

PENINGKATAN KINERJA SISTEM KESELAMATAN PASIF PADA REAKTOR NUKLIR DENGAN PENAMBAHAN KOMPONEN RVACS

IMPROVEMENT OF PASSIVE SAFETY SYSTEM PERFORMANCE FOR NUCLEAR REACTOR WITH ADDITION OF RVACS COMPONENT

A. G. Abdullah*, N. P. Ardiansyah, W. Purnama

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Pendidikan Teknologi dan Kejuruan
Universitas Pendidikan Indonesia (UPI), Bandung, Indonesia

Diterima: 2 Maret 2014. Disetujui: 17 Maret 2014. Dipublikasikan: Juli 2014

ABSTRAK

Kelengkapan sistem keselamatan pasif dan inheren pada reaktor lanjut merupakan prasyarat utama. Makalah ini mengeksplorasi hasil desain konseptual sistem pembuangan sisa panas pada pusat listrik tenaga nuklir berjenis *Very High-Temperature Reactor*. Tujuan riset ini untuk merancang sistem pembuangan sisa panas pusat listrik tenaga nuklir yang terdapat pada dinding reaktor. Studi kinerja Reactor Vessel Auxiliary Cooling System (RVACS) dilakukan pada dua jenis pendingin yaitu Timbal-Bismut dan Liquid Salt. Panas dari dinding reaktor dihapus melalui sirkulasi alamiah pada keadaan tunak. Analisis melibatkan sistem perpindahan panas secara radiasi, konduksi dan konveksi alami. Perhitungan perpindahan panas dilakukan pada elemen reaktor *vessel*, dinding luar *guard vessel*, dan pelat pemisah. Hasil analisis kecelakaan menunjukkan kedua jenis sistem pendingin reaktor dan sistem pasif sisa pembuangan panas cukup menghapus sisa panas hasil peluruhan dengan sirkulasi alami.

ABSTRACT

Completeness of passive safety systems and inherent in advanced reactors is a major prerequisite. This paper explores the results of a conceptual design of the heat removal system at the nuclear power plant (NPP) type *Very High-Temperature Reactor*. The purpose of this research was to design the reactor vessel auxiliary cooling system (RVACS) of NPP located within the reactor walls. The RVACS performance study was conducted on two types of coolant: Lead-Bismuth and Liquid Salt. Heat was removed from the reactor vessel through the natural circulation in the steady state. Analyses of heat transfer systems involved radiation, conduction and natural convection. Heat transfer calculations were performed on the reactor vessel, guard vessel, and perforated plate. The results from the accident analysis showed that both types, the reactor coolant system and the passive residual heat removal system, adequately remove remaining heat of the decay by a natural circulation.

© 2014 Jurusan Fisika FMIPA UNNES Semarang

Keywords: decay heat removal; nuclear power plant; RVACS; VHTR

PENDAHULUAN

Reaktor jenis *Very High-Temperature Reactor* (VHTR) merupakan jenis reaktor nuklir generasi lanjut, secara konseptual memiliki temperatur keluaran 100°C. Suhu yang tinggi

memungkinkan untuk memproduksi hidrogen. Hidrogen diharapkan sebagai sumber energi alternatif pengganti energi yang berasal dari fosil. Oleh karena itu, VHTR diharapkan berkontribusi terhadap lingkungan global dan menyediakan berbagai suplai energi. Desain VHTR masih mengacu kepada desain reaktor generasi III, tetapi sudah dilengkapi dengan

*Alamat Korespondensi:

Jl. Dr. Setiabudi No. 225, Bandung, Jawa Barat 50154
E-mail: ade_gaffar@upi.edu / Phone: +6281394554252

sistem keselamatan berlapis, pasif dan inheren, sesuai dengan tuntutan desain reaktor generasi lanjut (Chapin *et al*, 2004).

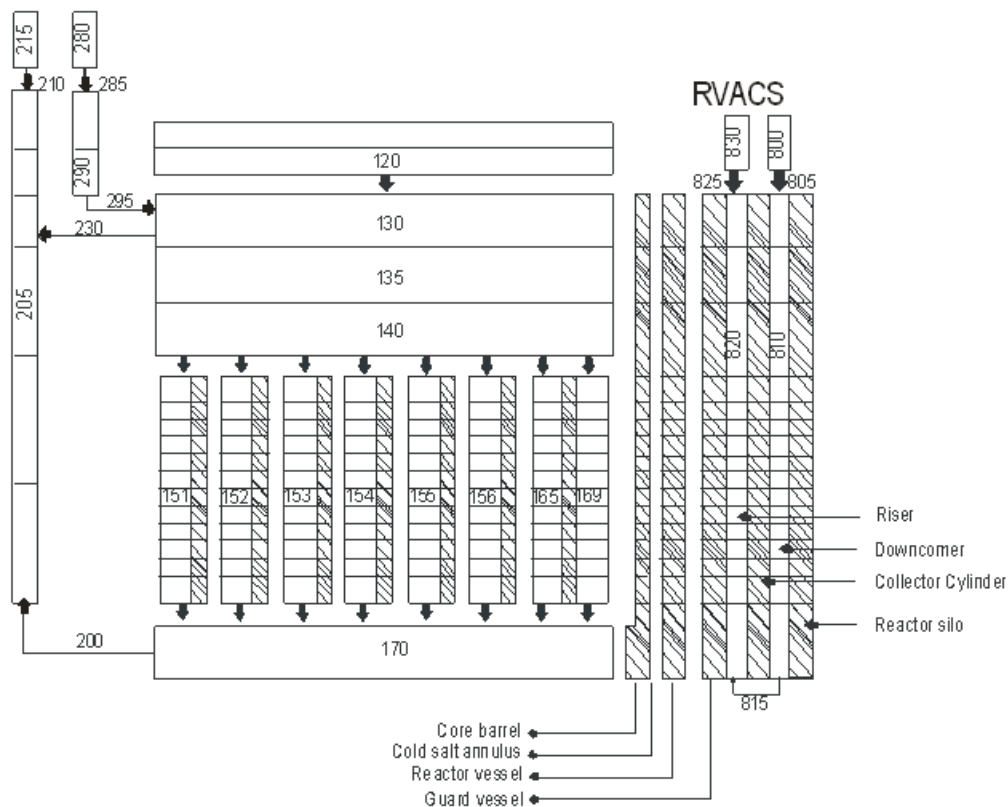
Reaktor nuklir didesain sedemikian rupa, agar produk fisi tetap terjaga dalam *vessel* bahan bakar, sepanjang masa operasional berlangsung, selama proses *shutdown* berlangsung, dan dalam kondisi kecelakaan sekalipun. Kriteria keselamatan reaktor nuklir harus didesain ketika bahan bakar dan kelongsong melewati batas pendinginan normal, tetapi bahan bakar tidak boleh melelehkan material pada teras reaktor (Lamars & Baratta, 2001).

