

---

**PEROLEHAN SUHU AIR PENDINGIN PRIMER REAKTOR TRIGA  
2000 KETIKA PENAMBAHAN CEROBONG DAN PELAT PENUKAR PANAS**

Reinaldy Nazar

Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri – BATAN,  
Jl. Tamansari No. 71, Bandung, 40132, E-mail: reinaldynazar@yahoo.co.id

Diterima editor 29 Agustus 2011

Disetujui untuk publikasi 30 September 2011

**ABSTRAK**

**PEROLEHAN SUHU AIR PENDINGIN PRIMER REAKTOR TRIGA 2000 KETIKA PENAMBAHAN CEROBONG DAN PELAT PENUKAR PANAS.** Kesiambungan operasi reaktor TRIGA 2000 di antaranya ditentukan oleh suhu bahan bakar dan suhu air pendingin primer. Sebagai contoh pengoperasian reaktor TRIGA 2000 saat ini sulit mencapai daya 2000 kW, karena suhu di pusat elemen bahan bakar di dalam teras reaktor mencapai 675 °C, suhu pendingin primer yang masuk ke teras reaktor mencapai 41,3 °C, suhu pendingin primer yang ke luar dari tangki reaktor mencapai 48,2 °C. Tingginya suhu elemen bahan bakar dan suhu pendingin primer di dalam teras telah meningkatkan pendidihan dan menambah pembentukan gelembung uap di dalam teras reaktor, sehingga menurunkan moderasi neutron oleh pendingin primer di dalam teras dan reaktor tidak mampu mencapai daya 2000 KW. Beberapa kegiatan yang dapat dilakukan untuk menurunkan suhu bahan bakar dan air pendingin primer di dalam teras reaktor TRIGA 2000, di antaranya dengan menempatkan cerobong di atas teras reaktor dan menambah pelat penukar panas. Mengingat studi kasus ini tidak memungkinkan untuk dilakukan secara eksperimen, maka analisis dilakukan melalui kajian teoritik menggunakan program komputer CFD. Berdasarkan hasil kajian yang telah dilakukan diketahui bahwa dengan menambah tinggi cerobong menjadi 2 m, pelat penukar panas menjadi 384 lembar, laju alir pendingin primer 950 gpm, dan laju alir pendingin sekunder menjadi 1200 gpm, mampu menurunkan suhu pendingin primer yang ke luar dari penukar panas atau suhu pendingin primer yang masuk ke teras reaktor menjadi 30,48 °C. Jika kondisi ini digunakan tentunya akan menurunkan suhu maksimum kelongsong bahan bakar, dan suhu pendingin primer di dalam teras, sehingga akan mengurangi pendidihan di dalam teras reaktor, meskipun hal ini akan menaikkan konsentrasi N-16 di permukaan tangki reaktor menjadi 49,41%.

Kata kunci: cerobong, pelat penukar panas, suhu bahan bakar, suhu pendingin primer.

**ABSTRACT**

**THE OBTAINING OF PRIMARY COOLING WATER TEMPERATURE OF THE TRIGA 2000 REACTOR WHEN THE ADDITION OF THE CHIMNEY AND THE HEAT EXCHANGER PLATE.**

*Continuation of the TRIGA 2000 reactor operation is determined by the fuel and primary cooling water temperature. For example, recently the TRIGA 2000 reactor is very difficult to reach the maximum power level of 2000 kW, because at maximum power level, the maximum fuel temperature in the reactor core is 675 °C, the inlet primary cooling water temperature into reactor core is 41.3 °C, and the outlet primary cooling water from reactor tank is 48.2 °C. The increasing of the fuel temperature and primary cooling water temperature in reactor core, increase also the bubbling and the bubble of vapour in the reactor core so, it reduces the neutrons moderation in the reactor core and then the reactor is unable to reach power level of 2000 kW. There are some actions can be done to reduce the fuel temperature and the primary cooling water temperature in reactor core, as to give a chimney above reactor core and to add additional heat exchanger plates. Because these studies can not be done experimentally, then the analysis done through theoretical studies using computer programs RELAP5/Mod3.2. Based on result of the study, it is known that by rising the chimney height to become 2 m, give additional heat exchanger plates to become 384 slabs, flow rate of primary cooling water is 950 gpm, and to increase flow rate of secondary cooling water to become 1200 gpm, it can reduced the primary cooling water temperature exit from heat exchanger or the primary cooling water temperature into reactor core to become 30.48 °C. If this condition applied, it can reduce the fuel cladding and the primary cooling water maximum temperature in reactor core, so the bubbling decreased in the reactor core, though it will increase the maximum concentration of N-16 on the tank surface to become 49.41%.*

*Keyword: chimney, heat exchanger plate, fuel temperature, primary cooling temperature*

## PENDAHULUAN

Kesinambungan beroperasinya suatu reaktor nuklir di antaranya ditentukan oleh suhu bahan bakar dan suhu air pendingin primer. Sebagai contoh, pada tahun 2000 ketika reaktor TRIGA 2000 dioperasikan hingga mencapai daya 2000 kW diperoleh suhu di pusat elemen bahan bakar di dalam teras 568 °C, suhu pendingin primer keluar tangki 36 °C, dan telah terbentuk gelembung uap sebagai pertanda telah terjadi pendidihan (*boiling*) di dalam teras reaktor. Hal ini sesuai dengan analisis *General Atomic* yang memprediksi akan terjadi pendidihan (*subcooled boiling*) ketika reaktor TRIGA 2000 dioperasikan pada daya 2000 kW [1]. Pada saat ini, pengoperasian reaktor TRIGA 2000 sulit mencapai daya 2000 kW, karena suhu di pusat elemen bahan bakar di dalam teras reaktor mencapai 675 °C, suhu pendingin primer yang ke luar dari tangki reaktor mencapai 48,2 °C, dan suhu pendingin primer yang masuk ke tangki atau teras reaktor mencapai 41,3 °C. Tingginya suhu elemen bahan bakar dan suhu pendingin primer di dalam teras telah meningkatkan pendidihan dan menambah pembentukan gelembung uap di dalam teras reaktor, sehingga menurunkan moderasi neutron oleh pendingin primer di dalam teras dan reaktor tidak mampu mencapai daya 2000 kW.

