

STUDI EFEK CEROBONG PADA MODEL PENDINGIN PRIMER REAKTOR

Endiah Puji Hastuti
Pusat Reaktor Serba Guna - BATAN

Abstrak

Pendinginan konveksi bebas dengan menggunakan cerobong merupakan salah satu konsep keselamatan melekat. Pada proses perpindahan panas konveksi bebas, gerakan fluida disebabkan oleh adanya perbedaan temperatur. Dalam penelitian ini dilakukan eksperimen untuk mempelajari efek cerobong pada model pendingin primer reaktor. Penelitian dilakukan dengan membuat sebuah model sistem perpindahan panas di dalam reaktor, dengan pemanas listrik sebagai pengganti bahan bakar nuklir. Efek cerobong diamati dengan menambah ketinggian tangki eksperimen. Hasil eksperimen kemudian dievaluasi dengan menggunakan bantuan paket program NATCON yang dimodifikasi.

Abstract

Free convection cooling by using chimney as a one of passive safety concept. In the free convection process, movement of the fluida are caused by temperature difference. Research was done by making experimental to get the chimney effect study of the primary coolant reactor model. The experimental model was done by making a vertically cylindrical electrical heater, as a fuel element. Chimney effect are monitoring by adding the higher experimental tank. The calculation model was carried out by using a modified NATCON computer program.

PENDAHULUAN

Studi pemanfaatan energi nuklir pada saat ini mengarah pada peningkatan keandalan dan keselamatan. Selain itu pengembangan juga ditujukan untuk meningkatkan kemudahan operasi, perawatan, menurunkan investasi awal, menekan biaya operasi, memperpendek waktu konstruksi dan memperkecil produksi limbah radioaktif.

Untuk memenuhi tujuan tersebut lahir konsep keselamatan nuklir terakhir yang disebut konsep keselamatan pasif, salah satu caranya adalah dengan pemanfaatan fenomena alam. Fenomena efek *chimney* (cerobong) yang diterapkan pada sistem pendingin primer reaktor untuk menghilangkan panas secara konveksi bebas, menjadi model di dalam penelitian ini. Penelitian ini dilakukan dengan membuat sebuah model sistem perpindahan panas dalam reaktor dengan pemanas listrik sebagai pengganti bahan bakar. Pengaruh

adanya efek cerobong diamati dengan menambah ketinggian tangki eksperimen. Hasil eksperimen kemudian dievaluasi dengan menggunakan bantuan paket program NATCON.

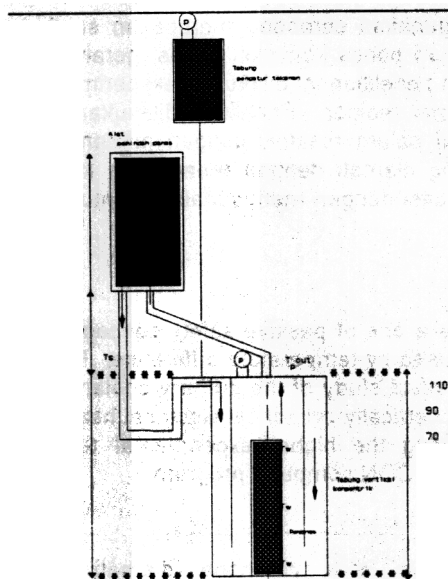
Di dalam penelitian ini dilakukan pengamatan karakteristik perpindahan panas pendingin primer sebagai fungsi daya dengan fluida yang dipertahankan pada kondisi fase tunggal. Selain itu juga dilakukan pengamatan temperatur pendingin primer yang diakibatkan oleh adanya pengaruh penambahan ketinggian cerobong pada pendinginan teras reaktor, variasi tinggi cerobong yang digunakan adalah 10 cm, 30 cm dan 50 cm.

TEORI

Diskripsi Perpindahan Panas Pada Model Pendingin Primer Reaktor

Perpindahan panas dari teras reaktor ke sistem pendingin primer yang

terjadi secara konveksi bebas dimodelkan dengan perpindahan panas yang terjadi antara dua silinder koaksial (konsentris) vertikal. Model perpindahan panas pada geometri seperti ini digambarkan secara skematis seperti yang terlihat pada gambar 1.



Gambar 1 : Rangkaian alat eksperimen.

Gradien temperatur antara fluida dingin yang berasal dari alat penukar panas dan fluida panas dari teras reaktor terjadi akibat adanya gradien rapat massa sehingga terjadi aliran konveksi bebas.

Efek Cerobong

Yang dimaksud dengan cerobong pada model pendingin primer reaktor ini adalah ruang vertikal berisi air pendingin di atas teras reaktor. Mekanisme pengambilan panas dipengaruhi oleh ketinggian ruang vertikal yang berisi air pendingin tersebut. Untuk memperoleh hasil pengambilan panas yang baik perlu dilakukan pemilihan dimensi cerobong. Pemilihan dimensi cerobong ini dimaksudkan agar daya angkat akibat adanya gradien temperatur yang dibutuhkan

oleh aliran fluida panas untuk keluar dari unit pemanas, mencukupi.