Model satu dimensi dari LS-VHTR telah dikembangkan menggunakan perangkat lunak RELAP5-3D. Model RELAP5-3D kemudian digunakan untuk mensimulasikan keadaan transien reaktor yang dipicu oleh hilangnya tekanan udara di mana *Reactor Vessel Auxiliary Cooling System* (RVACS) melakukan pembuangan panas pasif (Davis *et al*, 2006). Tujuan utama desain sistem pendingin reaktor adalah untuk pembuangan panas yang diinginkan, dengan memastikan bahwa temperatur bahan bakar maksimum selalu di bawah nilai titik leleh material teras reaktor (Lamars dan Baratta, 2001).

Model LS-VHTR diilustrasikan melalui RELAP5-3D seperti terlihat pada Gambar 1.

Model ini merupakan bagian dari sistem pendingin primer dalam bejana reaktor dan RVACS. Pembuangan panas pada bejana Reaktor RVACS diwakili oleh komponen 800 sampai dengan 830. Komponen 800 merupakan *inlet air* yang berfungsi sebagai katup untuk masuknya udara dari atmosfer sekitar reaktor, sedangkan komponen 830 merupakan *chimney* yang berfungsi sebagai pintu masuknya udara menuju penukar panas. RVACS downcomer dan riser diwakili oleh komponen 810 dan 820, masing-masing berfungsi sebagai saluran masuknya udara dari atmosfer sekitar reaktor dan saluran udara menuju penukar panas. Model tersebut mewakili semua struktur panas utama yang terkait dengan RVACS, termasuk *reactor vessel* dan *guard vessel* dan *collector cylinder* yang memisahkan *downcomer* dan riser.

Bagian luar permukaan *collector cylinder* yang terisolasi untuk mencegah pemanasan awal pendingin udara yang mengalir pada *downcomer* tersebut (Lamars & Baratta, 2001). Panas dihapus oleh aliran udara yang turun dari *downcomer* kemudian naik melalui *air riser* dan ke luar melalui *chimney* yang digerakkan oleh gaya *bouyancy* yang disebabkan oleh perubahan densitas udara. Panas dikonveksikan oleh udara melalui dua permukaan, yaitu dinding luar *guard vessel* dan *separator*. Panas



Gambar 1. Skema RELAP5-3D model LS-VHTR.

dipindahkan ke separator melalui radiasi termal dari dinding *guard vessel*, kemudian panas dikonduksikan melalui *vessel* dan *guard vessel* (Abdullah *et al*, 2011)

Pasca kecelakaan reaktor Fukushima, pengembangan sistem keselamatan pasif menjadi tujuan utama dalam pengembangan reaktor berukuran kecil dan menengah. Sebagian besar sistem pasif yang ada, lebih memanfaatkan kekuatan gaya *buoyancy* untuk mendorong aliran pendingin (Novitrian *et al*, 2013). Sirkulasi natural sebagai sistem keselamatan pasif untuk reaktor lanjut, dipengaruhi oleh panjang cerobong. Terdapat kebergantungan temperatur outlet dengan laju alir pendingin yang digunakan (Wibisono *et al*, 2013). Prinsip-prinsip operasi sistem keselamatan, terkait sistem pembuangan panas berbeda-beda. Diperlukan eksperimen yang berhubungan dengan termal hidrolik. Sistem konveksi natural merupakan metode utama dalam sistem pendinginan reaktor (Zhukov *et al*, 2013).

Makalah ini bertujuan memaparkan hasil simulasi kinerja RVACS pada reaktor lanjut berjenis LS-VHTR. Celah antara *reactor vessel* dan *guard vessel* diisi dengan pendingin *liquid-salt* dan diujicobakan pula dengan pendingin *timbal-bismuth*. LS-VHTR merupakan penyatuan fitur khusus dari desain sistem reaktor lainnya. LS-VHTR menggunakan bahan bakar yang sama yang dilapisi partikel, silinder bahan bakar, dan heksagonal grafit sebagai perangkat bahan bakar reaktor. Bahan pendingin *liquid-salt* memungkinkan untuk melakukan transfer panas yang efisien, karena pendingin tersebut beroperasi pada tekanan rendah. Reaktor ini didesain dengan sistem *vessel*, dan fasilitasnya mirip dengan *pool-type sodium reactors*. Sistem pembuangan panas pasif didasarkan pada *Power Reactor Inherently Safe Module* (PRISM) yang dikembangkan oleh General Electric (Davis *et al*, 2006).

Pendingin timbal-bismuth memiliki karakteristik nuklir yang baik dalam tinjauan neutronik, reaktivitas kehampaan (*void reactivity*) dan rasio pembiakan (*breeding ratio*), sehingga dimungkinkan untuk merancang suatu teras dengan waktu operasi yang cukup lama tanpa pengisian ulang bahan bakar. Penggunaan timbal-bismuth sebagai pendingin memungkinkan dicapainya spektrum neutron keras yang menguntungkan dari aspek pembakaran limbah aktinida dan rendahnya pengaruh bahan-bahan hasil fisi sebagai kendala dalam perubahan daya reaktor untuk mengikuti beban yang ada. Spektrumnya yang keras juga me-

nyebabkan hilangnya absorpsi akibat pergeseran spektrum serta hilang atau berkurangnya bahan pendingin dapat dikurangi, selain dapat juga dimanfaatkan untuk meningkatkan daya pembiakan (Su'ud, 1996).

