

## DISAIN KONSEPTUAL SISTEM KESELAMATAN PASIF PADA REAKTOR CEPAT BERPENDINGIN TIMBAL-BISMUT

Ade Gafar Abdullah<sup>1,2</sup>, Zaki Su'ud<sup>2</sup> dan Mohamad Ali Shafii<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Elektro FPTK UPI, Jl.Dr. Setiabudhi 207, Bandung, 40154

<sup>2</sup>Jurusan Fisika FMIPA ITB, Jl. Ganesha 10, Bandung

<sup>3</sup>Jurusan Fisika FMIPA Universitas Andalas, Kampus Limau Manis, Padang

E-mail: ade\_gaffar@upi.edu

### ABSTRAK

**DISAIN KONSEPTUAL SISTEM KESELAMATAN PASIF PADA REAKTOR CEPAT BERPENDINGIN TIMBAL-BISMUT.** Makalah ini memaparkan hasil disain konseptual sistem keselamatan pasif pada reaktor berdaya 300 MWth berpendingin Pb-Bi. Tujuan utama dari riset ini adalah untuk merancang sistem penghapusan panas dari dinding reaktor. Panas dari dinding reaktor dihapus oleh Reactor Vessel Auxiliary Cooling System (RVACS) melalui sirkulasi alamiah dari atmosfer sekitar reaktor pada keadaan tunak. Perhitungan dilakukan secara numerik menggunakan metode Newton Raphson. 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 simulasi menyimpulkan bahwa disain konseptual ini mampu menghapus panas 1,33% sampai dengan 4,67 % dari daya termal reaktor, sehingga dapat dihipotesiskan jika reaktor mengalami kecelakaan, sistem masih dapat mengatasi panas akibat peluruhan.

**Kata kunci:** keselamatan pasif, reaktor cepat, RVACS

### ABSTRACT

**CONCEPTUAL DESIGN OF PASSIVE SAFETY SYSTEM FOR LEAD-BISMUTH COOLED FAST REACTOR.** This paper presents the results of the conceptual design of passive safety system for 300 MWth reactor power using Pb-Bi coolant. The main purpose of this research is to design heat removal system from the reactor wall. The heat from the reactor wall is removed by Reactor Vessel Auxiliary Cooling System (RVACS) using the natural circulation from the atmosphere around the reactor at steady state. The calculation is performed numerically using Newton-Raphson method. The analysis involves the heat transfer systems by radiation, conduction and natural convection. Heat transfer calculation is performed on the elements of the reactor vessel, outer wall of guard vessel and the separator plate. The simulation results conclude that the conceptual design produced is able to remove heat of 1.33% to 4.67% from the reactor thermal power, so it can be hypothesized that if the reactor have an accident, the system can still overcome the heat due to decay.

**Keywords:** passive safety, fast reactor, RVACS

### 1. PENDAHULUAN

Saat reaktor beroperasi pada keadaan tunak, dengan distribusi temperatur yang tidak bergantung waktu, semua panas yang dilepaskan dalam sistem harus terhapus secara alamiah [1]. Pengoperasian sistem pendingin merupakan salah

satu pertimbangan paling penting dalam disain reaktor.

Pemilihan material bahan bakar, bahan pendingin, *cladding* dan *vessel* reaktor harus menjadi pertimbangan utama dalam mendisain reaktor dimana batas titik lelehnya harus jauh dari temperatur disainnya. Jika inti reaktor meleleh

akan mengakibatkan pecahnya *cladding* dan terjadi pelepasan produk fisi [1]. Tujuan utama dalam perancangan sistem pendingin reaktor adalah menyiapkan sistem penghapusan panas pada tingkat daya yang diinginkan sambil memastikan bahwa temperatur bahan bakar maksimum selalu di bawah nilai titik leleh material teras reaktor [1].

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir yang beroperasi saat ini masih mengandalkan sistem keselamatan aktif (*active safety*) dalam penghapusan panas peluruhannya, dimana lebih mengandalkan kekuatan pompa pendingin untuk mempertahankan temperatur teras setelah reaktor dimatikan. Kecelakaan reaktor Fukushima Daiichi telah membuktikan bahwa disain sistem keselamatan aktif memiliki kelemahan jika suplai daya listrik ke pompa pendingin tidak ada.

