumetrik sisi primer dan sekunder diperoleh hasil perhitungan seperti terlihat pada Tabel 5.

Hasil analisis secara keseluruhan dapat dilihat pada lampiran 1. Hubungan pengaruh penambahan pelat terhadap efektivitas untuk beberapa variasi laju alir fluida pendingin terlihat seperti pada kurva Gambar 8. Kurva tersebut menyatakan bahwa jika pelat ditambah maka efektivitas penukar kalor akan meningkat. Ini berarti bahwa jika pelat bertambah akan memperbesar luas permukaan perpindahan panas sehingga NTU atau efektivitasnya akan bertambah.

Tetapi penambahan jumlah pelat tersebut akan kecil atau hampir tidak berarti jika laju alir fluida panas dibuat 600 gpm dan fluida dingin 6000 lt/mnt.



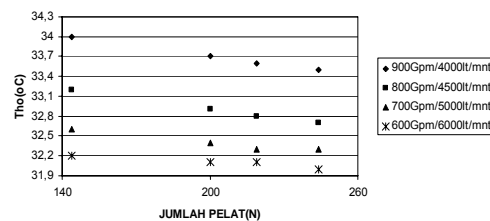
Gambar 8. Hubungan efektivitas (E), jumlah pelat(N) dan variasi laju alir

Untuk jumlah pelat yang bertambah besar akan menghasilkan suhu keluaran yang semakin kecil. Hal ini karena penambahan pelat akan menaikkan efektivitas penukar kalor, sehingga kalor yang diterima oleh sisi sekunder akan lebih besar jika jumlah pelatnya bertambah atau luas permukaan perpindahan panasnya bertambah, lihat Gambar 9. Jadi jika efektivitas penukar kalor naik akan dapat menurunkan suhu keluaran fluida panas. Untuk berbagai variasi jumlah pelat, suhu keluaran fluida panas dapat mendekati atau sama dengan 32°C . Hal ini terjadi apabila laju alir primer diatur 600 gpm dan laju alir sekundernya 6000 lt/mnt., lihat tabel 5. Jika laju alir sekunder di bawah 6000 lt/mnt. maka suhu keluaran fluida panasnya tidak akan dapat mendekati 32°C , lihat Lampiran 1.

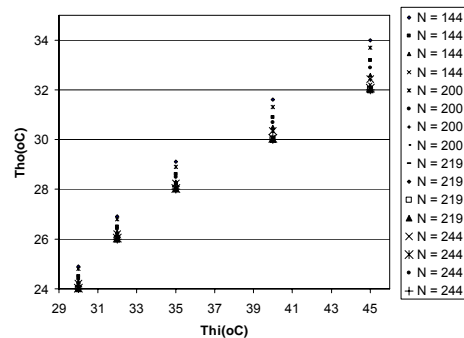
Hubungan antara suhu masukan (T_{hi}) dengan suhu keluaran (T_{ho}) fluida panas untuk berbagai variasi jumlah pelat dan variasi laju alir terlihat pada Gambar 10.

Tabel 5. Hasil perhitungan Efektivitas (E) dan Suhu keluar HE sisi panas (T_{ho}) untuk berbagai variasi jumlah pelat

N	V_p (gpm)	V_s (lt/mnt)	E	T_{hi} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{ho} ($^{\circ}\text{C}$)
144	600	6000	0,980	30	24,1
				32	26,1
				35	28,1
				40	30,1
				45	32,1
200	600	6000	0,989	30	24,0
				32	26,0
				35	28,0
				40	30,1
				45	32,1
219	600	6000	0,990	30	24,0
				32	26,0
				35	28,0
				40	30,0
				45	32,1
244	600	6000	0,992	30	24,0
				32	26,0
				35	28,0
				40	30,0
				45	32,0