Prasyarat desain reaktor yang memenuhi kriteria sebagai reaktor generasi lanjut, salah satunya harus memenuhi kriteria keselamatan pasif. Beberapa desain reaktor yang dikembangkan para peneliti telah berusaha memenuhi persyaratan tersebut. Reaktor Westinghouse AP-1000 merupakan reaktor PWR (*pressurized water reactor*) yang telah dilengkapi dengan sistem keselamatan pasif. Reaktor ini menerapkan konsep yang sederhana dalam mengatasi kecelakaan dasar, misalnya jika terjadi kerusakan pada pipa pendingin. Reaktor ini dirancang untuk mencapai dan mempertahankan kondisi *shutdown* secara aman tanpa tindakan operator dan tanpa memerlukan daya listrik atau pompa pompa, tetapi bergantung pada kekuatan alami misalnya gaya gravitasi, sirkulasi natural, gas yang dikompresi untuk menjaga komponen-komponen teras reaktor jika mengalami *overheating*.

Reaktor Westinghouse AP-1000 dilengkapi juga dengan banyak komponen aktif, tetapi tidak terkait dengan desain keselamatan reaktor tersebut. Beberapa pertahanan berlapis untuk mitigasi kecelakaan sudah disediakan dalam desain reaktornya. (*Westinghouse Electric Company*, 2011). Komponen aktif merupakan perangkat-perangkat sistem keselamatan reaktor yang dalam operasinya memerlukan daya listrik, misalnya motor listrik yang menggerakkan pompa untuk mengambil air pendingin dari laut. Komponen aktif ini memiliki keuntungan karena dapat menghapus panas dari inti reaktor secara cepat jika dibandingkan dengan perangkat-perangkat komponen pasif. Komponen aktif akan bermasalah jika perangkatnya tidak berfungsi akibat hilangnya daya listrik akibat kecelakaan tersebut, misalnya kasus tersapunya motor-motor pompa pendingin pada kecelakaan reaktor Fukushima akibat diterjang tsunami.

Desain reaktor *Super-Power Reactor Innovative Small Module* (S-PRISM) juga telah menerapkan sistem keselamatan pasif. Reaktor ini merupakan reaktor modular yang dirancang oleh General Electric dengan daya 1000 MWth dan berpendingin natrium. *Loop* pendingin primer terkandung sepenuhnya dalam bejana reaktor yang memiliki ketebalan 5 cm. Dinding luar bejana reaktor berfungsi juga sebagai pelindung reaktor, memiliki tinggi 20

meter dan berdiameter 10 meter. Antara bejana reaktor dan dinding luarnya terdapat celah dengan lebar 20 cm yang diisi oleh gas argon. Strategi pembuangan panas peluruhan dari reaktor S-PRISM terdiri dari dua sistem yang terpisah yaitu *Reactor Vessel Auxiliary Cooling System* (RVACS) dan *Auxiliary Cooling System* (ACS) yang memanfaatkan sirkulasi natural dari atmosfer yang didorong oleh gaya *buoyancy* (gaya apung). Perangkat ACS menggunakan sistem perpindahan panas lanjut untuk melengkapi kerja RVACS (Whittman, 2007).

Saat beroperasi, sirkulasi natural dalam *loop* pendingin primer dan pendingin lanjut mentransfer panas ke air riser. RVACS beroperasi dengan membuang panas yang melalui bejana reaktor dan dinding bejana reaktor dengan cara yang sama. Panas kemudian ditransferkan kembali dalam *loop* primer melalui proses sirkulasi natural. Pendingin primer tidak dapat disalurkan di luar pengungkung, karena kinerja RVACS dibatasi oleh luas permukaan reaktor vessel ini. RVACS pada awalnya dikembangkan oleh General Electric untuk reaktor cepat tipe S-PRISM yang berpendingin sodium (Forsberg *et al*, 2006). General Electric mampu meningkatkan kinerja sistem RVACS dengan menambahkan kolektor silinder berlubang atau pelat berlubang ke saluran tempat mengalir udara panas (Boardman *et al*, 2000). Pelat berlubang dan dinding kolektor silinder padat keduanya dipanaskan melalui transfer panas secara radiasi, dan panas ini kemudian dikonveksikan dari empat permukaan (dinding luar bejana reaktor, dinding dalam kolektor silinder dan dua sisi pelat berlubang) (Whittman, 2007).

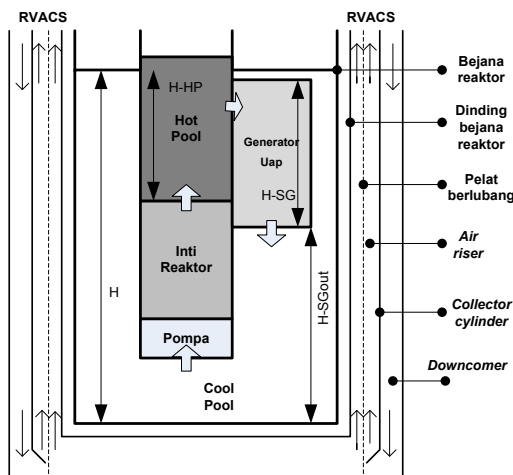
Reaktor lainnya yang telah menerapkan konsep keselamatan pasif adalah reaktor cepat yang diberi nama *Flexible Conversion Reactor* (FCR). Reaktor ini dapat digambarkan sebagai versi reaktor *Actinide Burner Reactor* (ABR) atau *Minor Actinide Burner Reactor* (MABR) ataupun *Actinide Burner Reactor with Thorium* (ABRT), masing-masing jenis hanya berbeda pada konfigurasi teras dan jumlah batang kendalinya. Desain reaktor tersebut keseluruhannya berpendingin timbal dan memiliki daya 700MWth dan 300MWe (Nikiforova, *et al*, 2004). Desain reaktor FCR hampir sama dengan reaktor S-PRISM, dimana pendingin primer terkandung sepenuhnya di bejana reaktor, dan sistem pembuangan panas peluruhannya menggunakan RVACS dengan dilengkapi pelat berlubang untuk meningkatkan daya transfer panasnya. Dengan tujuan meningkatkan aspek

modularitasnya, dimensi reaktor vessel FCR ini lebih kecil dari S-PRISM dengan tinggi 19 meter dan diameter 6.34 m. Desain tidak dilengkapi dengan sistem isolasi seismik, maka untuk menahan berat pendingin ketika terjadi gempa bumi dinding reaktor vessel dipertebal menjadi 25 cm. Dengan mempertebal dinding bejana reaktor akan menyebabkan penurunan tajam dalam tingkat pembuangan panasnya, hal ini diperbaiki dengan menambahkan logam cair pada celah antara bejana reaktor dan dinding bejana reaktor.