METODE EKSPERIMEN

Dalam rancangan pemanas sebagai model bahan bakar, dianggap bahwa seluruh bahan bakar di dalam teras reaktor diwakili oleh sebuah pemanas. Untuk mengatur besarnya daya pemanas dilakukan dengan cara mengatur besarnya arus /tegangan melalui regulator dengan daerah kerja dari 0 sampai 250 volt. Model kelongsong bahan bakar terbuat dari SS 304 berbentuk silinder dengan diameter 31,75 mm, tebal 1 mm dan panjang 600 mm dengan bahan filamen pemanas dari jenis nickel chromium. Model bahan bakar ini didinginkan oleh sistem pendingin primer. Eksperimen dilakukan dengan langkah kerja dan pengamatan sebagai berikut : Setelah rangkaian eksperimen telah tersusun seperti Gambar 1, pemanas dihidupkan kemudian data dicatat apabila kondisi tunak telah tercapai. Eksperimen diulangi untuk tingkat daya yang lain. Untuk melihat adanya efek cerobong pada laju perpindahan panas maka eksperimen dilakukan dengan menambah ketinggian tangki koaksial, selanjutnya langkah eksperimen untuk kenaikan daya diulangi.

Diskripsi Paket Program NATCON

Paket program NATCON digunakan untuk menganalisis termohidraulika plat bahan bakar dan kanal tunggal reaktor yang dioperasikan pada kondisi tunak ("steady state"). Korelasi yang digunakan di dalam NATCON diselesaikan secara iteratif untuk mendapatkan laju alir pendingin, distribusi temperatur pendingin dan bahan bakar sebagai fungsi posisi aksial bahan bakar serta fluks panas pada saat terjadi kondisi awal pendidihan inti ("ONB").

STUDI EFEK CEROBONG PADA MODEL PENDINGIN PRIMER REAKTOR

Endiah Puji Hastuti
Pusat Reaktor Serba Guna - BATAN

Abstrak

Pendinginan konveksi bebas dengan menggunakan cerobong merupakan salah satu konsep keselamatan melekat. Pada proses perpindahan panas konveksi bebas, gerakan fluida disebabkan oleh adanya perbedaan temperatur. Dalam penelitian ini dilakukan eksperimen untuk mempelajari efek cerobong pada model pendingin primer reaktor. Penelitian dilakukan dengan membuat sebuah model sistem perpindahan panas di dalam reaktor, dengan pemanas listrik sebagai pengganti bahan bakar nuklir. Efek cerobong diamati dengan menambah ketinggian tangki eksperimen. Hasil eksperimen kemudian dievaluasi dengan menggunakan bantuan paket program NATCON yang dimodifikasi.

Abstract

Free convection cooling by using chimney as a one of passive safety concept. In the free convection process, movement of the fluida are caused by temperature difference. Research was done by making experimental to get the chimney effect study of the primary coolant reactor model. The experimental model was done by making a vertically cylindrical electrical heater, as a fuel element. Chimney effect are monitoring by adding the higher experimental tank. The calculation model was carried out by using a modified NATCON computer program.

PENDAHULUAN

Studi pemanfaatan energi nuklir pada saat ini mengarah pada peningkatan keandalan dan keselamatan. Selain itu pengembangan juga ditujukan untuk meningkatkan kemudahan operasi, perawatan, menurunkan investasi awal, menekan biaya operasi, memperpendek waktu konstruksi dan memperkecil produksi limbah radioaktif.

Untuk memenuhi tujuan tersebut lahir konsep keselamatan nuklir terakhir yang disebut konsep keselamatan pasif, salah satu caranya adalah dengan pemanfaatan fenomena alam. Fenomena efek *chimney* (cerobong) yang diterapkan pada sistem pendingin primer reaktor untuk menghilangkan panas secara konveksi bebas, menjadi model di dalam penelitian ini. Penelitian ini dilakukan dengan membuat sebuah model sistem perpindahan panas dalam reaktor dengan pemanas listrik sebagai pengganti bahan bakar. Pengaruh

adanya efek cerobong diamati dengan menambah ketinggian tangki eksperimen. Hasil eksperimen kemudian dievaluasi dengan menggunakan bantuan paket program NATCON.

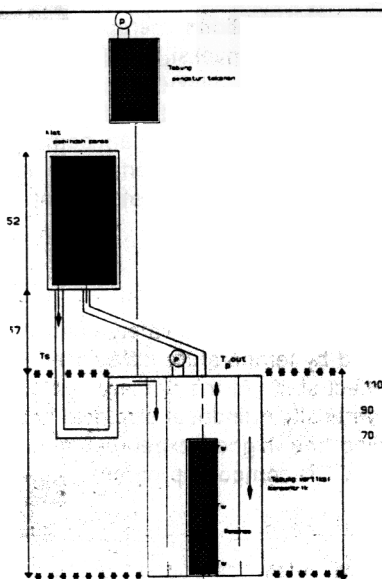
Di dalam penelitian ini dilakukan pengamatan karakteristik perpindahan panas pendingin primer sebagai fungsi daya dengan fluida yang dipertahankan pada kondisi fase tunggal. Selain itu juga dilakukan pengamatan temperatur pendingin primer yang diakibatkan oleh adanya pengaruh penambahan ketinggian cerobong pada pendinginan teras reaktor, variasi tinggi cerobong yang digunakan adalah 10 cm, 30 cm dan 50 cm.