Kenaikan suhu elemen bahan bakar di dalam teras reaktor diantaranya disebabkan air pendingin primer yang masuk ke teras reaktor bersuhu tinggi, sehingga air pendingin primer ini tidak mampu mengambil panas secara maksimal dari kelongsong elemen bahan bakar melalui konveksi alamiah. Air pendingin primer yang masuk ke teras reaktor tersebut berasal dari penukar panas, dan air ini bersuhu tinggi karena penukar panas tidak mampu memindahkan panas secara maksimal dari air pendingin primer ke air pendingin sekunder melalui konveksi paksa.

Beberapa kegiatan yang dapat dilakukan untuk menurunkan suhu bahan bakar dan air pendingin primer di dalam teras reaktor TRIGA 2000, di antaranya dengan penempatan cerobong di atas teras reaktor dan penambahan pelat penukar panas. Dalam kajian terdahulu telah dilakukan analisis pengaruh penambahan tinggi cerobong terhadap penurunan suhu teras reaktor TRIGA 2000 [2].

Pada makalah ini dibahas kondisi optimum yang dapat diperoleh ketika dilakukan secara bersamaan penambahan tinggi cerobong dan penambahan jumlah pelat penukar panas yang disusun seri dan paralel dengan pelat lama, untuk menurunkan suhu kelongsong bahan bakar, suhu air pendingin primer di dalam teras, suhu air pendingin primer yang ke luar dari tangki, suhu air pendingin primer yang ke luar dari penukar panas atau suhu air pendingin primer yang masuk ke teras reaktor, dan konsentrasi N-16 di permukaan tangki.

## TEORI

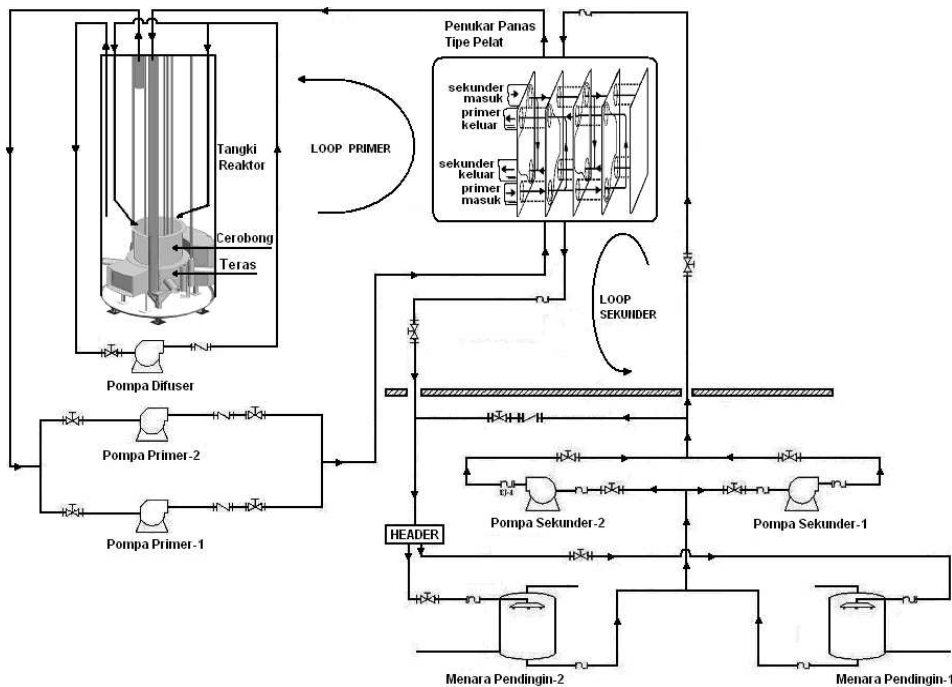
Reaktor TRIGA (*Training Research Isotopes Production by General Atomic*) 2000 (Gambar 1), merupakan reaktor penelitian bertipe tangki (*tank type*) berdaya maksimum 2000 kW dan memiliki 121 buah lubang kisi (*grid*) untuk menyusun elemen bahan bakar dengan pola heksagonal di dalam teras reaktor. Teras reaktor direndam dalam tangki reaktor menggunakan air murni. Air ini berfungsi sebagai moderator dan pendingin primer untuk mengambil panas hasil reaksi fisi di dalam teras reaktor.

Sistem pendingin reaktor TRIGA 2000 terdiri dari sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder. Sistem pendingin primer terdiri dari tangki reaktor, dua buah pompa sentrifugal, alat penukar panas tipe pelat, dan sistem difuser untuk membelokkan sebagian arah aliran air pendingin yang ke luar dari teras reaktor. Sedangkan sistem

pendingin sekunder terdiri dari dua buah menara pendingin, dua buah pompa sentrifugal, alat penukar panas tipe pelat.

Cerobong adalah ruang vertikal di atas teras reaktor TRIGA 2000 yang berisi air pendingin primer, berfungsi untuk menaikkan driving pressure atau driving force (gaya angkat) di dalam teras. Penambahan tinggi cerobong akan menaikkan gaya angkat dan sekaligus menaikkan kecepatan aliran air pendingin di dalam teras, sehingga meningkatkan perpindahan panas konveksi alamiah dari bahan bakar ke air pendingin primer di dalam teras [3-5]. Di sisi lain penempatan cerobong akan mempercepat N-16 untuk mencapai permukaan tangki, sehingga konsentrasi N-16 di permukaan tangki meningkat.