Desain lain terkait dengan reaktor yang menerapkan sistem keselamatan pasif adalah reaktor Korea Lead-cooled Fast Reactor (KLFR). Reaktor KLFR memiliki rating daya 900MWth, 372 MWe, dan juga menggunakan modifikasi desain RVACS untuk sistem penghapusan panas peluruhannya. KLFR menggunakan logam cair timbal sebagai bahan pengisi celah antara bejana reaktor dan dinding bejana reaktor. Meskipun sistem penghapusan panas reaktor KLFR sama dengan reaktor FCR, tetapi pemilihan logam cair timbal masih banyak dipertanyakan. Dalam analisis lapisan logam yang mengisi celah antara bejana reaktor dan dinding bejana reaktor dianggap cairan, dan arus konveksi dilibatkan dalam perhitungan perpindahan panas, namun timbal akan berbentuk padat pada suhu operasi normal dari reaktor, logam cair tersebut akan memerlukan waktu untuk mencair sebelum mode perpindahan panas dilakukan (Eoh *et al*, 2005).

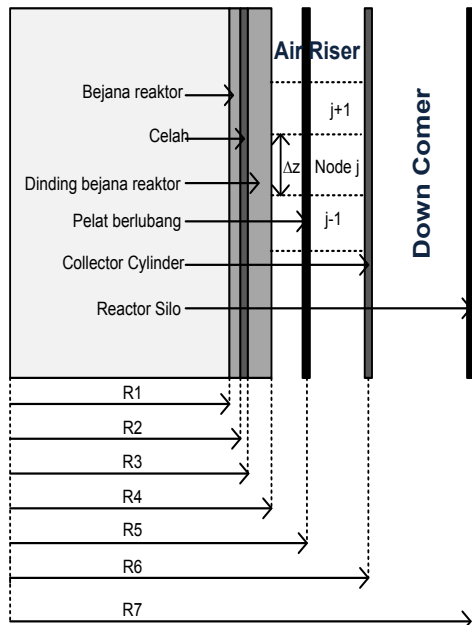
METODE

Kinerja RVACS merupakan fungsi dari perbedaan tekanan antara aliran udara masuk (*airflow inlet*) dan aliran udara keluar (*airflow outlet*), temperatur udara yang masuk, variasi densitas udara di sepanjang jalur aliran dan karakteristik hilangnya tekanan di saluran. Perbedaan tekanan antara *inlet* dan *outlet* serta temperature *inlet* RVACS dapat dipengaruhi juga oleh arah dan kecepatan angin (Heineman *et al*, 1988). Desain reaktor terdiri dari *reactor vessel* (bejana reaktor), interior *reactor vessel* dan eksterior *guard vessel*, yang dipisahkan oleh suatu celah yang diisi pendingin logam cair. Desain model RVACS yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema reaktor tipe pool

Panas diambil oleh aliran udara yang turun dari *downcomer* kemudian naik melalui *air riser* dan keluar melalui *chimney* yang digerakkan oleh gaya *bouyancy* yang disebabkan oleh perubahan densitas udara. Panas dikonveksikan oleh udara melalui dua permukaan yaitu dinding luar bejana reaktor dan separator. Panas ditransferkan ke separator melalui radiasi termal dari dinding bejana reaktor, kemudian panas dikonduksikan melalui bejana reaktor dan dinding bejana reaktor.



Gambar 3. Geometri RVACS

Gambar 3 memperlihatkan geometri RVACS secara lengkap. Dalam desain RVACS ditambahkan pelat pemisah pada permukaan dinding bejana reaktor (tetapi tidak bersentu-

han dengan *reactor vessel*) dengan tujuan untuk mengurangi panas pada proses konveksi. Pelat pemisah dalam sejumlah perhitungan kadang-kadang diabaikan.

Asumsi yang digunakan pada desain RVACS ini adalah :

1. Analisis dilakukan pada keadaan tunak
2. Temperatur bejana reaktor dan dinding bejana reaktor dianggap konstan pada arah azimuthal.
3. Separator memiliki isolasi yang sempurna.
4. Koefisien perpindahan panas konveksi (*h*) konstan pada arah azimuth di riser.
5. Semua *inlet* dan *outlet* cerobong memiliki isolasi yang sempurna.
6. Perpindahan panas konveksi antara pendingin dan dinding dalam reaktor sepenuhnya konstan.
7. Temperatur pendingin bervariasi secara linier dalam arah aksial.
8. Perpindahan panas yang melewati celah logam cair dimodelkan secara konduksi.
9. Konduksi dan radiasi aksial diabaikan.

Mengacu pada Gambar 3, maka perhitungan perpindahan panas meliputi: perpindahan panas dari dinding *reactor vessel* ke separator dihitung melalui proses radiasi: (Whitman, 2007)

$$Q_{in,s,j} = C_G A_G (T_{G,j}^4 - T_{S,j}^4) \tag{1}$$

A_G adalah luas permukaan *dinding reactor vessel*, T_G dan T_S masing-masing adalah temperatur dinding *reactor vessel* dan temperatur separator, sedangkan C_G didefinisikan oleh: (Whitman, 2007)

$$C_G = \sigma \left[\frac{1}{\epsilon_G} + \frac{A_G}{A_S} \left(\frac{1}{\epsilon_S} - 1 \right) \right]^{-1} \tag{2}$$

Dimana σ adalah konstanta boltzman, ϵ_g dan ϵ_s masing-masing adalah emisivitas dari dinding *reactor vessel* dan separator. Perpindahan panas dari separator ke udara dimodelkan dengan proses konveksi murni:

$$Q_{out,S,j} = h_j A_S (T_{S,j} - T_{bulkair,j}) \tag{3}$$

Koefisien perpindahan panas konveksi, h_j dihitung mengacu pada: (Heineman, 1988)

$$h_j = 0,0229 Re_j^{0,8} Pr_j^{0,4} \frac{k_{air,j}}{D_h} \left(\frac{T_{G,j}}{T_{air,j}} \right)^{-0,4} \left[1 + \left(\frac{z_j}{D_h} \right)^{-0,36} \right] \tag{4}$$

Maka total perpindahan panas yang me-

lewati dinding *reactor vessel* adalah :

$$\dot{Q}_{out,G,j} = h_j A_G (T_{G,j} - T_{bulkair,j}) + \dot{Q}_{in,S,j} \quad (5)$$

