

Studi Desain Reaktor Nuklir LSPR Berpendingin Pb-Bi Berbahan Bakar Uranium Alam Beserta Rancangan Analisis Ekonomis

Fran Kurnia¹, Indarta Kuncoro Aji¹, Zaki Su'ud²

¹Mahasiswa Fisika 2005 anggota Laboratorium Fisika Nuklir ITB

²Ketua KK Nuklir dan Biofisika dan kepala Laboratorium Fisika Nuklir ITB

Email : f_124_n@students.itb.ac.id

Abstrak

Reaktor nuklir tipe LSPR dengan menggunakan bahan bakar uranium alam telah dirancang dengan menggunakan program SRAC 2002. Analisis netronik dijelaskan dengan menggunakan persamaan transport neutron yang diselesaikan dengan menggunakan model persamaan difusi 2 grup 1 dimensi. Analisis *thermal hydraulic* dikerjakan dengan menggunakan persamaan konduksi termal dan hukum pendinginan Newton yang diselesaikan secara numerik dengan bantuan program MS-Exceltm. Kemudian analisis lebih lanjut mengenai terjadinya kecelakaan UTOP untuk masing-masing keadaan. Untuk analisis ekonomi telah dilakukan beberapa perhitungan untuk memprediksi harga pasokan energi listrik yang dapat ditawarkan pada konsumen. Hasil analisis netronik yang didapat menunjukkan reaktor LSPR dapat menghasilkan energi listrik sekitar 53 MWe secara efektif selama 20 tahun. Dari analisis *thermal hydraulic* diperoleh bahwa distribusi energi terbesar terdapat pada bagian tengah dari inti reaktor. Selain itu distribusi temperatur pada pendingin cenderung meningkat seiring beroperasinya reaktor. Kecelakaan yang mungkin terjadi dalam reaktor seperti UTOP, telah dianalisis dan tidak menimbulkan hasil yang fatal. Segi ekonomi didapat hasil yang berada jauh dibawah harga modal energi listrik yang dimiliki Indonesia saat ini ($\approx 0.9\$/kWh$).

Kata kunci : LSPR, UTOP, NPP Economy, Thermal Hydraulic

1. Pendahuluan

Dalam era teknologi saat ini reaktor nuklir telah menjadi penghasil listrik yang cukup menjanjikan karena mampu menghasilkan energi listrik yang aman bagi kehidupan manusia. Dengan keberadaan reaktor nuklir saat ini berpotensi untuk menggantikan pembangkit listrik lainnya yang cenderung mengabaikan polusi udara yang cukup berbahaya untuk makhluk hidup. Sebagian besar orang berpendapat bahwasanya sebuah reaktor nuklir membutuhkan peralatan yang canggih dan sangat mahal serta fisiknya yang sangat besar. Dalam prakteknya reaktor nuklir tidak selalu memiliki bentuk yang luar biasa besar. Akan tetapi dapat pula dalam bentuk yang lebih kecil. Reaktor yang memiliki bentuk yang lebih kecil dapat menyebabkan produksi energi yang lebih kecil, tetapi desain dan rancang bangunnya menjadi lebih sederhana. Reaktor nuklir dalam ukuran kecil ini biasanya disebut dengan SMR (*Small & Medium Reactor*). Beberapa penelitian tentang SMR telah dilakukan diberbagai belahan dunia karena meninjau potensi yang mampu diberikan oleh SMR. Dalam hal ini LSPR merupakan salah satu jenis SMR yang akan dikaji lebih lanjut.

Hal lain yang menarik perhatian ialah bahan pendingin (*coolant*) yang digunakan dalam reaktor LSPR ialah *Pb-Bi Eutectic*.

Dimana sebelumnya sodium (Na^{23}) diprediksi akan menjadi *coolant* yang baik. Beberapa keunggulan *Pb-Bi Eutectic* dibandingkan dengan Na^{23} ialah: (1) Reaktivitas terhadap air Na^{23} lebih besar daripada *Pb-Bi*. (2) Temperatur didih Na^{23} ($\approx 883^{\circ}C$) jauh lebih rendah dibandingkan dengan *Pb-Bi* ($\approx 1670^{\circ}C$) sehingga penanggulangan kecelakaan pada *Pb-Bi* dapat dianisipasi lebih baik. (3) Massa jenis *Pb-Bi* lebih besar (≈ 12 kali) dari massa jenis Na^{23} , sehingga viskositas *Pb-Bi* menjadi lebih besar.