Penukar panas (heat exchanger) reaktor TRIGA 2000 bertipe pelat berfungsi untuk memindahkan panas dari air pendingin primer ke air pendingin sekunder. Penambahan pelat pada penukar panas akan menambah luas bidang permukaan perpindahan panas di dalam penukar panas, sehingga akan meningkatkan perpindahan panas dari air pendingin primer ke air pendingin sekunder di dalam penukar panas [6].

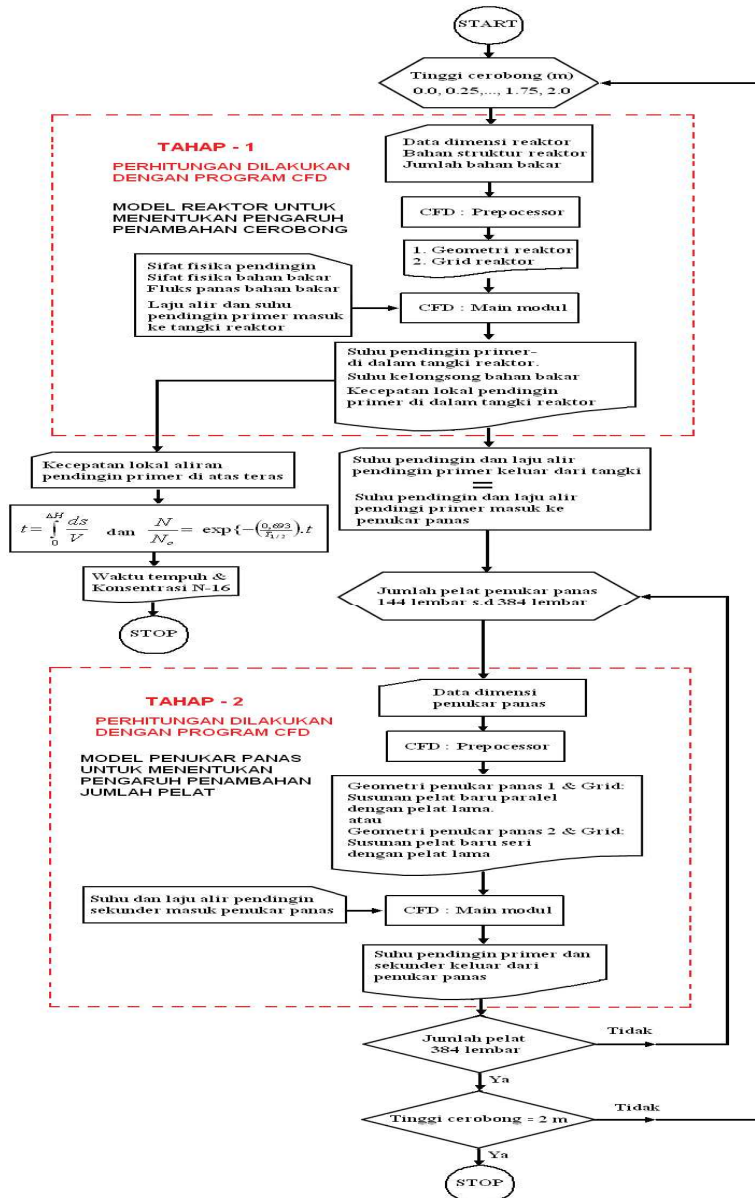


Gambar 1. Diagram sistem pendingin reaktor TRIGA 2000

## METODE, TATA KERJA, DAN KONDISI BATAS

### Metode

Perhitungan dan analisis dilakukan dengan menggunakan paket program *Computational of Fluid Dynamic* (CFD) [7-9]. Program komputer CFD adalah suatu program komputasi untuk mensimulasikan dinamika aliran fluida, perpindahan panas dan fenomena lainnya melalui penyelesaian secara numerik terhadap tiga persamaan dasar Navier-Stokes, yaitu persamaan kontinuitas, persamaan momentum, dan persamaan energi dengan metode volume hingga.



Gambar 2. Tahapan perhitungan yang dilakukan

### Tata Kerja

Mempertimbangkan kemampuan komputer yang dimiliki, maka perlu diambil suatu asumsi perhitungan konservatif yaitu menganggap tangki reaktor dan penukar panas berada dalam suatu loop terbuka. Gambaran loop terbuka ini adalah air pendingin primer dari suatu sumber masuk ke tangki reaktor, kemudian keluar dari tangki reaktor untuk dialirkan ke penukar panas. Selanjutnya air pendingin primer tersebut dari penukar panas dikeluarkan ke lingkungan. Begitu juga dengan air pendingin sekunder dari suatu sumber dialirkan ke penukar panas, dan selanjutnya dari penukar panas dikeluarkan ke lingkungan. Sehingga

perhitungan pengaruh penambahan tinggi cerobong dan penambahan pelat penukar panas dapat dilakukan secara terpisah dalam dua tahap, seperti yang dinyatakan pada diagram alir Gambar 2.

Perhitungan tahap 1 dilakukan untuk menentukan pengaruh penambahan tinggi cerobong. Sebagai data masukannya adalah suhu dan laju alir pendingin primer masuk ke tangki reaktor. Data hasil perhitungan tahap 1 yang diperoleh adalah data konsentrasi N-16 dipermukaan tangki dan data keluaran dari program CFD. Adapun data keluaran program CFD adalah suhu kelongsong bahan bakar di dalam teras, suhu air pendingin primer di dalam teras, suhu air pendingin primer di dalam tangki, suhu air pendingin primer ke luar dari tangki, kecepatan lokal pendingin primer di dalam tangki, dan laju alir pendingin keluar dari tangki.