Disain konseptual reaktor maju sangat bergantung pada sistem keselamatan pasif, dimana sirkulasi natural dari sistem pendingin primer dilakukan melalui efek perpindahan panas. Keuntungan sistem tersebut diantaranya adalah mampu mendinginkan inti reaktor meskipun tidak ada suplai daya listrik, keandalannya tinggi, sangat sederhana dan ekonomis [2].

Makalah ini memaparkan hasil analisis simulasi disain sistem keselamatan pasif, berupa *Reactor Vessel Auxiliary Cooling System* (RVACS) pada reaktor cepat tipe *tank* berpendingin Pb-Bi berdaya 300 MWth. Penggunaan logam cair Pb-Bi memungkinkan sisi primer reaktor beroperasi pada tekanan atmosfer dan bila dikombinasikan dengan sistem pendinginan di luar vessel akan menghilangkan risiko kecelakaan kehilangan pendingin (LOCA=*Loss of Coolant Accident*) [2].

Optimalisasi dilakukan untuk mendapatkan besar perpindahan panas yang optimal sehingga dapat meningkatkan kinerja RVACS dalam proses penghapusan panas. Optimasi dilakukan pada dua aspek disain, pertama aspek properti meliputi efek emisivitas *guard vessel* dan *perforated plate* serta efek viskositas dan konduktivitas udara. Ke dua, melakukan optimasi pada aspek geometri yang meliputi efek diameter, tinggi RVACS, dan efek lebar *channel gap*. Langkah pertama dilakukan simulasi kinerja RVACS pada disain referensi dan berikutnya dilakukan perhitungan dengan mengubah beberapa variabel yang dioptimasi.

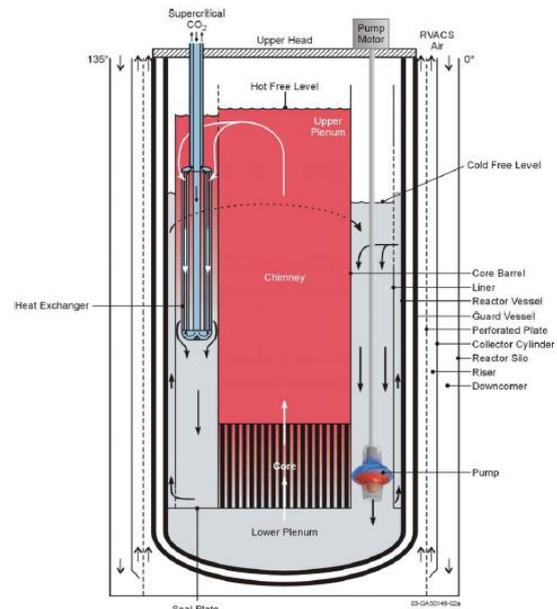
## 2. REACTOR VESSEL AUXILIARY COOLING SYSTEM (RVACS)

RVACS adalah suatu sistem pasif dari reaktor berpendingin logam cair yang dapat meredam panas ketika reaktor mengalami kecelakaan [3, 4]. Proses penghilangan panas dilakukan melalui sirkulasi natural yang mengalir melalui celah udara *guard vessel* dan dinding saluran yang

mengelilingi *guard vessel*. Panas dari reaktor dilepaskan ke atmosfer melalui *multiple stack* yang dihubungankan melalui *common inflow* dan *outflow plena*.

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 temperatur *inlet* RVACS dapat dipengaruhi juga oleh arah dan kecepatan angin [5]. Disain reaktor terdiri dari *vessel*, *interior reaktor vessel* dan *eksterior guard vessel*, yang dipisahkan oleh suatu celah yang diisi logam cair.

Disain model RVACS dapat dilihat pada Gambar 1 [6] dan penampang lintang dari RVACS diperlihatkan pada Gambar 2.

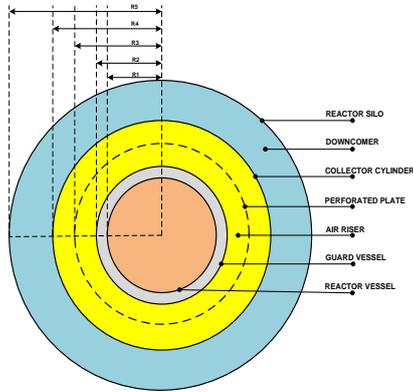


Gambar 1. Skema reaktor tipe *tank*.