Sisi lain yang menjadi perhatian khusus ialah ekonomi karena ekonomi merupakan jalur penghubung antara teknologi dengan kesejahteraan manusia. Pada dasarnya banyak negara didunia ini tidak memiliki areal yang cocok untuk reaktor yang berukuran besar. Seperti yang terdapat pada beberapa negara-negara berkembang. Jika hanya untuk suatu daerah lokal yang hanya memerlukan sedikit energi listrik, maka dalam kasus ini dapat dikikis biaya pemborosan untuk pembangunan reaktor nuklir besar. Selain itu reaktor kecil tidak membutuhkan infrastruktur yang kompleks ataupun teknisi yang sangat pandai dalam pengoperasiannya. Dengan demikian reaktor kecil dapat menjadi sebuah solusi dalam mengatasi kelangkaan energi listrik dunia.

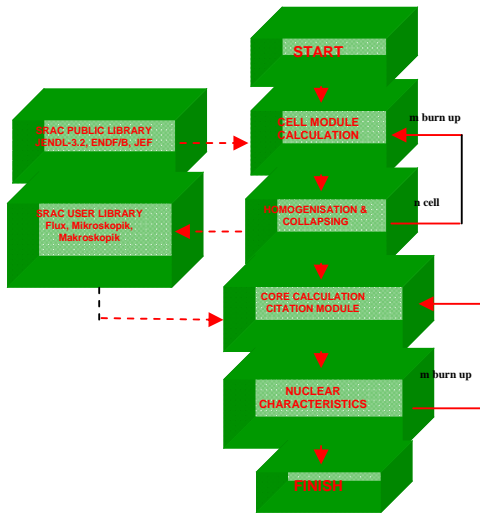
2. Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini merupakan sebuah simulasi dengan menggunakan program yang dibuat khusus untuk perancangan reaktor nuklir yaitu SRAC 2002. Sebagai langkah awal dikumpulkan data-data mengenai reaktor LSPR [ref.a] dan karakteristik dari bahan pendingin yang digunakan [ref.b]. Kemudian dengan menggunakan SRAC 2002 dapat dilakukan desain netronik dengan memecahkan persamaan difusi multigrup (dalam kasus ini hanya dibuat dalam 2 grup) sebagai berikut:

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} - \nabla D_g \nabla \phi_g + \sum_{g'=1}^G \Sigma_{g',g} \phi_{g'}(\vec{r}, t) = \sum_{g'=1}^G \nu_{g'} \Sigma_{g',g} \phi_{g'} + S_g \quad \dots (1)$$

$g=1,2,3,\dots,G$

Dengan menggunakan algoritma berikut ini diperoleh nilai *cross section* dan dengan perhitungan untuk bagian inti (*core*) reaktor yang menghasilkan nilai k_{eff} yang dapat digunakan untuk menentukan umur reaktor nuklir yang telah dirancang.



Gambar 1: Algoritma SRAC 2002

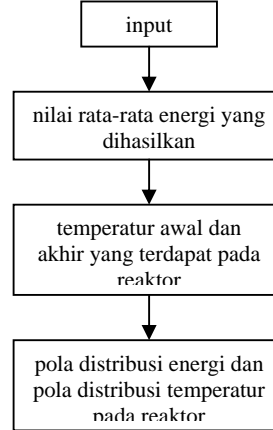
Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk analisis *thermal hydraulic* dengan menggunakan beberapa persamaan sebagai berikut:

$$\Delta T_{FUEL} = \frac{q'}{4\pi k_F} \quad \dots (2)$$

$$q'' = h_s (T_s - T_C) \quad \dots (3)$$

$$T_C = T_{inlet} + \left[\frac{\left(A \cos \left(\alpha \left(i \Delta z - \frac{H}{2} \right) \right) A_{pin-coolant} \Delta z \right)}{M_{flow} C_p} \right] \quad \dots (4)$$

Kemudian dapat disimulasikan dengan menggunakan bantuan MS-Excelltm. Berikut merupakan algoritma yang digunakan.



Gambar 2 : Algoritma analisis *thermal hydraulic*

Selanjutnya analisis kecelakaan UTOP yang dapat terjadi pada reaktor dapat dijelaskan dengan menggunakan beberapa persamaan matematis berikut ini:

$$p = 1 + \frac{-\rho_{ex}}{(\alpha_D + \alpha_{FAX} + \alpha_{RD} + \alpha_{co}) \frac{P_o A_{pin} H}{2 F_o C_p} + (\alpha_D + \alpha_{FAX}) \frac{P_o A_{pin}}{2 \pi k_{Fu} B}} \quad \dots (5)$$

Dengan bantuan MS-Excelltm dapat diperoleh hasil simulasi yang telah dilakukan.