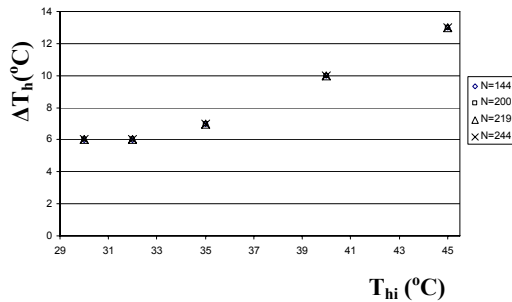
Gambar 9. Suhu Keluaran sisi Primer vs jumlah pelat(N)



Gambar 10. Suhu masukan sisi panas (T_{hi}) vs suhu keluaran sisi panas (T_{ho}) untuk berbagai jumlah pelat dan variasi laju alir.

Pada Gambar 10 terlihat bahwa dengan jumlah pelat yang berbeda suhu keluaran HE pada sisi primer karakteristiknya cenderung sama untuk berbagai variasi laju alir, yaitu untuk suhu masukan yang besar akan menghasilkan suhu keluaran yang besar. Walaupun demikian hanya jumlah pelat 219 dan 244 yang dapat

menghasilkan suhu keluaran mendekati 32°C. Demikian pula jika suhu masuknya besar beda suhunya juga akan membesar, seperti terlihat pada Gambar 11. Hal ini terjadi karena suhu masuk berbanding lurus dengan beda suhu antara masukan dengan keluaran.



Gambar 11. Suhu masukan sisi panas (T_{hi}) vs beda suhu (ΔT_h)

Dari data operasi, Tabel 1,2,3 dan 4 terlihat pula bahwa beda suhu keluaran dan masukan sisi primer akan membesar tetapi tidak dapat lebih dari 10°C dan suhu keluaran sisi primernya sering di atas 32°C. Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas penukar kalornya belum maksimal dan belum mampu untuk memindahkan panas ke sisi sekunder seperti rancangan General Atomic [1]. Oleh karena itu supaya efektivitas penukar kalor sesuai dengan rancangan tersebut atau suhu keluaran sisi primernya dapat mencapai 32°C perlu dilakukan hal-hal berikut:

1. Pada saat operasi diusahakan agar laju alir sisi sekunder dapat diatur minimum sebesar 6000 lt/mnt, sedang laju alir sisi primernya cukup diatur 600 gpm. kombinasi pasangan laju alir primer dan sekunder yang paling optimum adalah 600 gpm dan 6000 lt/mnt, lihat Tabel 6.
2. Selain itu jumlah pelat penukar kalor sebaiknya ditambah supaya efektivitasnya dapat mencapai di atas 98%. Hanya penambahan pelat harus diperhitungkan ruangan yang ada di lokasi penukar kalor berada. Diperkirakan ruangan yang ada hanya cukup untuk penambahan sampai 75 pelat, yang berarti jumlah pelat hanya dapat mencapai 219 pelat. Ini berarti suhu keluaran fluida panas hanya dapat mencapai 32,1°C untuk suhu masukan 45°C. Untuk mendapatkan suhu keluaran fluida panas sebesar 32°C maka laju alir sisi sekundernya harus dibuat lebih besar dari 6000 lt/mnt, yaitu dengan mengatur katup *bypass*.

Tabel 6. Variasi laju alir primer dan sekunder terhadap suhu panas keluaran (T_{ho})