Perhitungan tahap 2 dilakukan untuk menentukan pengaruh penambahan pelat penukar panas yang disusun seri dan paralel dengan pelat lama. Sebagai data masukannya adalah suhu dan laju alir pendingin primer masuk ke penukar panas yang merupakan suhu dan laju alir pendingin primer keluar dari tangki yang diperoleh dari hasil perhitungan tahap 1, serta suhu dan laju alir pendingin sekunder. Data hasil perhitungan tahap 2 ini merupakan data keluaran dari program CFD, yaitu suhu pendingin primer dan sekunder keluar dari penukar panas. Nilai suhu pendingin primer ini merupakan kesimpulan yang diambil dalam melakukan secara bersamaan penambahan tinggi cerobong dan penambahan pelat penukar panas yang disusun seri dan paralel dengan pelat lama. Dimana dengan mendapatkan tinggi cerobong dan jumlah pelat penukar panas yang optimum akan diperoleh nilai suhu pendingin primer keluar penukar panas minimum. Suhu pendingin primer ini kemudian akan menjadi suhu masukan ke tangki reaktor, sehingga akhirnya menurunkan suhu kelongsong bahan bakar, suhu pendingin primer di dalam teras, dan suhu pendingin primer di dalam tangki.

Pada penelitian terdahulu [2] dianggap reaktor sebagai sebuah sistem loop terbuka dan tidak memiliki penukar panas, dimana air pendingin primer dari suatu sumber masuk ke tangki reaktor, kemudian dari tangki reaktor dikeluarkan ke lingkungan. Kemudian dilakukan analisis pengaruh penambahan tinggi cerobong terhadap penurunan suhu teras reaktor. Sedangkan penelitian yang dilakukan ini adalah menganggap tangki reaktor dan penukar panas berada dalam sebuah sistem loop terbuka, kemudian dianalisis pengaruh penambahan tinggi cerobong dan jumlah pelat penukar panas secara bersamaan terhadap penurunan suhu pendingin primer yang berdampak kepada penurunan suhu teras reaktor.

Langkah awal kajian ini dimulai dengan membuat geometri dan membangun grid model reaktor TRIGA 2000 yang ditinjau menggunakan program CFD. Dalam hal ini dibuat 5 buah geometri dan grid reaktor, masing-masing geometri dan grid reaktor dengan tinggi cerobong 1 m; 1,25 m; 1,50 m; 1,75 m; 2 m.

Selanjutnya dibuat geometri dan grid model penukar panas yang ditinjau menggunakan program CFD. Dalam hal ini dibuat 3 buah geometri dan grid penukar panas, yaitu geometri dan grid penukar panas dengan dengan jumlah pelat 144 lembar, 240 lembar, dan 384 lembar. Untuk penghitungan kondisi penukar panas mula-mula digunakan geometri dan grid penukar panas yang memiliki pelat 144 lembar. Untuk penghitungan pengaruh pelat tambahan yang disusun seri dengan pelat lama digunakan geometri dan grid penukar panas yang memiliki pelat 384 lembar. Sedangkan untuk penghitungan pengaruh pelat tambahan yang disusun paralel dengan pelat lama digunakan 2 geometri dan grid penukar panas, yaitu geometri dan grid penukar panas yang memiliki pelat 144 lembar, dan 240 lembar.

Adapun urutan-urutan perhitungan yang dilakukan adalah:

1. Melakukan perhitungan terhadap model reaktor dengan tinggi cerobong 1 m, penukar panas dengan jumlah pelat 144 lembar, debit pendingin primer 950 gpm, dan debit pendingin sekunder 1200 gpm.

2. Melakukan perhitungan terhadap model reaktor dengan tinggi cerobong 1 m, penukar panas dengan jumlah pelat 144 lembar, debit pendingin primer 950 gpm, dan debit pendingin sekunder 2400 gpm.
3. Melakukan perhitungan terhadap model reaktor dengan tinggi cerobong 1 m, penukar panas dengan jumlah pelat 384 lembar, debit pendingin primer 950 gpm, dan debit pendingin sekunder 1200 gpm, untuk mendapatkan pengaruh penambahan pelat baru yang disusun secara seri dengan pelat lama.
4. Melakukan perhitungan terhadap model reaktor dengan tinggi cerobong 1 m, penukar panas dengan jumlah pelat 384 lembar, debit pendingin primer 950 gpm, dan debit pendingin sekunder 2400 gpm, untuk mendapatkan pengaruh penambahan pelat baru yang disusun secara seri dengan pelat lama.
5. Melakukan perhitungan terhadap model reaktor dengan tinggi cerobong 1 m, dua penukar panas dengan jumlah pelat 144 lembar dan 240 lembar, debit pendingin primer total 950 gpm, dan debit pendingin sekunder total 1200 gpm, untuk mendapatkan pengaruh penambahan pelat baru yang disusun secara paralel dengan pelat lama.
6. Melakukan perhitungan terhadap model reaktor dengan tinggi cerobong 1 m, dua penukar panas dengan jumlah pelat 144 lembar dan 240 lembar, debit pendingin primer total 950 gpm, dan debit pendingin sekunder total 2400 gpm, untuk mendapatkan pengaruh penambahan pelat baru yang disusun secara paralel dengan pelat lama.
7. Untuk mendapatkan pengaruh penambahan tinggi cerobong, maka perhitungan tahap 1 s.d 6 diulangi menggunakan geometri dan grid reaktor dengan tinggi cerobong 1,25 m; 1,50 m; 1,75 m; dan 2 m.