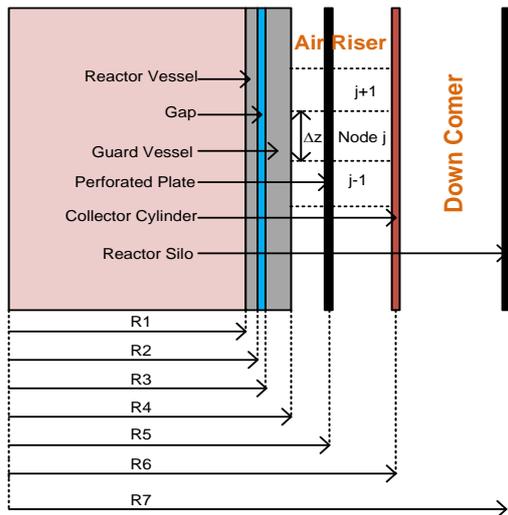
Panas dihapus oleh aliran udara yang turun dari *downcomer* kemudian naik melalui *air riser* dan ke luar melalui *chimney* yang digerakkan oleh gaya *bouyancy* yang disebabkan oleh perubahan densitas udara. Panas dikonveksikan oleh udara melalui dua permukaan, yaitu dinding luar *guard vessel* dan separator.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

Gambar 3 memperlihatkan geometri RVACS. Dalam disain RVACS ditambahkan pelat pemisah pada permukaan *guard vessel* (tetapi tidak

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



Gambar 2. Penampang lintang RVACS.



Gambar 3. Geometri RVACS.

### 3. METODE

Asumsi yang digunakan pada disain RVACS ini adalah :

- Analisis dilakukan pada keadaan tunak
- Temperatur *vessel* dan *guard vessel* dianggap konstan pada arah azimuthal.
- Separator memiliki isolasi yang sempurna.
- Koefisien perpindahan panas konveksi ( $h$ ) konstan pada arah azimuth di riser.
- Semua *inlet* dan *outlet* cerobong memiliki isolasi yang sempurna.
- Perpindahan panas konveksi antara pendingin dan dinding dalam reaktor sepenuhnya konstan.
- Temperatur pendingin bervariasi secara linier dalam arah aksial.

- Perpindahan panas yang melewati celah logam cair dimodelkan secara konduksi.
- Konduksi dan radiasi aksial diabaikan.

Mengacu pada Gambar 3, maka perhitungan perpindahan panas meliputi perpindahan panas dari *guard vessel* ke separator dihitung melalui proses radiasi menggunakan Persamaan (1).

$$\dot{Q}_{in,s} = C_G A_G (T_G^4 - T_S^4) \quad (1)$$

$A_G$  adalah luas permukaan *guard vessel*,  $T_G$  dan  $T_S$  masing-masing adalah temperatur *guard vessel* dan temperatur separator, sedangkan  $C_G$  ditentukan menggunakan Persamaan (2).

$$C_G = \sigma \left[ \frac{1}{\varepsilon_G} + \frac{A_G}{A_S} \left( \frac{1}{\varepsilon_S} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

Dimana  $\sigma$  adalah konstanta boltzman,  $\varepsilon_G$  dan  $\varepsilon_S$  masing-masing adalah emisivitas dari *guard vessel* dan separator.

Perpindahan panas dari separator ke udara dimodelkan dengan proses konveksi murni melalui Persamaan (3).

$$\dot{Q}_{out,S} = h_j A_S (T_S - T_{bulkair}) \quad (3)$$

Koefisien perpindahan panas konveksi,  $h_j$  dihitung menggunakan Persamaan (4) [5].

$$h_j = 0,0229 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4} \frac{k_{air}}{D_h} \left( \frac{T_G}{T_{air}} \right)^{-0,4} \left[ 1 + \left( \frac{z_j}{D_h} \right)^{-0,36} \right] \quad (4)$$

Total perpindahan panas yang melewati *guard vessel* dapat dihitung dengan Persamaan (5).