N = 144								
V_p (gpm)	V_s (gpm)	T_{ho} (°C)	V_s (gpm)	T_{ho} (°C)	V_s (gpm)	T_{ho} (°C)	V_s (gpm)	T_{ho} (°C)
900	4000	34,0	4500	33,6	5000	33,3	6000	32,9
800	4500	33,2	5000	33,0	6000	32,7	4000	33,5
700	5000	32,6	6000	32,4	4000	33,0	4500	32,8
600	6000	32,2	4000	32,6	4500	32,4	5000	32,3
N = 200								
V_p (gpm)	V_s (gpm)	T_{ho} (°C)	V_s (gpm)	T_{ho} (°C)	V_s (gpm)	T_{ho} (°C)	V_s (gpm)	T_{ho} (°C)
900	4000	33,7	4500	33,3	5000	33,0	6000	32,7
800	4500	32,9	5000	32,7	6000	32,4	4000	33,2
700	5000	32,4	6000	32,2	4000	32,7	4500	32,5
600	6000	32,1	4000	32,4	4500	32,3	5000	32,2
N = 219								
V_p (gpm)	V_s (gpm)	T_{ho} (°C)	V_s (gpm)	T_{ho} (°C)	V_s (gpm)	T_{ho} (°C)	V_s (gpm)	T_{ho} (°C)
900	4000	33,6	4500	33,2	5000	32,9	6000	32,6
800	4500	32,8	5000	32,6	6000	32,4	4000	33,1
700	5000	32,3	6000	32,2	4000	32,7	4500	32,5
600	6000	32,1	4000	32,3	4500	32,2	5000	32,1
N = 244								
V_p (gpm)	V_s (gpm)	T_{ho} (°C)	V_s (gpm)	T_{ho} (°C)	V_s (gpm)	T_{ho} (°C)	V_s (gpm)	T_{ho} (°C)
900	4000	33,5	4500	33,1	5000	32,8	6000	32,5
800	4500	32,7	5000	32,5	6000	32,3	4000	33,0
700	5000	32,3	6000	32,1	4000	32,6	4500	32,4
600	6000	32,0	4000	32,3	4500	32,2	5000	32,1

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pembahasan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan jumlah pelat akan menaikkan efektivitas penukar kalor, tetapi kenaikan tersebut akan kecil jika perbandingan laju alir primer dengan sekundernya adalah sebesar 600 gpm/6000 lt/mnt.
2. Kenaikan efektivitas penukar kalor akan menurunkan suhu keluaran fluida panas.
3. Untuk laju alir primer yang kecil (600 gpm) dan laju alir sekunder yang besar (6000 lt/mnt.) akan menghasilkan efektivitas di atas 98 %. Sedang suhu keluaran sisi primer baru dapat mencapai 32°C jika jumlah pelat 244 buah. Hal ini sulit untuk dilaksanakan karena ruangan tempat penukar kalor berada tidak cukup. Oleh karena itu jika pelat tidak ditambah maka pada saat operasi laju alir sekunder harus diatur lebih besar dari 6000 lt/mnt. Laju alir ini akan dapat dicapai dengan pengaturan katup *bypass*. Pasangan laju alir primer dan sekunder yang optimum untuk reaktor TRIGA 2000 Bandung adalah 600 gpm dan 6000 lt/mnt. Dengan pasangan tersebut diperoleh suhu keluaran sisi primer mendekati 32°C seperti hasil rancangan General Atomic.

5.2. Saran

Karena data suhu dan laju alir sangat penting untuk mengetahui efektivitas penukar kalor, maka perlu dilakukan kalibrasi yang teratur dan kontinu terhadap alat ukur suhu dan laju alir.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. **GENERAL ATOMIC**, Safety Analysis Report for Upgrade of Triga Mark II Reactor at Center for Nuclear Techniques Research”, Bandung.1996
2. **BATAN, PTNBR**, Laporan Analisis Keselamatan Akhir Reaktor TRIGA 2000 Bandung, rev.3 (2006) bab 6 hal 10 dari 18.

3. **HEWITT G.F., SHIRES G.L., BOTT T.R.**, Process Heat Transfer, Begell House, Inc, Madison Avenue, New York (2000).
4. **RAHARDJO H.P., SOBANA., DUDUNG A.R., GITO NITOWARI.**, Prediksi endapan pengotor penukar panas tipe pelat Reaktor TRIGA 2000, Jurnal Sain dan Teknologi Nuklir, volume VI, Edisi Khusus (2003) p.43-64.
5. **WARDHANI V.I.S., RAHARDJO HENKY P., DUDUNG A.R.**, Karakteristik dan efektivitas penukar kalor reaktor Triga 2000 Bandung setelah dibersihkan, Jurnal Sain dan Teknologi Nuklir, volume VIII (2007) p.41-50.