TEORI

Diskripsi Perpindahan Panas Pada Model Pendingin Primer Reaktor

Perpindahan panas dari teras reaktor ke sistem pendingin primer yang

terjadi secara konveksi bebas dimodelkan dengan perpindahan panas yang terjadi antara dua silinder koaksial (konsentris) vertikal. Model perpindahan panas pada geometri seperti ini digambarkan secara skematis seperti yang terlihat pada gambar 1.



Gambar 1 Rangkaian alat eksperimen.

Gradien temperatur antara fluida dingin yang berasal dari alat penukar panas dan fluida panas dari teras reaktor terjadi akibat adanya gradien rapat massa sehingga terjadi aliran konveksi bebas.

Efek Cerobong

Yang dimaksud dengan cerobong pada model pendingin primer reaktor ini adalah ruang vertikal berisi air pendingin di atas teras reaktor. Mekanisme pengambilan panas dipengaruhi oleh ketinggian ruang vertikal yang berisi air pendingin tersebut. Untuk memperoleh hasil pengambilan panas yang baik perlu dilakukan pemilihan dimensi cerobong. Pemilihan dimensi cerobong ini dimaksudkan agar daya angkat akibat adanya gradien temperatur yang dibutuhkan

oleh aliran fluida panas untuk keluar dari unit pemanas, mencukupi.

METODE EKSPERIMEN

Dalam rancangan pemanas sebagai model bahan bakar, dianggap bahwa seluruh bahan bakar di dalam teras reaktor diwakili oleh sebuah pemanas. Untuk mengatur besarnya daya pemanas dilakukan dengan cara mengatur besarnya arus /tegangan melalui regulator dengan daerah kerja dari 0 sampai 250 volt. Model kelongsong bahan bakar terbuat dari SS 304 berbentuk silinder dengan diameter 31,75 mm, tebal 1 mm dan panjang 600 mm dengan bahan filamen pemanas dari jenis nickel chromium. Model bahan bakar ini didinginkan oleh sistem pendingin primer. Eksperimen dilakukan dengan langkah kerja dan pengamatan sebagai berikut : Setelah rangkaian eksperimen telah tersusun seperti Gambar 1, pemanas dihidupkan kemudian data dicatat apabila kondisi tunak telah tercapai. Eksperimen diulangi untuk tingkat daya yang lain. Untuk melihat adanya efek cerobong pada laju perpindahan panas maka eksperimen dilakukan dengan menambah ketinggian tangki koaksial, selanjutnya langkah eksperimen untuk kenaikan daya diulangi.

Diskripsi Paket Program NATCON

Paket program NATCON digunakan untuk menganalisis termohidraulika plat bahan bakar dan kanal tunggal reaktor yang dioperasikan pada kondisi tunak ("steady state"). Korelasi yang digunakan di dalam NATCON diselesaikan secara iteratif untuk mendapatkan laju alir pendingin, distribusi temperatur pendingin dan bahan bakar sebagai fungsi posisi aksial bahan bakar serta fluks panas pada saat terjadi kondisi awal pendidihan inti ("ONB").

Paket program NATCON yang asli tidak dapat langsung digunakan dalam analisis eksperimen ini karena keterbatasannya, yaitu, hanya untuk kanal pendingin dan bahan bakar berbentuk plat. Di dalam eksperimen ini, selain model bahan bakar berbentuk silinder, juga mencakup sistem pendingin primer. Agar program perhitungan NATCON dapat menganalisis eksperimen ini, maka dilakukan modifikasi dalam paket program yaitu penambahan perhitungan hilang tekan (*pressure drop*) akibat adanya kalang pendingin dan beberapa persamaan agar program mampu menghitung parameter termohidraulik dari model yang diamati.

Modifikasi program dilakukan dengan melakukan perubahan beberapa persamaan untuk silinder vertikal berbentuk anulus. Perubahan subrutin dilakukan dengan memasukkan data yang diperoleh dari eksperimen untuk menghitung bilangan Nusselt dan konstanta faktor *entrance* untuk bentuk saluran anulus. Input program kemudian disesuaikan dengan perubahan

Untuk menganalisis perpindahan panas model bahan bakar di atas, digunakan persamaan-persamaan yang perpindahan panas konveksi bebas yang dimasukkan ke dalam paket program. Harga kecepatan alir diperoleh apabila gaya apung, F_B , dapat mengatasi gaya gesek, F_f , yaitu :

$$F_B/A_C = F_f/A_C \quad (1)$$

Besarnya gaya apung diformulasikan dengan persamaan

$$F_B = (\rho_C - \rho_{in}) A_C L_C g_C \quad (2)$$

dengan :