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

Perpindahan panas ke permukaan luar *guard vessel* dari pendingin primer dimodelkan secara konduksi. Pendekatannya melalui resistansi seri antara temperatur pendingin dan temperatur dinding luar *guard vessel* yang dirumuskan pada Persamaan (6 dan 7).

$$R_{TOT} = R_C + R_{VR} + R_{GAP} + R_{GV} \quad (6)$$

Dimana :

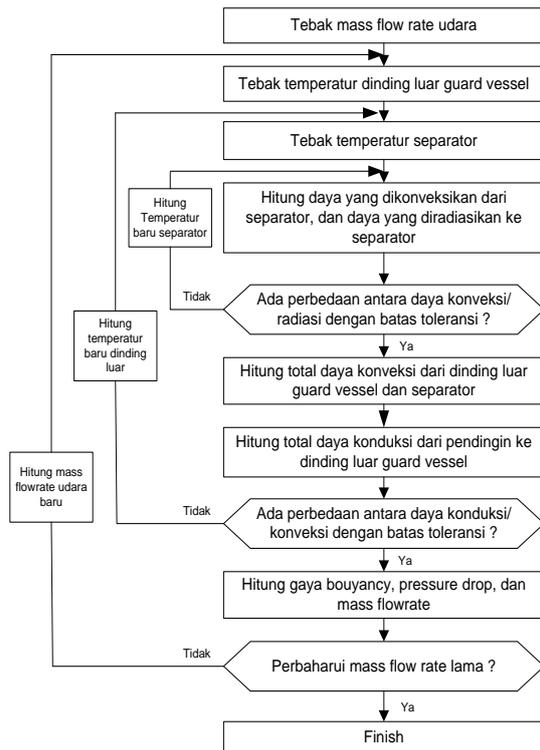
$$R_C = (h_C \pi D_1 \Delta z)^{-1}$$

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

Simbol  $k$  adalah konduktivitas termal material yang mengisi celah antara vessel reaktor dan *guard vessel*, sedang  $D_{in}$  dan  $D_{out}$  masing-masing merupakan diameter luar dan diameter dalam silinder. Perpindahan panas yang masuk ke *guard vessel* adalah ditentukan menggunakan Persamaan (8).

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

Algoritma perhitungan dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram alir perhitungan.

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Disain referensi yang digunakan sebagai bahan simulasi secara umum diperlihatkan pada Tabel 1. Analisis hanya melingkupi sebagian besar temperatur pendingin. Jika analisis menghasilkan pendinginan massal di bawah suhu maksimum *cladding*, maka disain dianggap berhasil, karena tingkatan daya peluruhan yang melintasi *cladding* sangat kecil dan ada sedikit resistansi termal antara *cladding* dan pendingin utama.

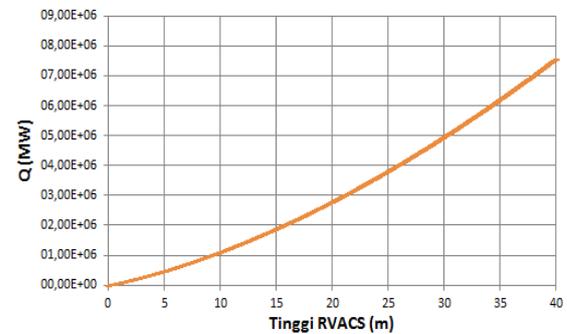
Simulasi dimulai dengan menghitung total perpindahan panas pada disain referensi dan diperoleh bahwa RVACS dapat menghapus panas sebesar 7,57 MW atau sekitar 2,52% dari total daya termal reaktor. Panas peluruhan dihapus sistem RVACS oleh sirkulasi natural dari atmosfer

di sekitar *reactor vessel* pada keadaan tunak. Model yang dianalisis mengambil asumsi bahwa koefisien transfer panas dan faktor friksi berdasarkan kasus aliran turbulen.