7. LAMPIRAN

Lampiran 1

No	V _p (gpm)	V _s (lt/mnt)	E	T _{hi} (°C)	T _{ho} (°C)	V _p (gpm)	V _s (lt/mnt)	E	T _{hi} (°C)	T _{ho} (°C)
144	900	4000	0,838	30	24,9	900	5000	0,892	30	24,6
				32	26,9				32	26,6
				35	29,1				35	28,7
				40	31,6				40	31,0
				45	34,0				45	33,3
	800	4500	0,904	30	24,5	800	6000	0,945	30	24,3
				32	26,5				32	26,3
				35	28,6				35	28,3
				40	30,9				40	30,5
				45	33,2				45	32,7
	700	5000	0,949	30	24,3	700	4000	0,917	30	24,4
				32	26,3				32	26,4
				35	28,3				35	28,5
				40	30,5				40	30,8
45				32,6	45				33,0	
600	6000	0,980	30	24,1	600	4500	0,962	30	24,2	
			32	26,1				32	26,2	
			35	28,1				35	28,2	
			40	30,1				40	30,3	
			45	32,2				45	32,4	
900	4500	0,869	30	24,7	900	6000	0,923	30	24,4	
			32	26,7				32	26,4	
			35	28,9				35	28,5	
			40	31,3				40	30,7	
			45	33,6				45	32,9	
800	5000	0,922	30	24,4	800	4000	0,879	30	24,7	
			32	26,4				32	26,7	
			35	28,5				35	28,8	
			40	30,7				40	31,2	
			45	33,0				45	33,5	
700	6000	0,965	30	24,2	700	4500	0,936	30	24,3	
			32	26,2				32	26,3	
			35	28,2				35	28,4	
			40	30,3				40	30,6	
			45	32,4				45	32,8	
600	4000	0,950	30	24,2	600	5000	0,970	30	24,1	
			32	26,2				32	26,1	
			35	28,3				35	28,2	
			40	30,4				40	30,2	
			45	32,6				45	32,3	
900	4000	0,865	30	24,8	900	5000	0,918	30	24,4	
			32	26,8				32	26,4	
			35	28,9				35	28,5	
			40	31,3				40	30,8	
			45	33,7				45	33,0	
			30	24,4				30	24,2	
		0,928					0,964			

