
ANALISIS TRANSIEN PADA *FIXED BED NUCLEAR REACTOR*

M. Rizaal, A.W. Harto, Sihana
Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika,
Yogyakarta

Diterima editor 10 Agustus 2011
Disetujui untuk publikasi 26 September 2011

ABSTRAK

ANALISIS TRANSIEN PADA *FIXED BED NUCLEAR REACTOR*. Desain teras *Fixed Bed Nuclear Reactor* (FBNR) yang modular memungkinkan pengendalian daya dapat dilakukan dengan mengatur ketinggian *suspended core* dan laju aliran massa pendingin. Tujuan penelitian ini adalah mempelajari perubahan daya termal teras sebagai akibat perubahan laju aliran massa pendingin yang masuk ke teras reaktor dan perubahan ketinggian *suspended core* serta mempelajari karakteristik keselamatan melekat yang dimiliki FBNR saat terjadi kegagalan pelepasan kalor (*loss of heat sink*). Keadaan neutronik teras dimodelkan pada kondisi tunak dengan menggunakan paket program *Standard Reactor Analysis Code* (SRAC) untuk memperoleh data fluks neutron, konstanta grup, fraksi neutron kasip, konstanta peluruhan prekursor neutron kasip, dan beberapa parameter teras penting lainnya. Selanjutnya data tersebut digunakan pada perhitungan transien sebagai syarat awal. Analisis transien dilakukan pada tiga kondisi, yaitu saat terjadi penurunan laju aliran massa pendingin, saat terjadi penurunan ketinggian *suspended core*, dan saat terjadi kegagalan sistem pelepasan kalor. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini menunjukkan bahwa penurunan laju aliran massa pendingin sebesar 50%, dari kondisi normal, menyebabkan daya termal teras turun 28% dibanding daya sebelumnya. Penurunan ketinggian *suspended core* sebesar 30% dari ketinggian normal menyebabkan daya termal teras turun 17% dibanding daya sebelumnya. Sementara untuk kondisi kegagalan sistem pelepasan kalor, daya termal teras mengalami penurunan sebesar 76%. Dengan demikian, pengendalian daya pada FBNR dapat dilakukan dengan mengatur laju aliran massa pendingin dan ketinggian *suspended core*, serta keselamatan melekat yang handal pada kondisi kegagalan sistem pelepasan kalor.

Kata Kunci: FBNR, transien, daya, laju aliran massa, *suspended core*

ABSTRACT

TRANSIENT ANALYSIS ON THE *FIXED BED NUCLEAR REACTOR*. Modular in design enables *Fixed Bed Nuclear Reactor* (FBNR) power controlled by the adjustment of *suspended core* and coolant flow rate. The main purposes of this paper are to learn the change of thermal power caused by the change of *suspended core* height and coolant flow rate, and also to learn the inherent safety when loss of heat sink condition prevailed. The Core was modelled on steady condition by using *Standard Reactor Analysis Code* (SRAC) to obtain neutron flux, group constants, delayed neutron fraction, delayed neutron precursor decay constants, and several core parameters. These data will be used as initial value on the transient calculations. Transient analysis was conducted on the following conditions: coolant flow rate changes, *suspended core* height changes and loss of heat sink occurs. The calculated result showed that when the coolant flow rate is 50% decreased, thermal power of FBNR is 28% decreased. When *suspended core* height is 30% decreased, thermal power of FBNR is 17% decreased. Meanwhile, thermal power at loss of heat sink condition is 76% decreased. Therefore, the adjustment of *suspended core* height and coolant flow rate can control thermal power of FBNR, and FBNR's inherent safety is reliable at loss of heat sink condition.

Keywords: FBNR, transient, power, flow rate, *suspended core*.

PENDAHULUAN

Jumlah populasi dunia diperkirakan akan meningkat dari sekitar 6,1 miliar orang pada tahun 2000 menjadi 8,9 miliar orang pada tahun 2050 [1]. Seiring terjadinya pertumbuhan penduduk Bumi, maka meningkat pula jumlah kebutuhan akan energi. Namun pilihan proses pembangkitan dan penggunaan energi yang digunakan saat ini, dapat menyebabkan kerusakan lingkungan yang berkelanjutan dan memberikan konsekuensi terhadap perubahan iklim global sehingga perlu dikembangkan proses pembangkitan dan penggunaan sumber daya energi yang bersih, aman, dan ekonomis serta mampu menyediakan energi dalam jumlah yang besar. Beberapa pilihan energi yang ramah lingkungan dengan teknologi yang telah terbukti antara lain: energi surya, angin, *hydro*, bioenergi, dan nuklir.