ρ_C = rapat massa rerata sepanjang kanal,

ρ_{in} = rapat massa di sisi masuk kanal

A_C = luas tampang lintang kanal pendingin

L_C = panjang kanal pendingin

Besarnya gaya gesek diformulasikan dengan menggunakan persamaan :

$$F_f = \frac{(\rho V_{in})^2}{2g} A_c \left[\frac{1}{2\rho_{in}} + \sum_{i=1}^n \frac{f \Delta z_i}{\rho_i D_H} + \frac{1}{\rho_{out}} \right] + H \quad (3)$$

dengan :

ρ = rapat massa pendingin pada node pengamatan

V = kecepatan aliran fluida pendingin

g = percepatan gravitasi

f = faktor gesekan

D_{z_i} = jarak tetap node pada kanal pendingin

ρ_i = rapat massa pendingin pada node

D_H = diameter hidraulik kanal pendingin

ρ_{out} = rapat massa pendingin keluar kanal

H_L = hilang tekan di dalam pipa

Suku pertama dan ketiga didalam kurung menyatakan besarnya tahanan aliran pada sisi masuk dan sisi keluar kalang, suku ke dua adalah besarnya tahanan aliran di sepanjang kanal pendingin. H_L adalah besarnya kehilangan tekanan yang terjadi di sepanjang pipa. Besarnya H_L ini dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$H_L = \frac{\rho v^2}{g} A_p \left[\sum k_i + f \frac{l_i}{2D_i} \right] \quad (4)$$

dengan :

$\sum k_i$ = harga rerugi karena pengecilan dan pembesaran pipa

Σ_f = gaya gesek di sepanjang kalang

l_i = panjang pipa ke i

D_i = diameter pipa ke i

A_p = luas tampang lintang pipa

Besarnya driving pressure yang terjadi akibat adanya cerobong diformulasikan dengan menggunakan persamaan:

$$P_d = (\rho_{in} - \rho_{out})H_c(g/g_c) \quad (5)$$

dimana :

- ρ_{in} = rapat massa di sisi masuk kanal
- ρ_{out} = rapat massa di sisi keluar kanal
- H_c = tinggi cerobong
- g = percepatan gravitasi
- g_c = faktor konversi dimensional

Untuk memperoleh harga kecepatan aliran ini dipilih suatu harga tebakkan tertentu kemudian diiterasi. Bila kecepatan awal ini diketahui, maka besarnya koefisien perpindahan panas konveksi (h), temperatur fluida pendingin dan temperatur kelongsong bahan bakar dapat dihitung. Sedangkan temperatur dinding dimana awal pendidihan inti terjadi diformulasikan dengan menggunakan korelasi Bergles Rohsenow untuk kasus pendidihan kolam dengan konveksi alamiah pada aliran satu fase, yaitu:

$$(q/A)_{ONB} = 15,60 p^{1,156} (T_w - T_s)^{(2,30/p^{0,0234})} \quad (6)$$

dengan :

- p = tekanan fluida pendingin
- T_w = temperatur dinding pemanas
- T_s = temperatur jenuh fluida pendingin

Subrutin yang digunakan di dalam program NATCON ada tiga buah yaitu:

1. Subrutin WATER digunakan untuk menghitung sifat-sifat air (rapat massa air, viskositas dinamik, panas spesifik dan konduktivitas air) pada temperatur tertentu.
2. Subrutin FFCON digunakan untuk

menghitung harga konstanta faktor gesekan dan harga bilangan Nusselt.

3. Subrutin WTSAT digunakan untuk menghitung temperatur jenuh air pada tekanan tertentu.

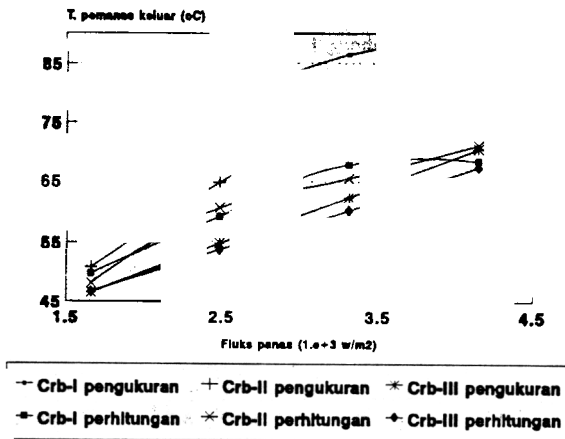
Sebagai data masukan diperlukan data geometri yang meliputi ukuran kanal, bahan bakar dan sistem pemipaan, faktor-faktor kanal terpanas, distribusi fluks aksial dan temperatur fluida pendingin masukan. Data sifat fisik air dihitung di dalam subrutin yang ada.