No	V _p (gpm)	V _s (lt/mnt)	E	T _{hi} (°C)	T _{ho} (°C)	V _p (gpm)	V _s (lt/mnt)	E	T _{hi} (°C)	T _{ho} (°C)	
200	800	4500		32	26,4	800	6000		32	26,2	
				35	28,5				35	28,2	
				40	30,7				40	30,3	
				45	32,9				45	32,4	
	700	5000	0,966	30	24,2	700	4000	0,939	30	24,3	
				32	26,2				32	26,3	
				35	28,2				35	28,4	
				40	30,3				40	30,6	
	600	6000	0,989	30	24,0	600	4500	0,976	30	24,1	
				32	26,0				32	26,1	
				35	28,0				35	28,1	
				40	30,1				40	30,2	
	900	4500	0,896	30	24,6	900	6000	0,945	30	24,3	
				32	26,6				32	26,3	
				35	28,7				35	28,3	
				40	31,0				40	30,5	
	800	5000	0,944	30	24,3	800	4000	0,904	30	24,5	
				32	26,3				32	26,5	
				35	28,3				35	28,6	
				40	30,5				40	30,9	
	700	6000	0,978	30	24,1	700	4500	0,955	30	24,2	
				32	26,1				32	26,2	
				35	28,1				35	28,3	
				40	30,2				40	30,4	
600	4000	0,966	30	24,2	600	5000	0,982	30	24,1		
			32	26,2				32	26,1		
			35	28,2				35	28,1		
			40	30,3				40	30,1		
219	900	4000	0,872	30	24,7	900	5000	0,924	30	24,4	
				32	26,7				32	26,4	
				35	28,8				35	28,5	
				40	31,2				40	30,7	
	800	4500	0,934	30	24,3	800	6000	0,968	30	24,1	
				32	26,3				32	26,1	
				35	28,4				35	28,2	
				40	30,6				40	30,3	
	700	5000	0,970	30	24,1	700	4000	0,944	30	24,3	
				32	26,1				32	26,3	
				35	28,2				35	28,3	
				40	30,2				40	30,5	
	600	6000	0,990	30	24,0	600	4500	0,979	30	24,1	
				32	26,0				32	26,1	
				35	28,0				35	28,1	
				40	30,0				40	30,2	
	900	4500	0,902	30	24,5	900	6000	0,951	30	24,2	
				32	26,5				32	26,2	
				35	28,6				35	28,3	
				40	30,9				40	30,4	
	800	5000	0,949	30	24,3	800	4000	0,910	30	24,5	
				32	26,3				32	26,5	
				35	28,3				35	28,6	
				40	30,5				40	30,8	
700	6000	0,981	30	24,1	700	4500	0,959	30	24,2		
			32	26,1				32	26,2		
			35	28,1				35	28,2		
			40	30,1				40	30,4		
600	4000	0,970	30	24,1	600	5000	0,984	30	24,0		
			32	26,1				32	26,0		
			35	28,2				35	28,1		
			40	30,2				40	30,1		
900	4000		30	24,7	900	5000		30	24,4		
			32	26,7				32	26,4		
			35	28,8				35	28,4		
			40	31,1				40	30,6		
				0,880						0,931	

No	V _p (gpm)	V _s (lt/mnt)	E	T _{hi} (°C)	T _{ho} (°C)	V _p (gpm)	V _s (lt/mnt)	E	T _{hi} (°C)	T _{ho} (°C)
244	800	4500	0,940	45	33,5	800	6000	0,972	45	32,8
				30	24,3				30	24,1
				32	26,3				32	26,1
				35	28,4				35	28,1
				40	30,5				40	30,2
	45	32,7	45	32,3						
	700	5000	0,974	30	24,1	700	4000	0,949	30	24,3
				32	26,1				32	26,3
				35	28,1				35	28,3
				40	30,2				40	30,5
				45	32,3				45	32,6
	600	6000	0,992	30	24,0	600	4500	0,982	30	24,1
				32	26,0				32	26,1
				35	28,0				35	28,1
				40	30,0				40	30,1
				45	32,0				45	32,2
	900	4500	0,910	30	24,5	900	6000	0,957	30	24,2
				32	26,5				32	26,2
				35	28,6				35	28,3
				40	30,8				40	30,4
				45	33,1				45	32,5
	800	5000	0,955	30	24,2	800	4000	0,917	30	24,4
				32	26,2				32	26,4
				35	28,3				35	28,5
40				30,4	40				30,8	
45				32,5	45				33,0	
700	6000	0,984	30	24,0	700	4500	0,964	30	24,2	
			32	26,0				32	26,2	
			35	28,1				35	28,2	
			40	30,1				40	30,3	
			45	32,1				45	32,4	
600	4000	0,974	30	24,1	600	5000	0,987	30	24,0	
			32	26,1				32	26,0	
			35	28,1				35	28,0	
			40	30,2				40	30,1	
			45	32,3				45	32,1	

8. DISKUSI

Budi Rohman – BAPETEN :

- Berapakah jumlah pelat HE yang mungkin dipasang saat ini sehingga dapat dicapai suhu primer keluaran HE sebagaimana design dari GA (32°C).
- Untuk konfigurasi teras saat ini, berapakah nilai fraksi void di teras reaktor untuk kondisi temperatur masuk teras ideal (untuk daya tertentu misal 2000 kW)? Apakah mendekati nilai di awal tahun 2000-an?