Tabel 1. Parameter utama disain RVACS

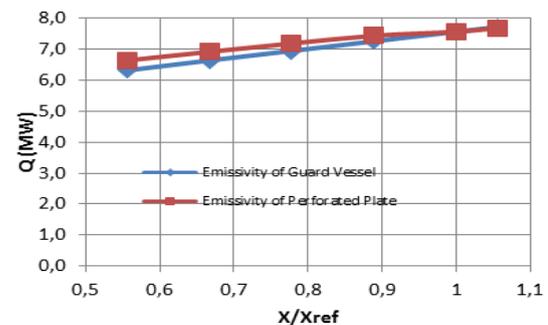
| Komponen disain                       | Nilai                             |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Daya Reaktor                          | 300 MWth                          |
| Pendingin                             | Pb-Bi                             |
| Bahan bakar                           | UO <sub>2</sub> -PUO <sub>2</sub> |
| Tinggi RVACS                          | 36 m                              |
| <i>Downcomer gap</i>                  | 5,86 m                            |
| Jari-jari dalam <i>reactor vessel</i> | 4,62 m                            |
| Ketebalan <i>reactor vessel</i>       | 0,4 m                             |
| Ketebalan <i>guard vessel</i>         | 0,1 m                             |

Hasil simulasi diperlihatkan Gambar 5.

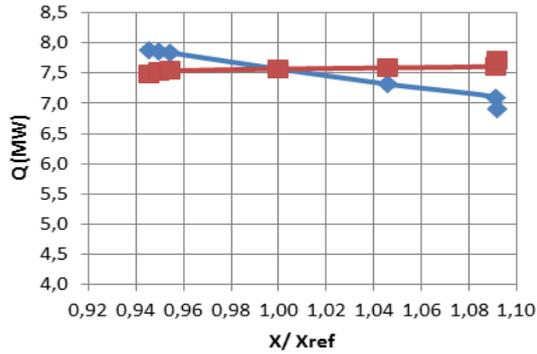


Gambar 5. Total heat removal desain referensi.

Gambar 6 dan 7 masing-masing memperlihatkan efek kinerja RVACS akibat optimasi aspek properti emisivitas *guard vessel* dan *perforated plate* serta optimasi aspek viskositas dan konduktivitas udara. Optimasi pada aspek properti emisivitas memperlihatkan terjadinya peningkatan kinerja RVACS jika nilai emisivitas *guard vessel* dan *perforated plate* mendekati 1. Optimasi properti viskositas dan konduktivitas udara tidak begitu memberikan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan daya perpindahan panas RVACS.

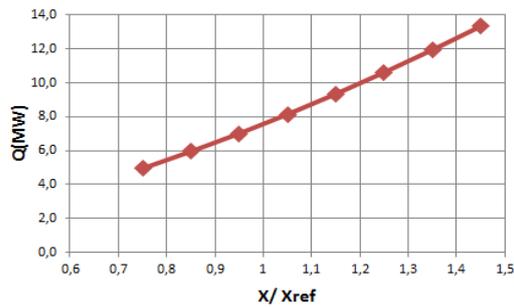


Gambar 6. Efek perubahan nilai emisivitas *guard vessel* dan *perforated plate*.

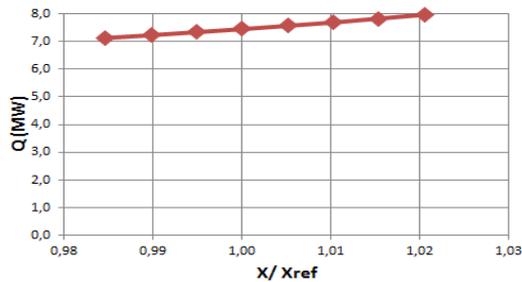


Gambar 7. Efek perubahan viskositas dan konduktivitas udara.

Gambar 8 – 10 berturut-turut memperlihatkan hasil simulasi optimasi aspek geometri RVACS. Optimasi terhadap perubahan tinggi RVACS memperlihatkan dampak yang cukup tinggi terhadap kinerja RVACS, sedangkan optimasi diameter ataupun *channel gap* tidak memberikan perubahan kinerja RVACS. Ini berarti bahwa daya perpindahan panasnya hampir sama dengan hasil simulasi pada disain referensi.