Perpindahan panas ke permukaan luar dinding *reactor vessel* dari pendingin primer dimodelkan secara konduksi. Pendekatannya melalui resistansi seri antara temperatur pendingin dan temperatur dinding luar dinding *reactor vessel* : (Whitman, 2007)

$$R_{TOT} = R_C + R_R + R_{GAP} + R_G \quad (6)$$

dimana :

$$R_C = (h_C \pi D_1 \Delta z)^{-1}$$

$$R_{cylinder} = \frac{\ln(D_{out}/D_{in})}{\pi k \Delta x} \quad (7)$$

k adalah konduktivitas termal material yang mengisi celah antara *reactor vessel* dan dinding *reactor vessel*. D_{out} dan D_{in} masing-masing merupakan diameter luar dan diameter dalam silinder. Maka perpindahan panas yang masuk ke dinding *reactor vessel* adalah :

$$\dot{Q}_{in,G,j} = R_{TOT}^{-1} (T_{C,j} - T_{G,j}) \quad (8)$$

Aliran massa dihitung berdasarkan keseimbangan antara gaya apung (buoyancy) dan rugi-rugi tekanan (Whitman, 2007):

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{\Delta P_b}{c}} \quad (9)$$

$$\Delta P_b = \sum_{j=1}^N \rho_j (\Delta \bar{H}_j \cdot \bar{g}) \quad (10)$$

$$c = \sum_{j=1}^N \left(K_j + f_j \frac{L_j}{D_{h,j}} \right) (2\rho_j A_j)^{-1} \quad (11)$$

$$f_j = 0.11 \left(\frac{\xi}{D_h} + \frac{68}{R_e} \right)^{0,25} \quad (12)$$

dengan,

ΔP_b : koefisien *thermal bouyancy*

C : pressure drop dari rugi bentuk dan rugi gesekan.

K : koefisien rugi bentuk.

f : koefisien rugi gesekan.

D_h : diameter hidrolis.

μ : rata-rata densitas udara

A : luas area saluran.

g : percepatan gravitasi.

ΔH : perubahan elevasi.

ξ : *sain-grain roughness*.

R_e : bilangan *Reynold*.

Untuk mendapatkan perhitungan yang akurat dari sistem model RVACS, densitas udara, panas spesifik, viskositas dan konduktivitas panas harus dimodelkan sebagai fungsi temperatur udara ataupun tekanan. Perhitungan densitas udara dilakukan melalui pendekatan persamaan gas ideal :

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{P}{RT} \quad (13)$$

Keterangan : ,

P : tekanan (Pa)

T : temperatur (K)

R : konstanta gas untuk udara (287 J/kg K).

Perhitungan besaran lainnya dilakukan dengan menggunakan rumus :

$$C = 1034,09 - (0,284887) T + (7,816818 \times 10^{-4}) T^2 - (4,970789 \times 10^{-7}) T^3 + (1,077024 \times 10^{-10}) T^4. \quad (J/Kg K) \quad (14)$$

$$k = -2,2276501 \times 10^{-3} + (1,2598485 \times 10^{-4}) T - (1,4815235 \times 10^{-7}) T^2 + (1,4815235 \times 10^{-10}) T^3 - (1,066657 \times 10^{-13}) T^4 + (2,47663035 \times 10^{-17}) T^5. \quad (W/mK) \quad (15)$$

$$\mu = (-0,98601 + (9,080125 \times 10^{-2}) T - (1,17635575 \times 10^{-4}) T^2 + (1,2349703 \times 10^{-7}) T^3 - (5,7971299 \times 10^{-11}) T^4) \times 10^{-6}. \quad (kg/ms) \quad (16)$$

Untuk mempermudah perhitungan, penukar panas dibagi menjadi beberapa partisi dengan tinggi yang sama, sedangkan inlet/outlet saluran (*duct*) menjadi simpul tertentu dengan panjang independen. Temperatur inlet udara dan tekanan untuk masing-masing titik partisi, dipengaruhi oleh *titik partisi* sebelumnya. Seluruh properti udara dihitung di bagian inlet, dan diasumsikan konstan di sepanjang saluran. *Pressure drop* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (Whitman, 2007):

$$P_{in,j+1} = P_{in,j} - \rho \left(f_j \frac{L V^2}{2 D_h} + K \frac{V^2}{2} \right) \quad (17)$$

Perubahan temperatur dihitung hanya untuk bagian panas dari sistem RVACS. Perpindahan panas ke udara pada node dihitung dengan menggunakan penjumlahan persamaan (5), setelah temperatur dinding luar *reactor vessel* dan temperatur pelat berlubang ditentukan. Peningkatan temperatur ini kemudian dihitung dari :

$$T_{out,j} = T_{in,j} + \frac{Q_{total,j}}{mC_p} \quad (18)$$

Keterangan: ,

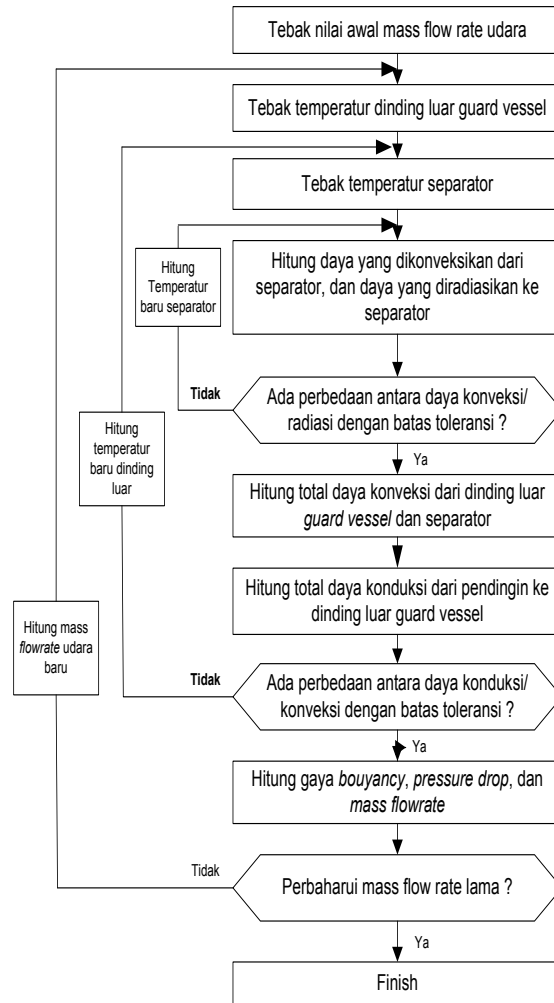
$T_{in,j}$ dan $T_{out,j}$: temperatur *inlet* dan *outlet* node ke-j

$Q_{total,j}$: total perpindahan panas ke udara.

m : laju alir massa.