Pada setiap nilai tinggi cerobong yang digunakan dihitung konsentrasi N-16 di permukaan tangki. Konsentrasi N-16 di permukaan tangki dihitung dengan terlebih dahulu menentukan waktu tempuh N-16 mencapai permukaan tangki. Waktu tempuh (t) yang dibutuhkan N-16 untuk mencapai permukaan tangki reaktor, diprediksi dari data-data kecepatan lokal aliran pendingin primer antara permukaan teras dan permukaan tangki hasil keluaran CFD dengan menggunakan persamaan matematik berikut:

$$t = \int_0^{\Delta H} \frac{ds}{V} \quad (1)$$

dimana, t adalah waktu tempuh aliran (detik),  $\Delta H$  adalah jarak antara permukaan teras dengan permukaan tangki reaktor (m), V adalah laju aliran air pendingin lokal, dan ds adalah pertambahan jarak sepanjang garis arus yang dipilih. Adapun nilai konsentrasi N-16 di atas permukaan tangki reaktor dihitung menggunakan persamaan matematik berikut :

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left(-\frac{0,693}{T_{1/2}}\right)t \quad (2)$$

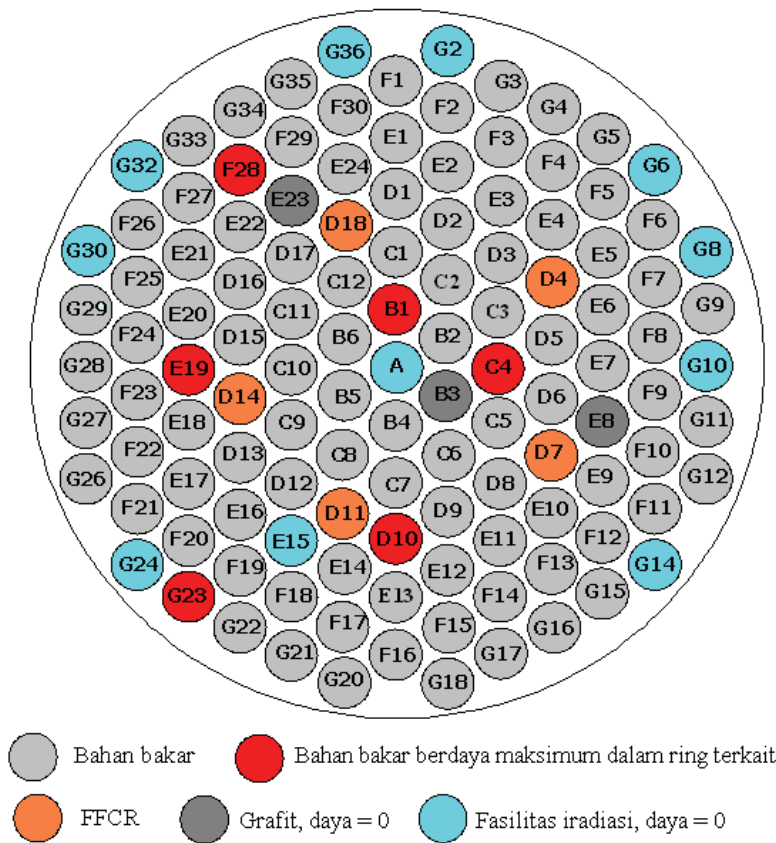
dimana,  $N_0$  adalah konsentrasi N-16 mula-mula, N adalah konsentrasi N-16 setelah menempuh t detik, dan  $T_{1/2}$  adalah waktu paroh N-16 = 7,1 sekon.

### Kondisi Batas

Adapun kondisi batas yang digunakan dalam perhitungan ini adalah daya reaktor 2000 kW dengan 107 bahan bakar di dalam teras, dimana nilai fluks panas untuk setiap bahan bakar dinyatakan pada Tabel 1 [10]. Diasumsikan fluks panas terdistribusi merata sepanjang bahan bakar aktif. Suhu saturasi di dalam teras reaktor 112,4 °C [1], suhu pendingin yang masuk tangki reaktor 32,2 °C dan kecepatan aliran pendingin yang masuk tangki reaktor 950 gpm [11]. Untuk mempertimbangkan kebebasan gerak batang kendali,

proses loading-unloading bahan bakar maupun IFE (*Instrumented Fuel Element*) tinggi cerobong dibatasi 2 m.

Pada perhitungan pengaruh penambahan pelat penukar panas digunakan beberapa kondisi batas lain, yaitu jumlah maksimum pelat penukar panas yang dapat ditambahkan adalah 240 lembar dan ditempatkan secara seri atau paralel dengan 144 lembar pelat lama. Laju alir maksimum pompa primer adalah 950 gpm, laju alir pompa sekunder 1200 gpm dan laju alir pompa sekunder yang dapat ditambahkan hingga 1200 gpm. Suhu air pendingin sekunder yang masuk ke penukar panas 29,0 °C.



Gambar 3. Pola susunan bahan bakar di dalam teras reaktor

Tabel 1. Nilai fluks panas kelongsong bahan bakar untuk 107 bahan bakar yang digunakan

Posisi bahan bakar	Fluks panas (W/m <sup>2</sup> )	Posisi bahan bakar	Fluks panas (W/m <sup>2</sup> )	Posisi bahan bakar	Fluks panas (W/m <sup>2</sup> )	Posisi bahan bakar	Fluks panas (W/m <sup>2</sup> )	Posisi bahan bakar	Fluks panas (W/m <sup>2</sup> )
A	0	B1	749614	B2	708267	B3	0	B4	735087
B5	741792	B6	737546	C1	680777	C2	707507	C3	677648
C4	753861	C5	713408	C6	727265	C7	673625	C8	702456
C9	702680	C10	704244	C11	691505	C12	698880	D1	728829
D2	440292	D3	641888	D4	747603	D5	347987	D6	636748
D7	744250	D8	612386	D9	340165	D10	751849	D11	637865
D12	661109	D13	529021	D14	613727	D15	620432	D16	362068
D17	632054	D18	610151	E1	326532	E2	431352	E3	455490
E4	416154	E5	330555	E6	419730	E7	460631	E8	0
E9	386876	E10	417719	E11	457278	E12	437610	E13	337036
E14	439175	E15	0	E16	571486	E17	333907	E18	425094
E19	659768	E20	416154	E21	345752	E22	382406	E23	0
E24	419283	F1	281385	F2	320721	F3	318709	F4	314016
F5	293454	F6	275574	F7	289431	F8	306193	F9	318933
F10	294348	F11	278703	F12	317592	F13	322732	F14	259258
F15	239367	F16	252553	F17	253447	F18	329213	F19	320273
F20	265963	F21	246296	F22	246296	F23	289431	F24	243614
F25	260152	F26	233556	F27	251659	F28	329660	F29	291889
F30	252777	G2	0	G3	237132	G4	229757	G5	232439
G6	0	G8	0	G9	246519	G10	0	G11	233780
G12	212324	G14	0	G15	242273	G16	225510	G17	235791
G18	216123	G20	190644	G21	209418	G22	219476	G23	254565
G24	0	G26	204501	G27	227075	G28	216794	G29	232886
G30	0	G32	0	G33	198467	G34	197349	G35	217688
G36	0	-	-	-	-	-	-	-	-