HASIL DAN PEMBAHASAN

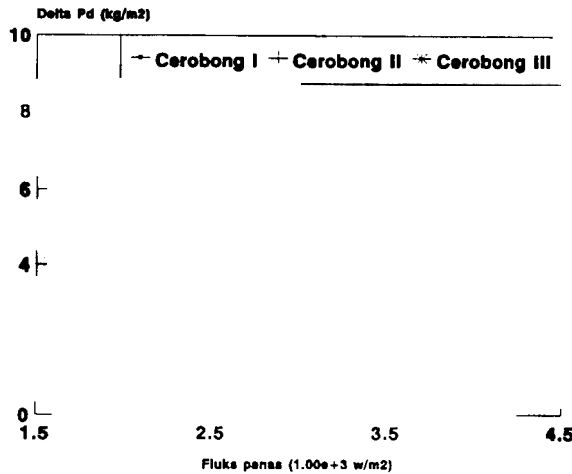
Hasil pengukuran temperatur untuk masing-masing cerobong dengan tingkat daya 100 watt sampai dengan 250 watt dapat dilihat pada Tabel 1 s/d 3 sedangkan hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4 s/d 6.

Dalam analisis hasil akan dibandingkan hasil-hasil perhitungan dengan masukan data hasil penelitian dan hasil eksperimen itu sendiri. Data yang dapat dibandingkan adalah temperatur pendingin keluar (temperatur pendingin masuk digunakan sebagai input), temperatur pemanas dan laju alir.

Gambar 2 menggambarkan temperatur fluida pendingin sebagai fungsi fluks panas. Gambar tersebut membandingkan temperatur pendingin keluar antara hasil eksperimen dan perhitungan, grafik tersebut menunjukkan bahwa hasil perhitungan lebih rendah harganya dibanding hasil eksperimen hal ini disebabkan karena dalam perhitungan menggunakan asumsi fluks panas merata sedangkan di dalam eksperimen kemungkinan tidak demikian, tetapi keduanya menunjukkan kecenderungan yang sama.



Gambar 2 Grafik temperatur pendingin keluar hasil pengukuran dan perhitungan.

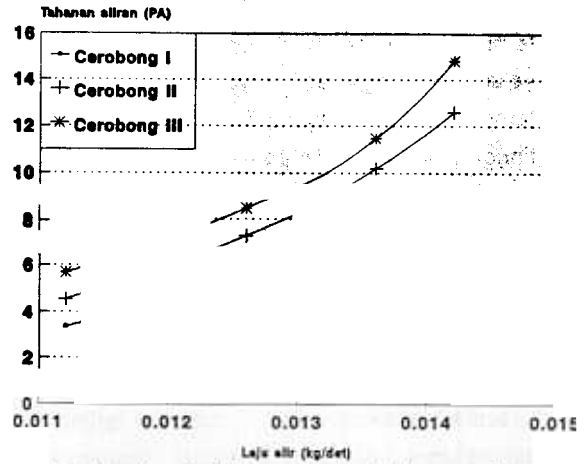


Gambar 3: Grafik *driving pressure* sebagai fungsi fluks.

Adanya penambahan cerobong akan membantu menaikkan *driving pressure* pada perpindahan panas dengan konveksi bebas. Gambar 3 memperlihatkan besarnya *driving pressure* sebagai fungsi fluks panas dengan berbagai tinggi cerobong. *Driving pressure* bertambah dengan adanya penambahan tinggi cerobong dan meningkatnya daya. Hal ini terjadi karena beda temperatur yang mengakibatkan beda rapat massa bertambah sebagai fungsi fluks, sesuai dengan persamaan (5).

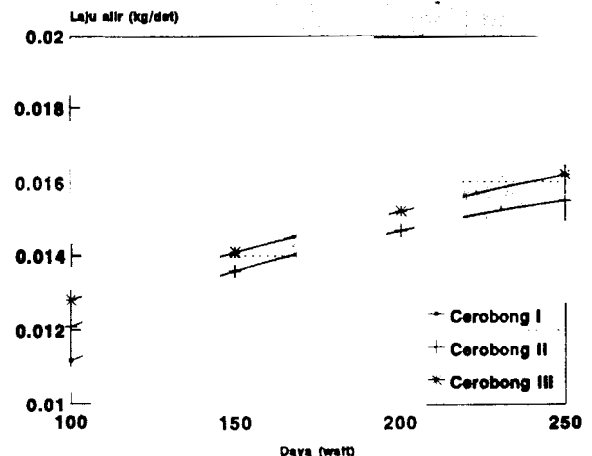
Pengaruh tahanan aliran terhadap laju alir massa pendingin pada berbagai ketinggian cerobong dari hasil perhitungan,

dapat dijelaskan dari Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4: Grafik pengaruh tahanan aliran terhadap Laju alir pendingin.

Temperatur pemanas yang semakin tinggi menyebabkan energi yang terakumulasi pada lapisan dekat permukaan pemanas semakin besar sehingga laju perpindahan air pendingin juga semakin cepat. Di lain pihak laju alir pendingin yang semakin besar mengakibatkan tahanan aliran pendingin (friksi) semakin besar pula. Besarnya laju alir meningkat dengan bertambahnya tinggi cerobong, sehingga friksi juga semakin besar. Hasil Laju alir pendingin yang diperoleh dari hasil perhitungan menunjukkan adanya peningkatan dengan daya yang semakin tinggi seperti yang terlihat pada Gambar 5.