Energi nuklir yang diproduksi dari PLTN yang ada di dunia saat ini mampu memenuhi 13,4% kebutuhan listrik dunia, dengan total kapasitas 377 GWe [2]. General Conferences (GC(44)/RES/21) IAEA pada tahun 2002 mengeluarkan sebuah program yang memberikan paradigma baru terhadap pengembangan reaktor nuklir, yang bernama *International Project on Innovative Reactor and Fuel Cycle* (INPRO) [3].

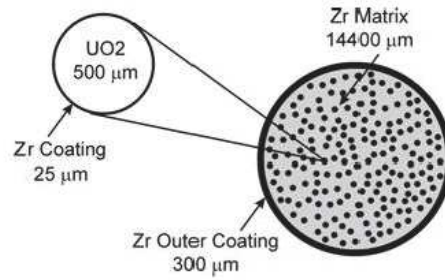
Salah satu dari beberapa reaktor yang dikembangkan yang memenuhi standar INPRO adalah *Fixed Bed Nuclear Reactor* (FBNR). FBNR memiliki desain yang kecil dan sederhana, ketahanan proliferasi, aman, ekonomis, dan berkelanjutan. Penelitian yang dilakukan pada FBNR hingga tahun 2010 baru mencapai tahap mencari bahan bakar yang tepat dengan kritikalitas dan burn up untuk tipe CERMET yang mampu beroperasi tanpa refuelling selama lebih dari 8 tahun [4] dan perhitungan termohidrolik reaktor [5]. Sementara penelitian yang terkait pengendalian reaktor dan keselamatan belum dilakukan. Oleh karena itu, pada mekalah ini akan disajikan hasil analisis yang berkaitan dengan analisis transien saat terjadi kecelakaan, seperti penurunan laju aliran massa pendingin, saat terjadi penurunan ketinggian *suspended core*, dan saat terjadi kegagalan sistem pelepasan kalor. Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan karakteristik perubahan daya termal teras sebagai akibat perubahan laju aliran massa pendingin yang masuk ke teras reaktor dan perubahan ketinggian *suspended core* serta mempelajari karakteristik keselamatan melekat yang dimiliki FBNR saat terjadi kegagalan pelepasan kalor (*loss of heat sink*).

DASAR TEORI

Fixed Bed Nuclear Reactor

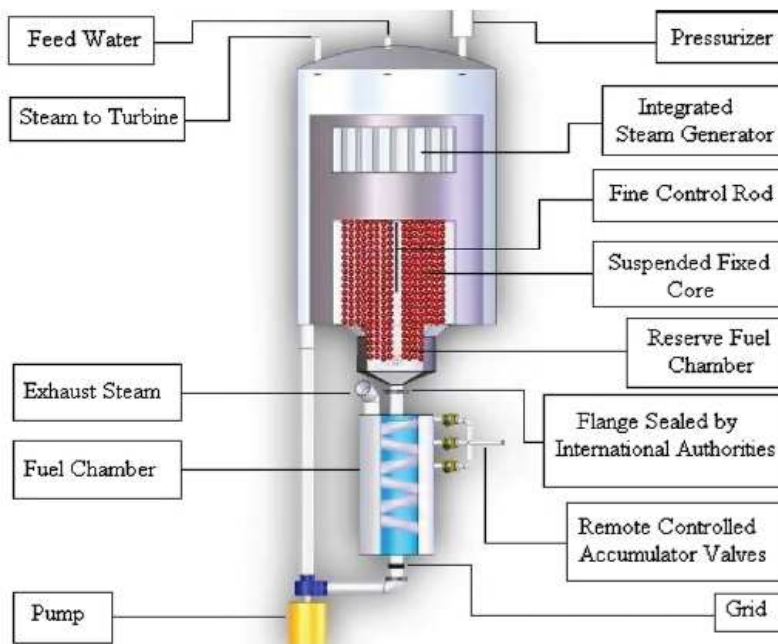
Fixed Bed Nuclear Reactor merupakan reaktor inovatif dengan daya kecil (70 MWe) yang dikembangkan berdasarkan INPRO-IAEA. FBNR adalah reaktor yang menggabungkan teknologi *Pressurized Water Reactor* (PWR) dengan teknologi *High Temperature Gas Reactor* (HTGR). Secara keseluruhan FBNR menggunakan teknologi PWR, namun pada bahan bakar digunakan teknologi HTGR.