Sebagai langkah akhir dilakukan perhitungan mengenai rancangan analisis ekonomis dengan menggunakan beberapa persamaan berikut:

$$L_{c_{max}} = \left(\frac{t}{1-t} \right) \left(\frac{L_{exp} E^{-c} dep}{E} - \left(\frac{t}{1-t} \right) \left(\frac{bi_b}{i} \right) \left(\frac{1}{E} \right) \times \left[\frac{i(1+i)^k}{(1+i)^k - 1} \right] \left[C - \frac{K.C_o}{(1+i)} + \frac{K.I.C}{(1+i)} \right] \quad \dots (6)$$

$$L_{tm} = \frac{(fixed O\&M) + [(var O\&M) \times (capacity factor)]}{E} \quad \dots (7)$$

$$L_b = \frac{F(1+i)^{ld} + \frac{B}{(1+i)^{lg+N}}}{\frac{E}{N} \left[\frac{1}{(1+i)} + \frac{1}{(1+i)^2} + \frac{1}{(1+i)^3} + \dots + \frac{1}{(1+i)^N} \right]} \quad \dots (8)$$

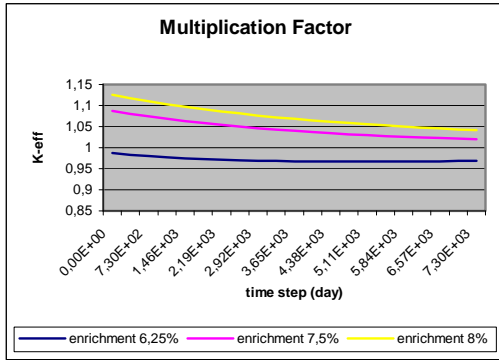
$$L_{b_{max}} = \left(\frac{t}{1-t} \right) L_b - \frac{F(1+i)^{ld} + \frac{B}{(1+i)^{lg}}}{E} \quad \dots (9)$$

$$L_{total} = L_{exp} + L_{c_{max}} + L_{tm} + L_b + L_{b_{max}} \quad \dots (10)$$

Dengan bantuan MS-Excelltm dapat diperoleh hasil simulasi yang telah dilakukan.

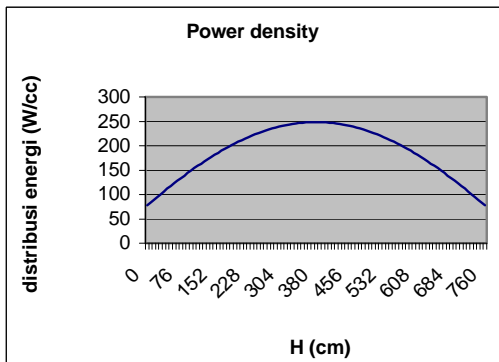
3. Hasil dan Analisis

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan maka masa waktu penggunaan reaktor yang efektif ialah selama 20 tahun (grafik 1) untuk beberapa nilai *enrichment* yang digunakan. Dalam perancangan yang telah dilakukan ditemukan kecenderungan peluruhan nilai k_{eff} yang terdapat pada reaktor.



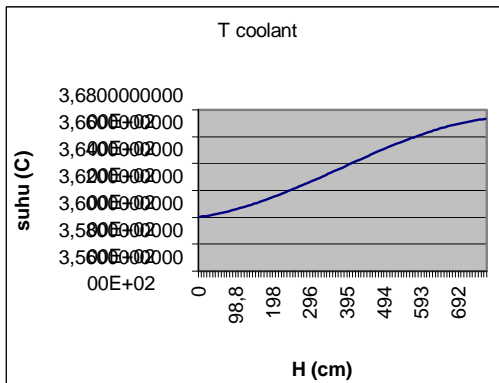
Grafik 1 memperlihatkan peluruhan k_{eff} yang terjadi dalam reaktor pada beberapa nilai *enrichment* dalam selang waktu 20 tahun

Pada bagian hasil analisis *thermal hydraulic* diperoleh hasil yang merepresentasikan alur distribusi energi secara axial (grafik 2) yang memperlihatkan kemampuan reaktor dalam memproduksi energi akan mencapai nilai maksimum ketika berada di tengah *core* suatu reaktor nuklir.