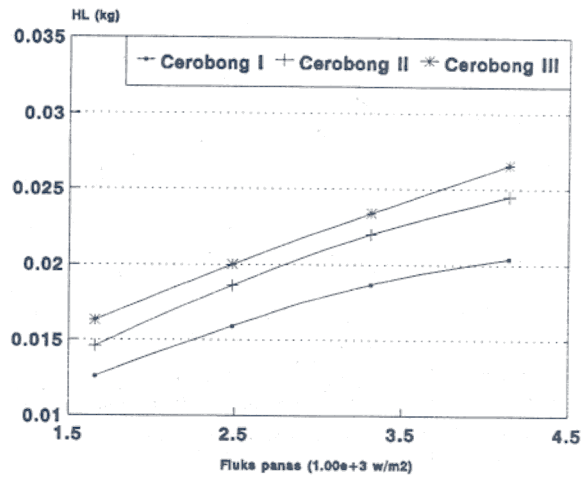


Gambar 5 Grafik laju alir sebagai fungsi daya.

Hal ini berkaitan dengan jumlah panas yang dilepaskan ke air pendingin dan beda temperatur air pendingin primer masuk dan keluar. Peningkatan daya menyebabkan temperatur air pendingin primer semakin tinggi. Tingginya temperatur ini menaikkan *driving force* yang akhirnya menaikkan laju alir pendingin. Pada pemanasan dengan menggunakan tinggi cerobong III laju alir pendingin juga meningkat apabila dibandingkan dengan tinggi cerobong I dan II. Apabila laju alir dari ketiga cerobong tersebut dibandingkan, maka terlihat peningkatan dengan semakin tingginya cerobong.

Gambar 6 memperlihatkan besarnya rerugi tekanan sepanjang pipa yang terjadi sebagai fungsi fluks pada berbagai ketinggian cerobong. Rerugi tekanan tidak hanya terjadi akibat adanya pembesaran/pengecilan pipa serta belokan-belokan saja, akan tetapi juga terjadi sebagai fungsi kecepatan alir pendingin dan rapat massa air yang masuk ke sisi masukan pipa (*hot leg*) sehingga rerugi tekanan ini bertambah apabila temperatur fluida panas meningkat.

Dari pembahasan di atas terlihat bahwa faktor penambahan tinggi cerobong akan meningkatkan kemampuan perpindahan panas konveksi bebas yang terjadi pada sistem pendingin primer, akan tetapi pemilihan tinggi optimum perlu diteliti lebih lanjut. Penambahan tinggi cerobong yang tak terbatas bukanlah pilihan yang baik sebab selain meningkatkan biaya konstruksi juga akan menyebabkan kesulitan pada saat *loading* bahan bakar dan mekanisme gerakan batang kendali.



Gambar 6 : Grafik rerugi tekanan pada berbagai tinggi cerobong.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan untuk mempelajari efek cerobong pada model pendingin primer reaktor dengan mengabaikan perbandingan dimensi D (diameter) dan H (tinggi), diperoleh beberapa kesimpulan, yaitu :

1. Laju alir fluida pendingin naik sebagai fungsi daya dan bertambah sebagai fungsi ketinggian cerobong.
2. Besarnya tahanan aliran naik sebagai fungsi ketinggian cerobong.
3. Adanya cerobong menaikkan *driving force* air pendingin primer, tetapi tinggi cerobong yang efektif untuk meningkatkan kemampuan menyerap panas secara alamiah, perlu diteliti lebih lanjut.
4. Program perhitungan NATCON yang dimodifikasi cukup mampu menjelaskan fenomena perpindahan panas konveksi bebas yang terjadi pada penelitian ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada rekan Kurnia Putranta yang telah membantu dalam modifikasi program.

DAFTAR PUSTAKA

1. Endiah Puji Hastuti, Studi Efek Cerobong Pada Model Reaktor PWR, Tesis, Institut Teknologi Bandung, 1994.
2. El-Wakil, M.M., Nuclear Heat Transport, The American Nuclear Society, LaGrange Park Illinois, 1981.
3. Holman, J.P., Heat Transfer, Mc Graw Hill International Book company, Tokyo 1983.
4. Smith and W.L. Woodruff, a computer code, NATCON, for the Analysis of steady state thermal-Hydraulics and Safety margins in plate-Type Research Reactor cooled By Natural Convection, Argonne National Laboratory, Argonne Illinois, December 1988.
5. Todreas and M.S. Kazimi, Nuclear Systems I, Hemisphere Publishing corporation, New York, 1990.

Tabel 1 Temperatur Pendingin Primer, Sekunder Dan Pemanas Menggunakan Cerobong I.

Daya (watt)	Temperatur (°C) Pada Posisi							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T ud
100	47,5	62,7	65,5	67,8	80,3	24,6	25,5	25,6
150	56,3	76,0	79,9	81,3	98,9	25,4	26,3	25,8
200	64,3	86,5	83,4	91,0	113,2	26,3	26,8	25,1
250	64,4	87,8	82,4	93,5	118,6	25,2	26,1	24,8

Tabel 2 Temperatur Pendingin Primer, Sekunder Dan Pemanas Menggunakan Cerobong II.