Solusi pendekatan dilakukan dengan terlebih dahulu menebak laju alir massa awal, temperatur dinding luar *reactor vessel* dan temperatur separator. Kemudian hitung gaya *bouyancy* dan rugi-rugi tekanan, proses dilakukan secara iterasi sampai tercapai keseimbangan antara laju alir massa dengan gaya *bouyancy*. Gambar 4 menunjukkan diagram alir perhitungan.

Perhitungan dilakukan melalui tahapan : perhitungan laju alir massa udara, kemudian menghitung temperatur yang terdapat pada dinding luar *guard vessel*. Setelah itu menghitung temperatur separator yang terdapat pada reaktor dan menghitung daya yang dikonveksikan dari separator, dan daya yang diradiasikan ke separator. Apabila tidak terdapat perbedaan nilai antara daya konveksi atau radiasi dengan batas toleransi, maka harus menghitung kembali temperatur separator, namun jika terdapat perbedaan antara daya konveksi atau radiasi dengan batas toleransi, maka perhitungan dilanjutkan dengan menghitung total daya konveksi dari dinding luar *guard vessel* dan separator. Berikutnya, melakukan perhitungan total daya konduksi dari pendingin ke dinding luar *guard vessel*. Apabila hasil perhitungan yang dilakukan tidak memiliki perbedaan nilai antara daya konduksi atau konveksi dengan batas toleransi maka harus menghitung kembali temperatur dinding luar *guard vessel*, Namun jika terdapat perbedaan perhitungan dilanjutkan dengan menghitung gaya *bouyancy*, *pressure drop*, dan *mass flow rate*. Pada tahap akhir dilihat nilai laju alir massa yang didapat, jika tidak terdapat perbedaan maka perhitungan kembali pada tahap awal, namun jika terdapat pembaruan nilai laju alir massa maka hasil yang didapatkan telah selesai.



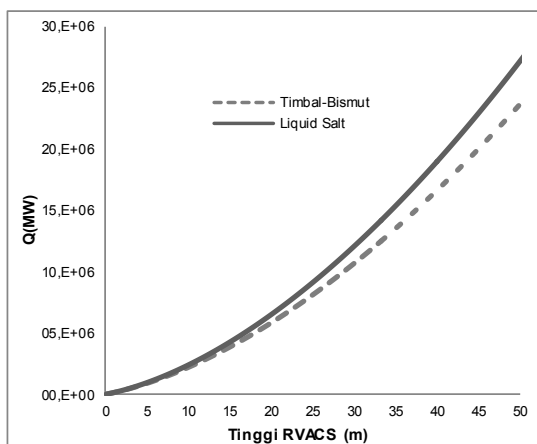
Gambar 4. Diagram alir perhitungan desain RVACS

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tahap pertama penghitungan dilaksanakan sesuai desain referensi pada Tabel 1. Analisis yang dilakukan melingkupi temperatur pendingin saja. Jika hasil analisis yang didapat di bawah suhu maksimum kelongsong, maka desain dapat dikatakan berhasil, dikarenakan tingkat daya pembuangan yang melewati kelongsong sangat kecil dan hanya ada nilai resistansi termal yang cukup kecil antara kelongsong dan pendingin utama. Simulasi dilakukan pada saat reaktor mengalami kecelakaan dan secara prosedural sistem kendali melakukan proses shutdown, sehingga menyisakan panas sisa peluruhan sebesar 1% sampai dengan 3% dari total daya thermal reaktor.

Tabel 1. Parameter desain RVACS

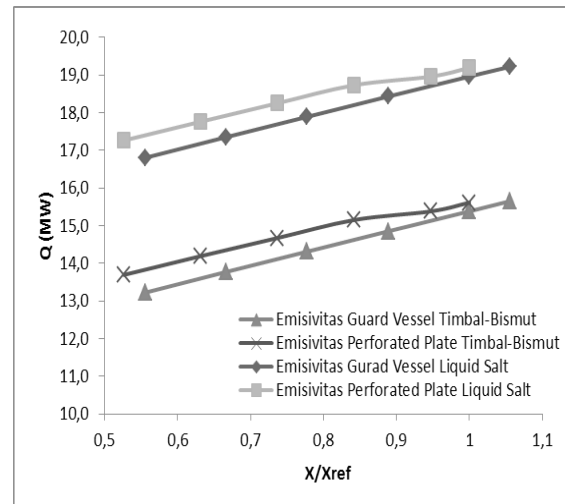
Komponen Desain	Nilai
Daya Reaktor	2400 MW
Pendingin	LiF-BeF ₂ dan Pb-Bi
Bahan bakar	UCO (Uranium Oxycarbide)
Tinggi RVACS	50 m
Downcomer gap	9.13 m
Jari-jari dalam reactor vessel	8.02 m
Ketebalan reactor vessel	0.1 m
Ketebalan guard vessel	0.03

**Gambar 5.** Total panas yang dapat dihapus RVACS pada desain referensi

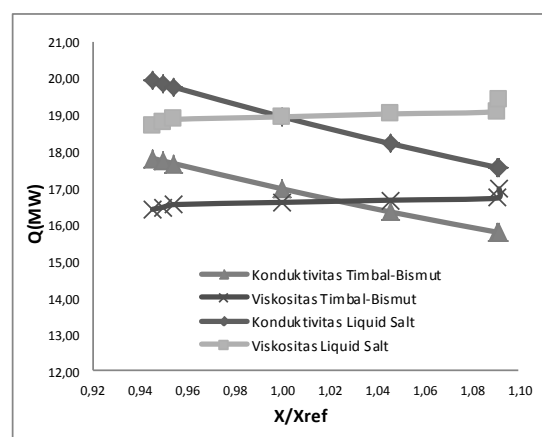
Analisis perhitungan pembuangan panas RVACS dimulai dengan menghitung total perpindahan panas pada desain referensi dan diperoleh bahwa RVACS berbahan pendingin liquid-salt dapat menghapus panas sebesar 28,80 MWt atau sebesar 1,2 %, dan untuk pendingin timbal-bismut penghapusan panas sebesar 25,05 MWt atau 1,04% dari total daya termal reaktor, terlihat pada Gambar 5. Pembuangan panas dihapus sistem RVACS oleh sirkulasi natural dari atmosfer di sekitar *reactor vessel* pada keadaan tunak. Model yang dianalisis mengambil asumsi bahwa koefisien transfer panas dan faktor friksi berdasarkan kasus aliran turbulen.