Tabel 2. Nilai maksimum parameter termohidrolik hasil penambahan cerobong dan pelat penukar panas

No.	Tinggi cerobong (m)	Debit primer (gpm)	T <sub>Kelongsong bahan bakar</sub> (°C)	T <sub>Primer dalam teras</sub> (°C)	T <sub>Primer out tangki (in-HE)</sub> (°C)	Konsentrasi N-16 (%)	Jumlah pelat HE (lembar)	Debit sekunder (gpm)	T <sub>Sekunder (in- HE)</sub> (°C)	Susunan Pelat HE			
										Seri		Paralel	
										T <sub>Pr-out</sub> (°C)	T <sub>Sk-out</sub> (°C)	T <sub>Pr-out</sub> (°C)	T <sub>Sk-out</sub> (°C)
1	1,0	950	161,73	119,21	42,93	42,43	144	1200	29,0	32,15	37,86	-	-
2	1,0	950	161,73	119,21	42,93	42,43	144	2400	29,0	30,83	33,98	-	-
3	1,0	950	161,73	119,21	42,93	42,43	384	1200	29,0	30,87	38,72	31,23	38,42
4	1,0	950	161,73	119,21	42,93	42,43	384	2400	29,0	29,91	34,48	30,27	34,27
5	1,25	950	159,68	116,89	42,17	44,53	144	1200	29,0	31,94	37,21	-	-
6	1,25	950	159,68	116,89	42,17	44,53	144	2400	29,0	30,79	33,69	-	-
7	1,25	950	159,68	116,89	42,17	44,53	384	1200	29,0	30,81	37,93	31,18	37,87
8	1,25	950	159,68	116,89	42,17	44,53	384	2400	29,0	29,90	34,12	30,14	33,98
9	1,50	950	158,27	115,73	40,89	45,91	144	1200	29,0	31,68	36,62	-	-
10	1,50	950	158,27	115,73	40,89	45,91	144	2400	29,0	30,63	33,47	-	-
11	1,50	950	158,27	115,73	40,89	45,91	384	1200	29,0	30,63	37,32	30,98	36,35
12	1,50	950	158,27	115,73	40,89	45,91	384	2400	29,0	29,88	33,72	30,02	33,64
13	1,75	950	157,12	114,45	40,13	47,23	144	1200	29,0	31,52	35,92	-	-
14	1,75	950	157,12	114,45	40,13	47,23	144	2400	29,0	30,54	33,05	-	-
15	1,75	950	157,12	114,45	40,13	47,23	384	1200	29,0	30,55	36,69	30,84	36,51
16	1,75	950	157,12	114,45	40,13	47,23	384	2400	29,0	29,84	33,38	29,98	33,39
17	2,0	950	156,33	114,02	39,84	49,41	144	1200	29,0	31,40	34,23	-	-
18	2,0	950	156,33	114,02	39,84	49,41	144	2400	29,0	30,48	32,47	-	-
19	2,0	950	156,33	114,02	39,84	49,41	384	1200	29,0	30,48	35,86	30,67	35,89
20	2,0	950	156,33	114,02	39,84	49,41	384	2400	29,0	29,81	32,90	29,92	32,93

Pada kasus 1 dilakukan perhitungan terhadap geometri reaktor yang mempunyai tinggi cerobong 1 m, dengan geometri penukar panas yang mempunyai pelat 144 lembar, dimana data masukan yang digunakan sesuai dengan kondisi reaktor pada saat ini, yaitu: laju alir air pendingin sekunder 1200 gpm, laju alir air pendingin primer 950 gpm, Suhu pendingin primer yang masuk ke teras 32,2 °C, dan suhu pendingin sekunder masuk ke penukar panas 29 °C. Berdasarkan data keluaran CFD diperoleh suhu maksimum kelongsong bahan bakar pada posisi C4 adalah 161,73 °C, suhu pendingin primer di sekitar C4 adalah 119,21 °C, suhu pendingin primer keluar dari tangki adalah 42,93 °C, suhu pendingin primer keluar dari penukar panas adalah 32,15 °C, suhu pendingin sekunder keluar dari penukar panas 37,86 °C. Disamping itu berdasarkan perhitungan analitik menggunakan persamaan 1 dan persamaan 2 terhadap data kecepatan lokal aliran pendingin primer antara permukaan teras dan permukaan tangki diperoleh konsentrasi maksimum N-16 di permukaan tangki adalah 42,43 %. Berdasarkan data keluaran CFD ini, diketahui bahwa terjadi pendidihan (*sub-cooled boiling* atau *saturation boiling*) di dalam teras reaktor, karena suhu maksimum kelongsong bahan bakar dan suhu pendingin primer di teras berada di atas suhu saturasi 112,4 °C. Hal ini tervalidasi dengan kondisi di lapangan ketika reaktor TRIGA 2000

dioperasikan pada daya 2000 kW, terlihat adanya gelembung uap yang keluar dari dalam teras reaktor sebagai tanda telah terjadinya pendidihan.