Daya (watt)	Temperatur (°C) Pada Posisi							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T ud
100	46,0	50,6	46,6	75,4	82,4	24	25,1	25,6
150	57,9	64,7	58,0	83,2	96,5	25,2	25,9	25,8
200	65,2	76,8	68,4	86,5	107,6	26,1	26,7	25,2
250	67,4	78,7	70,6	89,7	119,2	25,2	25,9	24,9

Tabel 3 Temperatur Pendingin Primer, Sekunder Dan Pemanas Menggunakan Cerobong III.

Daya (watt)	Temperatur (°C) Pada Posisi							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T ud
100	44,7	46,5	50,6	61,9	74,7	24,1	25,3	25,4
150	51,1	54,7	57,2	72,5	90,5	25,9	26,8	25,6
200	57,2	62,4	64,1	81,3	103,2	26,1	26,5	25,1
250	63,8	70,6	70,4	89,8	115,1	25,2	25,7	24,9

Keterangan :

T1 : Temp. pendingin primer masuk.

T2 : Temp. pendingin primer keluar.

T3 : Temp. pemanas bawah.

T4 : Temp. pemanas tengah.

T5.: Temp. Pemanas

T6 : Temp. Pendingin sekunder masuk.

T7 : Temp. Pendingin sekunder "Keluar"

T ud. : Temp. udara

Tabel 4 Data Hasil Perhitungan untuk tinggi cerobong I (tinggi 10 Cm)

Para- meter	Daya (Watt)			
	100	150	200	250
Fluks panas (w/m ²)	1658	2486	3316	4144
T in (oC)	47,5	56,3	64,3	64,4
T out (oC)	49,6	59,1	67,8	68,6
T.B.Bakar Atas (oC)	68,93	87,66	105,39	115,53
Batas ke T onb (oC)	33,35	14,74	2,88	-12,92
Bouyant F. (PA)	3,35017	5,37546	7,33530	8,84464
Friksi (PA)	3,35019	5,37550	7,33537	8,84454
V (Cm/det)	0,268	0,302	0,328	0,343
Laju alir (kg/det)	0,01118	0,01258	0,01358	0,01423
Delta Pd (kg/m ²)	0.7154	1.1368	1.5974	1.9110
Rerugi tekanan di dalam pipa (kg)	0.0126	0.0159	0.0187	0.0204

Tabel 5 : Data Hasil Perhitungan untuk Cerobong II (tinggi 30 Cm)

Parameter	Daya (Watt)			
	100	150	200	250
Fluks panas (w/m ²)	1658	2486	3316	4144
T in (oC)	46,0	57,9	65,2	67,4
T out (oC)	48,0	60,5	65,53	71,2
T.B.Bakar Atas (oC)	67,34	89,00	106,00	118,04
Batas ke T onb (oC)	35,44	13,89	-3,01	-14,94
Bouyant F. (PA)	4,55433	7,30612	10,20010	12,59011
Friksi (PA)	4,55445	7,30646	10,20000	12,59018
V (Cm/det)	0,289	0,327	0,356	0,376
Laju alir (kg/det)	0,01208	0,01358	0,01475	0,01554
Delta Pd (kg/m ²)	1.9992	3.1752	4.4982	5.4684
Rerugi tekanan di dalam pipa (kg)	0.0146	0.0186	0.0220	0.0245

Tabel 6 : Data Hasil Perhitungan untuk Cerobong III (tinggi 50 Cm)

Parameter	Daya (Watt)			
	100	150	200	250
Fluks panas (w/m ²)	1658	2486	3316	4144
T in (oC)	44,7	51,1	57,2	63,8
T out (oC)	46,6	53,6	60,3	67,5
T.B.Bakar Atas (oC)	65,99	82,44	98,34	114,53
Batas ke T onb (oC)	37,28	20,953	5,15	-10,95
Bouyant F. (PA)	5,68320	8,45977	11,47478	14,83758
Friksi (PA)	5,68329	8,45951	11,47487	14,83758
V (Cm/det)	0,305	0,338	0,366	0,391
Laju alir (kg/det)	0,01277	0,01410	0,01521	0,01620
Delta Pd (kg/m ²)	3.1360	4.6550	6.3210	8.1830
Rerugi tekanan di dalam pipa (kg)	0.0163	0.0200	0.0234	0.0265

DISKUSI

Penanya : Utaja

- Apakah sepanjang pemanas tidak timbul distribusi suhu ? Bagaimana pengaruhnya pada chimney effect.
- Bagian manakah yang dinamakan "chimney" (panjang chimney).
- Manakah yang lebih besar pengaruhnya pada aliran :
 - 1). daya besar, cerobong pendek
 - 2). daya kecil, cerobong pendek.