Gambar 6 memperlihatkan efek dari kinerja RVACS akibat optimasi aspek properti *emisivitas guard vessel* dan *perforated plate*. Dimana optimasi aspek properti emisivitas dikatakan meningkat apabila kinerja RVACS mencapai nilai *emisivitas guard vessel* dan *perforated plate* mendekati nilai 1. Optimasi *emisivitas guard vessel* dan *perforated plate*

pada liquid-salt mendekati 1 saat nilai daya thermal reaktor bernilai 18,96 MWt dan 19,19 MWt. Sedangkan *emisivitas guard vessel* dan *perforated plate* pada timbal-bismut mendekati nilai 1 saat nilai daya thermal reaktor bernilai 15,38 MWt dan 15,61 MWt.

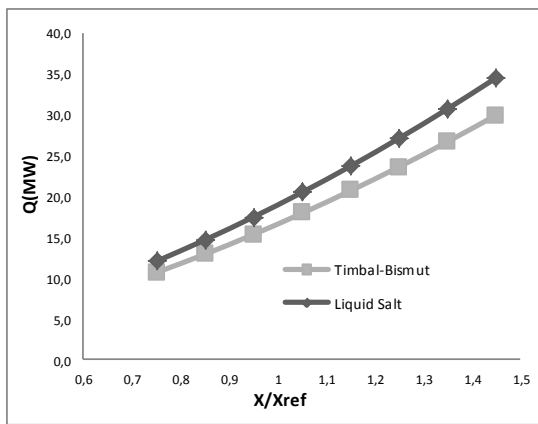
**Gambar 6.** Efek perubahan nilai emisivitas *guard vessel* dan *perforated plate*.

Gambar 7 memperlihatkan efek dari kinerja RVACS akibat optimasi aspek viskositas dan konduktivitas udara. Optimasi properti konduktivitas udara dari kedua pendingin tidak memiliki peningkatan daya perpindahan panas RVACS. Sedangkan optimasi properti viskositas dari kedua pendingin memiliki peningkatan daya perpindahan panas RVACS namun tidak begitu signifikan.

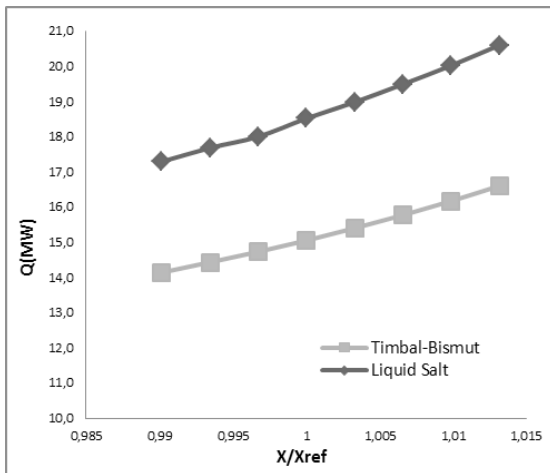
**Gambar 7.** Efek perubahan viskositas dan konduktivitas udara.

Gambar 8 sampai dengan Gambar 10 berturut-turut memperlihatkan hasil simulasi optimasi aspek geometri RVACS. Optimasi ter-

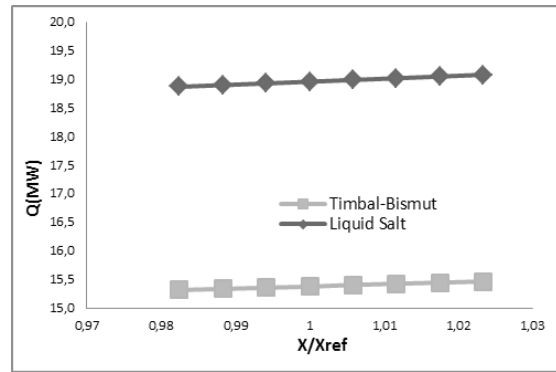
hadap perubahan tinggi RVACS memperlihatkan dampak yang cukup signifikan terhadap kinerja RVACS, sedangkan optimasi diameter hanya mampu menghasilkan nilai 17,3 MWt sampai dengan 21,61 MWt untuk pendingin *liquid-salt* dan untuk pendingin timbal-bismut menghasilkan nilai 14,15 MWt sampai dengan 16,61 MWt, namun untuk optimasi channel gap tidak memberikan perubahan kinerja RVACS sama sekali. Optimasi tinggi RVACS pada pendingin *liquid-salt* mampu mencapai nilai maksimum 34.5 MWt dan timbal-bismut mencapai 29.93 MWt. Dari hasil tersebut menunjukkan optimasi tinggi RVACS pada bahan pendingin *liquid-salt* memiliki nilai optimasi lebih baik dari timbal-bismut.



Gambar 8. Efek perubahan tinggi RVACS.

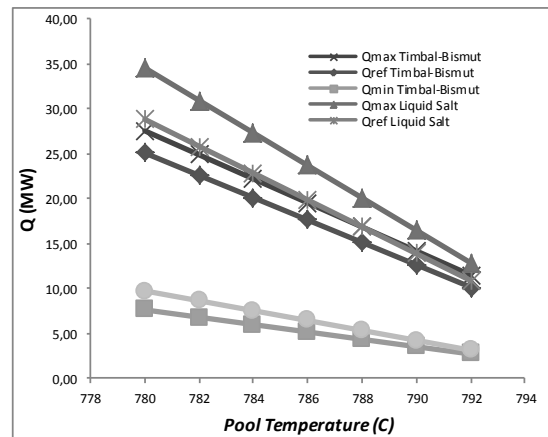


Gambar 9. Efek perubahan diameter RVACS.



Gambar 10. Efek perubahan *channel gap*.