V.I.S. Wardhani :

- Dari analisis kami, supaya dicapai suhu primer keluar HE 32°C maka jumlah plat HE harus berjumlah 244 plat. Akan tetapi, mengingat ruangan hanya cukup 219 plat saja maka untuk mencapai suhu 32°C laju alir sekundernya harus dibuat lebih besar dari 6000 Lt/menit dan laju alir primernya cukup dibuat 600 GPM.
- Menurut perhitungan GA, nilai fraksi void 0,4. Hanya yang menjadi masalah kita tidak dapat mengukur fraksi void tersebut. Sebenarnya setelah HE dibersihkan temperatur / suhu bias mendekati keadaan awal asalkan laju alir sekundernya dapat dibuat lebih besar 6000 Lt/menit .

Sudjatmi – PTNBR BATAN :

Bila dibandingkan pada plat 144, 200, 219, 244 maka perubahan T_{ho} hanya 0.1°C. Pada plat 144, T_{ho} = 30,1. Pada plat 244, T_{ho} = 30,0 (pada laju alir primer 600, sekunder 6000). Apakah boleh disimpulkan bahwa penambahan plat tidak memberikan pengaruh yang berarti terhadap penurunan temperatur ?

V.I.S. Wardhani :

Pada 144 plat T_{ho} yang dapat dicapai adalah 32,1°C bukan 30,1°C dan pada 244 plat 32°C bukan 30°C (lihat tabel 5). Untuk laju alir primer dan sekunder 600 GPM dan 6000 Lt/menit . Penambahan jumlah plat memang tidak memberikan pengaruh yang berarti terhadap penurunan temperatur karena efektifitas HE sudah diatas 98%.

Reinaldy – PTNBR BATAN :

1. Manakah tindakan yang paling baik untuk menurunkan temperatur keluaran HE, mengganti semua plat atau penambahan jumlah plat? Dimana perbedaannya?
2. Kombinasi (variasi) suhu masukan sisi sekunder dan primer seperti yang disebutkan (24°C, 30°C), (26°C, 32°C) , (28°C, 35°C) dst. Bukan merupakan kondisi operasi reaktor yang sebenarnya. (tabel 1 s/d 4). Jadi kesimpulan yang dibuat jangan dinyatakan sebagai saran untuk operasi reaktor TRIGA 2000.
3. Data operasi tabel 1 dan tabel 5; laju alir primer antara 700 GPM – 900 GPM. Tetapi dalam hitungan digunakan laju alir primer 600 GPM. Apakah dengan menggunakan laju alir lebih kecil 700 GPM – 900 GPM merupakan suatu tindakan yang tepat. Karena dengan kondisi yang ada sekarang suhu teras sudah tinggi, apalagi kalau laju alir primer dikurangi.

V.I.S. Wardhani :

1. Menambah plat lebih baik, karena lebih efisien dan ekonomis. Kalau mengganti semua plat jelas tidak efisien dan tidak ekonomis.
2. Kondisi variasi suhu tersebut memang kondisi yang dapat dicapai oleh reaktor TRIGA 2000. oleh karena itu, pada analisis ini kami membuat variasi disekitar suhu tersebut. Jadi dari hasil analisis tersebut, kami dapat menyarankan untuk operasi reaktor TRIGA 2000.
3. Ya, itu merupakan tindakan yang tepat, karena dari data operasi, laju alir primer 700 GPM itu sebenarnya dapat diturunkan menjadi dibawah 700 GPM (\pm 600 GPM) yaitu dengan sedikit menutup katup pengatur didepan pompa primer. Suhu teras tinggi sangat tergantung dari laju alir dikanal teras, bukan tergantung dari laju alir primer. Lihat sistem perpipaan pendingin primer Gambar 1.