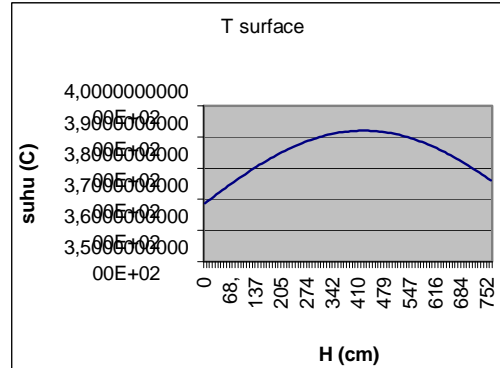
Grafik 2 memperlihatkan alur distribusi energi secara axial

Kemudian hasil yang diperoleh pada kenaikan suhu bahan pendingin (grafik 3) akan mencapai asimtot atau berada dalam keadaan stagnan setelah mencapai nilai tertentu.



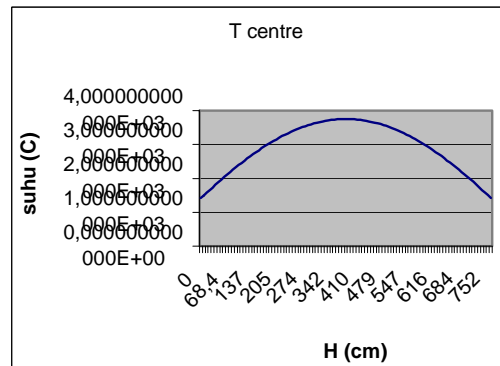
Grafik 3 memperlihatkan kenaikan temperatur yang dialami bahan pendingin dalam reaktor LSPR.

Selain daripada itu, distribusi temperatur yang terjadi pada permukaan luar (*surface*) juga mengalami kenaikan dan mencapai puncak ketika berada di sekitar bagian tengah batang bahan bakar. Kemudian mengalami penurunan yang cukup drastis setelahnya (grafik 4).



Grafik 4 memperlihatkan distribusi temperatur yang terjadi dalam reaktor secara axial.

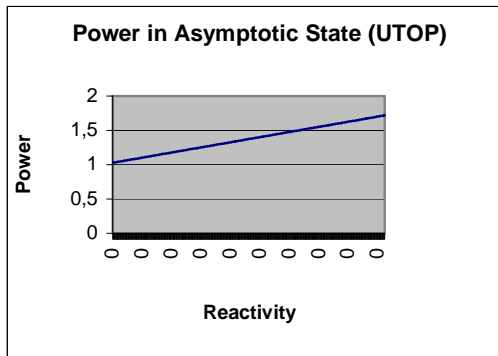
Pada bagian akhir analisis *thermal hydraulic* diperlihatkan perubahan suhu yang terjadi pada pusat reaktor itu sendiri. Hal ini sangat dipengaruhi distribusi energi yang terjadi dalam reaktor, oleh sebab itu temperatur tertinggi pada pusat reaktor akan berada pada bagian tengah yang sangat mirip dengan distribusi energi yang terdapat dalam reaktor (grafik 5).



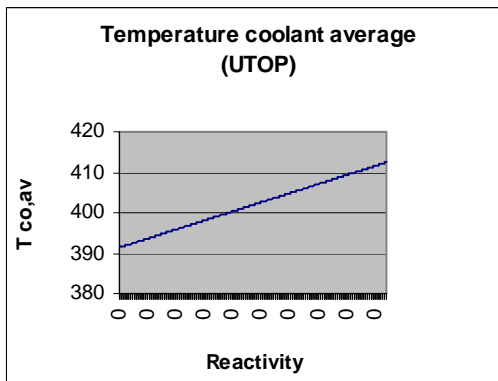
Grafik 5 memperlihatkan perubahan suhu yang terjadi dalam pusat reaktor LSPR.

Pada analisis UTOP dimana energi transien tidak lagi dapat dikontrol sepenuhnya, sehingga terjadi kenaikan yang cukup tinggi. Kenaikan energi transien (grafik 6) akan menyebabkan kenaikan suhu bahan pendingin dan bahan bakar pada waktu yang bersamaan. Kenaikan temperatur ini akan menimbulkan umpan balik negatif sebagai kompensasi kenaikan reaktivitas eksternal. Kemudian temperatur akhir bahan pendingin (grafik 7) dan temperatur akhir bahan bakar (grafik 8) akan sangat bergantung pada konstanta umpan

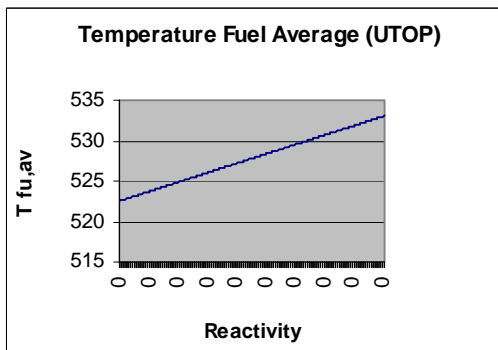
balik dan karakteristik termal seperti kapasitas panas bahan pendingin dan konduktivitas panas bahan bakar.