Pada kasus 2, kondisinya sama dengan kasus 1, tetapi laju alir air pendingin sekunder dinaikkan menjadi 2400 gpm. Data keluaran CFD memberikan nilai suhu maksimum kelongsong bahan bakar pada posisi C4 adalah 161,73 °C, suhu pendingin primer di sekitar C4 adalah 119,21 °C, suhu pendingin primer keluar dari tangki adalah 42,93 °C, suhu pendingin primer keluar dari penukar panas adalah 30,83 °C, dan suhu pendingin sekunder keluar dari penukar panas 33,98 °C. Berdasarkan analisis yang dilakukan terhadap kasus 1 dan kasus 2 diketahui bahwa, dengan menaikkan laju alir pendingin sekunder menjadi 2400 gpm, terjadi penurunan suhu pendingin primer keluar dari penukar panas sebesar 1,32 °C.

Pada Kasus 3, kondisinya sama dengan kasus 1, tetapi menggunakan geometri penukar panas dengan jumlah pelat 384 lembar yang terdiri dari 240 lembar pelat baru disusun seri dengan 144 lembar pelat lama. Berdasarkan hasil perhitungan CFD diperoleh suhu pendingin primer keluar dari penukar panas menjadi 30,87 °C. Tetapi ketika digunakan dua geometri penukar panas dengan jumlah total pelat 384 lembar, yang terdiri dari sebuah penukar panas baru dengan 240 lembar pelat dan disusun paralel dengan penukar panas lama dengan 144 lembar pelat, dari hasil perhitungan CFD diperoleh suhu pendingin primer keluar dari penukar panas menjadi 31,23 °C. Berdasarkan analisis yang dilakukan terhadap kasus 1 dan kasus 3 diketahui bahwa, dengan menambah jumlah pelat penukar panas menjadi 384 lembar, terjadi penurunan suhu pendingin primer keluar dari penukar panas sebesar 1,28 °C – 0,92 °C.

Pada kasus 4, ketika dilakukan perhitungan terhadap geometri reaktor yang mempunyai tinggi cerobong 1 m, dengan geometri penukar panas yang mempunyai jumlah pelat 384 lembar, terdiri dari 240 lembar pelat baru disusun seri dengan 144 lembar pelat lama. Sedangkan data masukan yang digunakan adalah laju alir air pendingin sekunder 2400 gpm, laju alir air pendingin primer 950 gpm, suhu pendingin primer masuk ke teras 32,2 °C, dan suhu pendingin sekunder masuk ke penukar panas 29 °C. Berdasarkan hasil perhitungan CFD didapat suhu pendingin primer keluar dari penukar panas menjadi 29,91°C. Jika pendingin primer dengan suhu 29,91 °C ini dijadikan kondisi masukan pendingin primer ke teras reaktor, tentunya akan memberikan penurunan terhadap suhu maksimum kelongsong bahan bakar, dan suhu pendingin primer di teras, sehingga akan mengurangi pendidihan di dalam teras reaktor.

Untuk kondisi yang sama dengan kasus 4, tetapi menggunakan dua geometri penukar panas dengan jumlah total pelat 384 lembar, terdiri dari penukar panas baru dengan 240 lembar pelat yang disusun paralel dengan penukar panas lama dengan 144 lembar pelat. Hasil perhitungan CFD diperoleh suhu pendingin primer keluar dari penukar panas menjadi 30,27 °C.

Pada kasus 5, ketika dilakukan perhitungan terhadap geometri reaktor yang mempunyai tinggi cerobong 1,25 m, dengan geometri penukar panas yang mempunyai pelat 144 lembar, dimana data masukan yang digunakan sesuai dengan kondisi reaktor pada saat ini, yaitu: laju alir air pendingin sekunder 1200 gpm, laju alir air pendingin primer 950 gpm, Suhu pendingin primer yang masuk ke teras 32,2 °C, dan suhu pendingin sekunder masuk ke penukar panas 29 °C. Berdasar hasil perhitungan CFD diperoleh suhu maksimum kelongsong bahan bakar pada posisi C4 adalah 159,68 °C, suhu pendingin primer di sekitar C4 adalah 116,89 °C, suhu pendingin primer keluar dari tangki adalah 42,17 °C, suhu pendingin primer keluar dari penukar panas adalah 31,94 °C, suhu pendingin sekunder keluar dari penukar panas 37,21 °C. Hasil perhitungan analitik menggunakan persamaan 1 dan persamaan 2 terhadap data kecepatan lokal aliran pendingin primer antara permukaan teras dan permukaan tangki diperoleh konsentrasi maksimum N-16 di permukaan tangki adalah

44,53 %. Berdasarkan analisis yang dilakukan terhadap kasus 1 dan kasus 5 diketahui bahwa, dengan menambahkan tinggi cerobong teras menjadi 1,25 m, terjadi penurunan suhu pendingin primer keluar dari penukar panas sebesar 0,21 °C, tetapi akan menaikkan konsentrasi N-16 di permukaan tangki sebesar 2,1%. Jika dibandingkan dengan kasus 2, kasus 3, dan kasus 4, maka untuk menurunkan suhu pendingin primer keluar dari penukar panas dengan menambahkan tinggi cerobong teras seperti yang dilakukan pada kasus 5 adalah tidak efektif, karena penurunan suhu yang diperoleh lebih kecil, menaikkan konsentrasi N-16 di permukaan tangki sebesar 2,1%, dan biaya konstruksinya mahal.

Pada kasus 20, perhitungan terhadap geometri reaktor yang mempunyai tinggi cerobong 2 m, dengan geometri penukar panas yang mempunyai jumlah pelat 384 lembar, terdiri dari 240 lembar pelat baru disusun seri dengan 144 lembar pelat lama. Sedangkan data masukan yang digunakan adalah laju alir air pendingin sekunder 2400 gpm, laju alir air pendingin primer 950 gpm, suhu pendingin primer masuk ke teras 32,2 °C, dan suhu pendingin sekunder masuk ke penukar panas 29 °C. Hasil perhitungan CFD diperoleh suhu pendingin primer keluar dari penukar panas menjadi 29,81 °C, dan hasil perhitungan analitik diperoleh konsentrasi maksimum N-16 di permukaan tangki adalah 49,41 %. Jika pendingin primer dengan suhu 29,81 °C ini dijadikan kondisi masukan pendingin primer ke teras reaktor, tentunya akan memberikan penurunan terhadap suhu maksimum kelongsong bahan bakar pada posisi C4, dan suhu pendingin primer di sekitar C4, sehingga akan mengurangi pendidihan di dalam teras reaktor. Meskipun penambahan tinggi cerobong teras menjadi 2 m akan menaikkan konsentrasi N-16 di permukaan tangki menjadi 49,41 %.