Jawaban

- a. Pada eksperimen ini dipasang 3 buah termokopel di permukaan pemanas. Distribusi suhu terjadi seperti berikut :

adanya beda temperatur ini menyebabkan terjadinya beda densitas ($\rho_{in} - \rho_{out}$), adanya beda densitas menyebabkan ΔP_d meningkat sehingga mempunyai pengaruh positif pada efek chimney.

- b. Yang dimaksud dengan panjang chimney adalah bagian tepat di atas teras hingga sisi keluaran panel primer.
- c. Dari hasil eksperimen yang dilakukan di teras RSG, maka daya yang kecil lebih mudah dihilangkan panasnya menggunakan pendinginan konveksi bebas, ditambah adanya chimney, maka proses penghilangan panas akan lebih baik.

2. Penanya : Henky

- a. Dalam sistem ini mekanisme perpindahan panas yang terjadi adalah konveksi alamiah, sedang persamaan di dalam program yang saudara gunakan ada bilangan Reynold (Re). Kira-kira bagaimana ini realisasinya, bagaimana pula dengan pengaruh bilangan Grashofnya (Gr) ?
- b. Dimana letak-letak pengukuran temperaturnya ?

Jawaban

- a. Letak pengukuran temperatur dengan termokopel adalah di sisi bawah, tengah dan atas untuk pemanas, temperatur masukan pendingin primer masuk dan keluaran serta temperatur untuk pendingin sekunder.
- b. Untuk pertanyaan pertama cukup analitis, akan kami selesaikan / bicarakan di luar forum.
- Terima kasih.

3. Penanya : Darwis Isnaini

- a. Verifikasi program NATCON dengan hasil eksperimen di RSG-GAS yang anda lakukan adalah untuk elemen bakar tipe pelat. Sedangkan untuk BWR berbentuk silinder (anulus) yang mungkin bentuk perlakuannya berbeda dengan pelat, dan ini belum terlihat sudah diverifikasi !
- b. Apakah dengan perbedaan 11% itu anda sudah cukup yakin terdapat kesesuaian, mengingat NATCON belum diverifikasi untuk anulus.

Jawaban

- a. Verifikasi kami lakukan bertahap. Langkah pertama adalah verifikasi program NATCON yang belum diubah untuk teras RSG-GAS (bentuk program untuk bahan bakar pelat sesuai dengan bahan bakar RSG) hasilnya sesuai.
- b. Verifikasi kami lakukan dengan mengubah dimensi anulus ke bentuk pelat dengan mempertahankan luas pp. dan fluks panasnya tetap, hasilnya tidak jauh berbeda dengan

mengubah persamaan untuk anulus. Hasil perhitungan justru kami verifikasi dengan percobaan. Untuk suatu percobaan beda 11% sudah cukup dianggap sesuai.

4. Penanya : Sri Widayati

- a. Atas dasar pemikiran apa ditentukan penambahan cerobong 10, 30 dan 50 cm
- b. Dari hasil penelitian ini, cerobong mana yang paling efektif (bagus).

Jawaban

- a. Penambahan tinggi cerobong 10, 30 dan 50 cm dipilih dari perhitungan $\Delta P_d = (\rho_{in} - \rho_{out}) H_L g/g_c$. Tinggi cerobong optimum dipilih untuk melihat beda efek yang dianggap significant sehingga driving pressure dapat mengatasi hilang tekanan di seluruh sistem.
- b. Dari hasil penelitian ini, tinggi cerobong yang paling efektif adalah cerobong dengan tinggi 50 cm. Pada aplikasinya di teras reaktor masih harus dipertimbangkan mekanisme gerakan batang kendali, loading bahan bakau dan biaya konstruksi.

5. Penanya : Sarwani

Batasan-batasan / asumsi-asumsi apa yang digunakan dalam pembuatan model, sehingga dimensinya dapat ditetapkan.

Jawaban

Ada berbagai batasan dalam perancangan model, baik itu tangki, pemanas dan pemilihan filamen pemanas. Antara lain adalah :

- * Untuk tangki :
 - transparan,
 - tahan panas dan tekanan,
 - mudah didapat di pasaran,
 - keterbatasan ruang laboratorium.
- * Pemanas :
 - sesuai dengan dimensi tangki,
 - tahan karat, dsb.
- * filamen :
 - mampu mengukur range suhu tertentu.

Dimensi diperoleh sedemikian sehingga memenuhi perhitungan yang ada.

6. Penanya : Suryawati

Studi efek cerobong pada model pendingin primer apakah dapat berlaku (diaplikasikan) untuk seluruh tipe reaktor riset, reaktor daya dengan berbagai tipe yaitu PWR, BWR, reaktor berpendingin gas (bukan fluida) dan adakan perbedaan atau persamaannya dengan adanya perbedaan tipe cairan pendingin.

Jawaban

Prinsip pemanfaatan efek cerobong adalah menambah driving pressure pada pendinginan konveksi bebas hingga mampu mengatasi hilang tekan di seluruh sistem. Cerobong ini terutama digunakan pada reaktor jenis BWR. Adanya tipe cairan pendingin mempengaruhi sifat fluida itu terlihat jelas pada perhitungan friksi yang selanjutnya berpengaruh pada hilang tekan.