Grafik 6 memperlihatkan kenaikan energi transien terhadap reaktivitas yang terjadi.

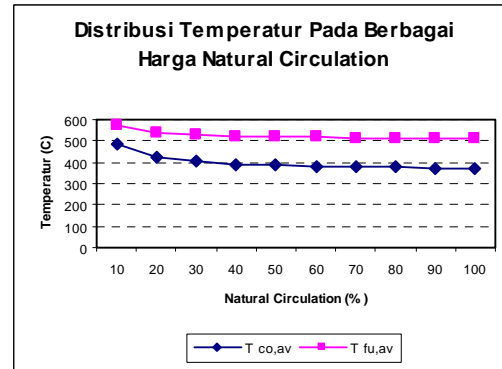


Grafik 7 memperlihatkan kenaikan temperatur bahan bakar yang terjadi dalam reaktor sebagai fungsi reaktivitas.



Grafik 8 memperlihatkan kenaikan temperatur bahan pendingin yang terjadi dalam reaktor sebagai fungsi reaktivitas.

Selain itu dapat dianalisis pula ketergantungan harga temperatur bahan bakar dan temperatur bahan pendingin terhadap sirkulasi alamiah yang terjadi di dalam reaktor LSPR. Seperti yang ditunjukkan pada grafik 9, dimana temperatur bahan pendingin dan bahan bakar tidak berubah secara signifikan setelah mengalami sirkulasi alamiah diatas 30%. Karena temperatur akhir lebih banyak bergantung pada nilai reaktivitasnya.



Grafik 9 memperlihatkan perubahan nilai rata-rata bahan bakar dan bahan pendingin terhadap nilai sirkulasi alamiah yang dimiliki reaktor.

Semua hasil perhitungan diatas telah direkapitulasi secara ekonomi dengan menggunakan beberapa persamaan ekonomi diatas. Berikut merupakan tabel hasil perhitungan biaya yang dibutuhkan dalam pembangunan reaktor LSPR:

Effective interest rate	i (\$/\$.yr)	0,04525
Return on and return of a capital investment	C (\$)	42400000
	Cu (\$/yr)	3266613,4
	E (kWh/yr)	324996000
	$Lcap$ (mills/kWh)	10,051242
Fixed charge on a capital investment	Lfc (mills/kWh)	3,9138943
Taxes on a capital investment	$Lctax$ (mills/kWh)	2,3318242
Operation and maintenance	Lom (mills/kWh)	2,2341813
Fuel cycle expenses		
Direct expenses	F (\$/yr)	1041812,3
	B (\$/yr)	192634,5
	Lb (mills/kWh)	4,2005431
Fuel taxes	$Lbtax$ (mills/kWh)	0,2828044
Total levelized power cost	$Ltotal$ (mills/kWh)	23,014489

Tabel 1 memperlihatkan hasil perhitungan ekonomi yang diprediksi dalam membangun sebuah reaktor

4. Kesimpulan

Reaktor nuklir tipe LSPR berpendingin Pb-Bi berbahan bakar uranium alam beserta racangan analisis ekonomi telah diselesaikan. Penggunaan reaktor ini mampu menghasilkan energi sekitar 50 MWe selama 20 tahun secara aman. Analisis kecelakaan terhadap reaktor ini juga memperlihatkan keselamatan yang reliabilitas terhadap aplikasinya. Rancangan ekonomi yang terstruktur telah

memperlihatkan investasi yang cukup menjanjikan.

Penggunaan reaktor berukuran lebih kecil menyebabkan beberapa faktor kompleks dapat direduksi secara maksimal tanpa mempengaruhi keamanan reaktor. Prospek dalam pengembangan reaktor-reaktor kecil masih dalam tahap berkembang. Sehingga beberapa penelitian yang tentang reaktor berukuran kecil masih dapat terus berlangsung.

5. Referensi

- a. Sekimoto, Hiroshi. et all. *A long-life small reactor for developing countries "LSPR"*. Research laboratory for nuclear reactors, TIT, Tokyo, Japan
- b. Kopelman, Bernard. *Material for Nuclear Reactor*. 1959. USA : Mc Graw-Hill Book Company, Inc.
- c. Duderstadt. et all. *Nuclear Reactor Analysis*. 1976. USA : John Wiley & Sons, Inc.
- d. Waltar, Alan E. et all. *Fast Breeder Reactor*. 1981. USA : Pergamon Press