Gambar 11 memperlihatkan rangkuman hasil optimasi untuk desain minimum, desain referensi dan desain maksimum. Hasil simulasi menyimpulkan bahwa desain teoritis berpendingin *liquid-salt* ini mampu menghapus panas antara 0,45 % sampai dengan 1,44 %. Sedangkan pendingin timbal-bismut mampu menghapus panas antara 0,42 % sampai dengan 1,14 % dari daya termal reaktor. Kinerja RVACS dengan pendingin *liquid-salt* dan timbal-bismut sama-sama memiliki kinerja yang baik sebagai komponen pasif reaktor, dikarenakan memiliki kemampuan menghapus panas sisa peluruhan di atas 1%. Pendingin *liquid-salt* memiliki titik didih sebesar 1400 °C dan titik leleh 460 °C sedangkan timbal-bismut memiliki titik didih 1670°C dan titik leleh 125 °C.



Gambar 11. Kapabilitas penghapusan panas dari RVACS.

RVACS harus memiliki kemampuan untuk menjaga suhu reaktor di bawah batas desain dengan menggunakan sirkulasi natural. RVACS menggunakan konveksi alami udara untuk menghilangkan panas dari bejana reaktor. Udara dari atmosfer sekitar masuk ke dalam bangunan reaktor dan mengalir di sekitar

dinding reaktor. Pada saat reaktor kehilangan panas sementara, suhu pendingin dan bejana reaktor akan meningkat. Peningkatan suhu ini akan meningkatkan perpindahan panas radiasi di seluruh dinding reaktor. Sistem RVACS akan melindungi bejana reaktor dari kerusakan berat yang ditimbulkan selama transien. (Triplett *et al*, 2012). RVACS memiliki kapasitas yang cukup untuk menghapus panas sisa peluruhan yang terjadi sekitar 24 jam setelah reaktor *shutdown*. Kelebihan sistem RVACS adalah dalam operasionalnya tidak memerlukan tindakan operator (Ahfeld *et al*, 2011)

PENUTUP

Desain konseptual RVACS sebagai komponen keselamatan pasif yang memiliki kemampuan menghapus panas sisa peluruhan, telah diterapkan pada desain reaktor VHTR. Sirkulasi natural akibat peran udara sekitar dapat menghapus panas sesaat setelah reaktor *shut down*. Kedua jenis pendingin yaitu Timbal-Bismut dan Liquid Salt yang disimpan pada celah antara *reactor vessel* dan *guard vessel* dapat direkomendasikan sebagai logam cair yang handal.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah A., G., Su'ud, Z., Shafii, M., A., (2011), Desain Konseptual Sistem Keselamatan Pasif pada Reaktor Cepat Berpendingin Timbal-Bismut, *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir PTNBR – BATAN*, Bandung, p.107-112.
- Ahlfeld C., Burke T., Ellis T., Hejzlar P., Weaver K., Whitmer C., Gilleland J., Cohen M., Johnson B., Mazurkiewicz S., McWhirter J., Odedra A., Touran N., Davidson C, Walter J., Petroski R., Zimmerman G., Weaver T., Schweiger P. and Russick R., (2011) Conceptual Design of a 500 MWe Traveling Wave Demonstration Reactor Plant, *Proceedings of ICAPP 2011 Nice*, France, May 2-5, 2011 Paper 11199
- Boardman C., Dubberley A., Carrol D., Hui M., Fanning A. dan Kwant W. (2000) : A Description of the S-PRISM Plant, *Proceedings of ICONE 8*, Baltimore, MD, USA.
- Chapin, D., Kiffer, S., Nestell, J., (2004), The Very High Temperature Reactor: A Technical Summary, *MPR Associates, Inc*, Alexandria
- Davis, C. B., and Hawkes G. L., (2006), Thermal-Hydraulic Analyses Of The LS-VHTR, Idaho National Laboratory.
- Eoh J.H., Kim J.B., Kim S.J. dan Kim S.O. (2005), Design and Performance of the Passive Decay Heat Removal System in a Lead-cooled Fast Reactor, *Proceedings of ICAPP*, Seoul, Korea.
- Forsberg C., W., (2006), Alternative Passive Decay-Heat Systems for the Advanced High-Temperature Reactor, *Proceedings of ICAPP '06*, Reno, NV USA, June 4–8 2006, paper 6055.
- Heineman, J., Kraimer, M., dan Lottes, P., (1998), Experimental And Analytical Studies of A Passive Shutdown Heat Removal System for Advanced LMR's, *Argonne National Laboratory*, Illinois.
- Lamars, J.R. and Baratta, A.J., (2001), Introduction to Nuclear Engineering, 3rd Ed., Prentice Hall, New Jersey.
- Nikiforova, A., Hejzlar, P., dan Todreas, N., E. (2009), Lead-Cooled Flexible Conversion Ratio Fast Reactor, *Nuclear Engineering and Design*, **239**, 2596-2611.
- Novitrian, Waris, A., Viridi, S., Su'ud, Z., (2013), Preliminary Study of Safety Analysis of Pb-Bi Cooled Small Power Reactor with Natural Circulation, *Advanced Materials Research*, Vol. 772, p 519-523.
- Su'ud, Z., (1996), Accident Analysis of Lead or Lead-Bismuth Cooled Small Safe Long-Life Fast Reactor using Metallic or Nitride Fuel, *Nucl. Eng. And Design*, **162**, p 205-222.
- Triplett B., S., Loewen E., P., Dooies, B., J., (2012), PRISM: A Competitive Small Modular Sodium-Cooled Reactor, *Nuclear Technology*, Vol. 178, p186-200.
- Westinghouse Electric Company (2011) , Passive Safety-Related System, http://www.ap1000.westinghousenuclear.com/ap1000-safety_psr.html.
- Whitman, J., (2007), Design of Passive Decay Heat Removal System for The Lead Cooled Flexible Conversion Ratio Fast Reactor, *Nuclear Science and Engineering*, Massachusetts Institute of Technology.
- Wibisono, A., F., Ahn, Y., Wesley C. W., Addad, Y., Jeong Ik Lee, (2013), Studies of Various Single Phase Natural Circulation Systems for Small and Medium Sized Reactor Design, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 262, September 2013, p390–403.
- Zhukov, A. V., Sorokin, A. P., Kuzina, Yu. A., 2013, Emergency cooling down of fast-neutron reactors by natural convection (a review), *Thermal Engineering*, Vol. 60, Issue 5, pp.345-354