Untuk kondisi yang sama dengan kasus 20, tetapi menggunakan dua geometri penukar panas dengan jumlah total pelat 384 lembar, terdiri dari penukar panas baru dengan 240 lembar pelat yang disusun paralel dengan penukar panas lama dengan 144 lembar pelat. Hasil perhitungan CFD diperoleh suhu pendingin primer keluar dari penukar panas menjadi 29,92 °C.

Kasus 1, 5, 9, 13, dan 17 merupakan kasus-kasus yang telah dibahas pada penelitian sebelumnya [2] meskipun terdapat beberapa perbedaan, yaitu jumlah bahan bakar yang digunakan, dimana pada penelitian terdahulu menggunakan konfigurasi teras asli dengan 116 bahan bakar, sedangkan pada penelitian ini menggunakan konfigurasi teras aktual dengan 107 bahan bakar.

Guna memperoleh gambaran tentang pilihan yang terbaik terhadap cara menurunkan suhu pendingin primer, antara menambahkan tinggi cerobong teras [2] dengan menambahkan tinggi cerobong teras dan jumlah pelat penukar panas secara bersamaan, dianalisis melalui kasus 1, 17, dan 19. Hasil perhitungan pada kasus 1 diperoleh suhu maksimum kelongsong bahan bakar serta suhu pendingin primer di dalam teras tinggi, dan perlu diturunkan. Hal ini dapat dilakukan dengan menurunkan suhu pendingin primer yang masuk ke tangki reaktor, dengan kata lain perlu menurunkan suhu pendingin primer yang keluar dari penukar panas. Berdasarkan kasus 17, pengurangan suhu pendingin primer keluar dari penukar panas yang dilakukan dengan cara menambahkan tinggi cerobong teras menjadi 2 m, diperoleh pengurangan suhu pendingin primer keluar penukar panas menjadi 31,40 °C. Sedangkan berdasarkan kasus 19, pengurangan suhu pendingin primer keluar penukar panas yang dilakukan dengan menambahkan tinggi cerobong teras menjadi 2 m, dan jumlah pelat penukar panas menjadi 384 lembar secara bersamaan, diperoleh pengurangan suhu pendingin primer keluar penukar panas menjadi 30,48 °C. Berdasarkan hal ini dapat dikatakan bahwa penurunan suhu pendingin primer keluar penukar panas lebih baik dilakukan dengan cara menambahkan tinggi cerobong teras dan jumlah pelat penukar panas secara bersamaan, dibandingkan jika dilakukan dengan menambah tinggi cerobong saja, seperti penelitian terdahulu [2].

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian perolehan suhu air pendingin primer reaktor TRIGA 2000 ketika dilakukan penambahan tinggi cerobong dan jumlah pelat penukar panas akan menurunkan suhu pendingin primer dengan cara menambahkan tinggi cerobong teras reaktor dan jumlah pelat penukar panas secara bersamaan memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan cara menambahkan tinggi cerobong saja. Dengan menambah tinggi cerobong menjadi 2 m, laju alir pendingin primer 950 gpm, dan laju alir pendingin sekunder menjadi 1200 gpm, diperoleh suhu pendingin primer yang ke luar dari penukar panas atau suhu pendingin primer yang masuk ke teras reaktor menjadi 31,40 °C. Dengan menambah tinggi cerobong menjadi 2 m, pelat penukar panas menjadi 384 lembar, laju alir pendingin primer 950 gpm, dan laju alir pendingin sekunder menjadi 1200 gpm, diperoleh suhu pendingin primer yang ke luar dari penukar panas atau suhu pendingin primer yang masuk ke teras reaktor menjadi 30,48 °C.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Anonymous. SAR for Upgrade of TRIGA Mark II Reactor. San Diego: General Atomic; 1996.
2. Nazar Reinaldy. Efek cerobong terhadap parameter termohidrolik teras dan konsentrasi N-16 pada reaktor TRIGA 2000 Bandung. Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega 2009 Oktober; 11(3)139-152.
3. Auletta A, Manca O, Morrone B and Naso V. Heat transfer enhancement by the chimney effect in a vertical isoflux channel. International Journal of Heat and Mass Transfer 2001; 44: 4345 – 4357.
4. Oosthuizen PP. A numerical study of laminar free convective flow through a vertical open partially heated plane duct. ASME HTD 32 1984; 41-48.
5. El-Wakil MM. Nuclear heat transport. The American Nuclear Society. Illinois. LaGrange Park; 1998.
6. Hewit GF, Shires GL, Bott TR. Process heat transfer. Madison Avenue New York. Begell House Inc; 2000; 327 – 362.
7. Versteeg HK, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics: The Finite Volume Method. England. Longman Scientific & Technical; 2003.
8. ANDERSON JD. Computational fluid dynamics: The basic with applications. Singapore. Mc Graw-Hill; 2003.
9. Tuakia Firman. Dasar-dasar menggunakan CFD FLUENT. Bandung: Bandung Informatika; 2008.
10. Ilham P. Total power in fuel element. Technical Report. Bandung: BATAN; 2005
11. Pusat Teknologi nuklir Bahan dan Radiometri. Laporan analisis keselamatan reaktor TRIGA 2000 Bandung. Bandung: Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri; 2006. LP-06 RE-001. Revisi 3