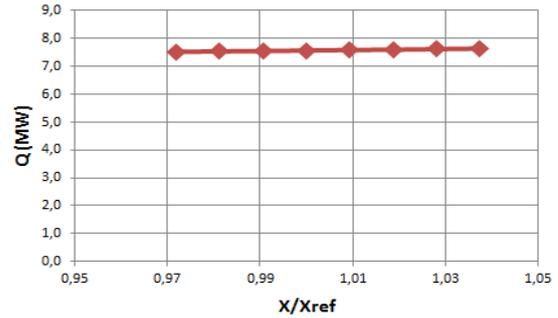


Gambar 8. Efek perubahan tinggi RVACS.

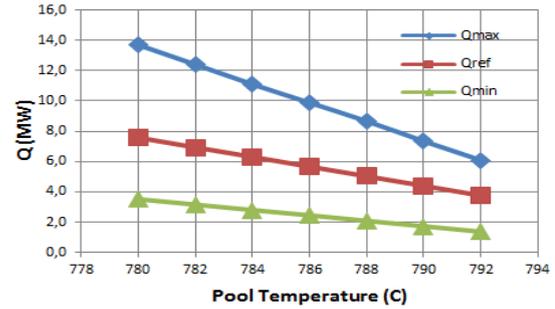


Gambar 9. Efek perubahan diameter RVACS.

Gambar 11 memperlihatkan rangkuman hasil optimasi untuk disain minimum, disain referensi dan disain maksimum. Hasil simulasi menyimpulkan bahwa disain teoritis ini mampu menghapus panas antara 1,33% sampai dengan 4,67 % dari daya termal reaktor.



Gambar 10. Efek perubahan *channel gap*.



Gambar 11. Kapabilitas penghapusan panas dari RVACS.

## 5. KESIMPULAN

Nilai perpindahan panas yang dihasilkan dari disain konseptual ini telah memenuhi syarat suatu disain sirkulasi natural akibat peran udara sekitar. Jika suatu kecelakaan menimpa reaktor maka sistem keselamatan pasif dari RVACS diharapkan dapat menghapus panas akibat peluruhan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tingkat pembuangan panas cukup dapat mencegah suhu yang tinggi asalkan RVACS memiliki sistem penghapusan panas yang handal dan efisien.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

1. LAMARS, J.R. and BARATTA, A.J., **Introduction to Nuclear Engineering**, 3<sup>rd</sup> Ed., Prentice Hall, New Jersey (2001).
2. WHITMAN, J., Design of Passive Decay Heat Removal System for The Lead Cooled Flexible Conversion Ratio Fast Reactor, Nuclear Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology (2007).
3. RAZZAQUE, M.M., RAMIN, T.H. and SPINRAD, B.I., A passive emergency cooling system for an advance LMR- The Trench Reactor, Ann. Nuclear Energy, 16 (7) (1989) 345 – 351.

4. **HEJZLAR P., BUONGIORNO, J., MACDONALD P., AND TODREAS N.**, Design strategy and constraints for medium-power lead-alloy-cooled actinide burners, *NuclearTechnology*, 147 (2004) 321-343.
5. **HEINEMAN, J., KRAIMER, M., and LOTTES, P.**, Experimental And Analytical Studies of A Passive Shutdown Heat Removal System for Advanced LMR's, Argonne National Laboratory, Illinois (1988).
6. **PETROSKI, R.C.**, Design of a 2400MW Liquid-Salt Cooled Flexible Conversion Ratio Reactor, *Nuclear Science and Engineering*, Massachusetts Institute of Technology (2008).

## 7. DISKUSI

**Nanang Triagung E H** : Apa keunggulan reaktor kecil di masa yang akan datang?

**Ade Gafar Abdullah** : Teknologi reaktor kecil sangat cocok dengan geometris negara Indonesia dan kalau terjadi kecelakaan maka efeknya tidak akan menimbulkan bahaya yang besar jika dibandingkan dengan reaktor besar.

**Teguh Subekti** : Reaktor berpendingin Timbal-Bismut ini, apakah dalam hal ini pendingin Timbal-Bismut berfungsi sebagai pendingin darurat?

**Ade Gafar Abdullah** : Pendingin Pb-Bi yang digunakan bukan bersifat darurat, tetapi sudah didesain sejak awal karena logam cair tersebut memiliki titik leleh yang cukup tinggi, sehingga reaktor memiliki kemampuan inherent jika terjadi *accident*.