Bahan bakar berbentuk bola dengan tipe TRISO adalah bahan bakar yang diusulkan pada awal penelitian FBNR [6]. Namun dengan fakta yang ada saat ini, adanya keterbatasan didalam teknologi pembuatan elemen bahan bakar dengan matriks grafit yang belum memuaskan, maka bahan bakar untuk FBNR yang diusulkan selanjutnya adalah tipe CERMET [4] seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 1. Hal ini dikarenakan terdapat keraguan pada perilaku SiC dengan pendingin air yang berada di lingkungan dengan tingkat radiasi tinggi.



Gambar 1. Elemen bahan bakar FBNR [4]

Pada reaktor FBNR, bahan bakar berada di dalam ruang bahan bakar (*fuel chamber*) yang kemudian dengan aliran pendingin yang melalui *fuel chamber* tersebut bahan bakar dialirkan menuju teras reaktor membentuk *suspended core* seperti ditunjukkan dalam Gambar2. Laju aliran massa pendingin hingga dapat mempertahankan bahan bakar membentuk *suspended core* adalah 1060 kg/s [5]. Ketinggian dari *suspended core* dapat disesuaikan untuk mengatur jumlah bahan bakar yang masuk dengan pembatas ketinggian teras (*core level limiter*) yang mampu bergerak naik dan turun. Ketinggian normal yang diusulkan adalah 200 cm dengan diameter dalam 31 cm dan diameter luar 171 cm untuk bahan bakar UO_2 tipe CERMET dengan pengkayaan 9%, yang mampu bertahan 8 tahun tanpa *refuelling* [4]. Namun untuk bahan bakar TRISO diusulkan teras memiliki ketinggian 235 cm untuk bahan bakar UO_2 dengan tingkat pengkayaan 17,8%, yang mampu bertahan 10 tahun tanpa *refuelling*[7].



Gambar 2. Fixed bed nuclear reactor (FBNR) [6]

Fraksi volum untuk elemen bahan bakar dan pendingin di teras adalah 0,6 dan 0,4. Dengan nilai ini maka terdapat sekitar 1,5 juta elemen bahan bakar yang membentuk *suspended core* pada ketinggian 200 cm. Data teknis reaktor FBNR ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Data teknis utama *fixed bed nuclear reactor* (FBNR) [4]

Daya netto reaktor (MW _e)	70	Tinggi teras (cm)	200
Daya termal reaktor (MW _{th})	218	Diameter dalam (cm)	31
Volum pendingin (m ³)	10	Diameter luar (cm)	171
Temperatur pendingin masuk (°C)	290	Volume teras (m ³)	4,78
Temperatur pendingin keluar (°C)	326	Elemen bahan bakar di dalam teras (ton)	23,2
Temperatur pendingin rerata (°C)	308	UO2 di dalam teras (ton)	11,5
Temperatur operasi bahan bakar (°C)	354		

Analisis Transien pada FBNR

Analisis transien yang digunakan di dalam penelitian ini menggunakan penelitian yang telah dilakukan di reaktor *Passive Compact Molten Salt* (PCMSR) [8]. Analisis dilakukan pada parameter laju aliran bahan bakar, laju aliran pendingin, dan kegagalan pelepasan kalor yang mempengaruhi daya reaktor dan temperatur rerata bahan bakar dan pendingin. Penelitian tersebut berhasil membuktikan bahwa pengendalian daya pada PCMSR dapat dilakukan dengan mengendalikan laju aliran bahan bakar dan pendingin dan PCMSR memiliki karakter keselamatan melekat yang baik.

Pemodelan Netronik FBNR Pada Kondisi Transien

Pemodelan netronik pada penelitian ini menggunakan pendekatan kinetika reaktor titik (*point reactor kinetics*). Dalam pendekatan ini diasumsikan reaktor mempunyai komposisi yang homogen dan kegayutan terhadap ruang dan waktu dapat dipisahkan baik fluks neutron maupun konsentrasi prekursor neutron. Persamaan difusi pada FBNR dapat dituliskan sebagai berikut [9]:

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_{g,z}}{\partial t} = -D_g B^2 \phi_{g,z} - \sum_{a \neq g} \Sigma_{a,g} \phi_{g,z} + (1-\beta) \chi_g \sum_{g=1}^G v_g \sum_{f \neq g} \zeta_{z,f} \phi_{f,z} + \chi_g \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i - \sum_{g=1}^G \sum_{s \neq g} \Sigma_{s \rightarrow g} \phi_{g,z} + \sum_{g'=1}^G \sum_{s \neq g'} \Sigma_{s \rightarrow g'} \phi_{g',z} \quad (1)$$

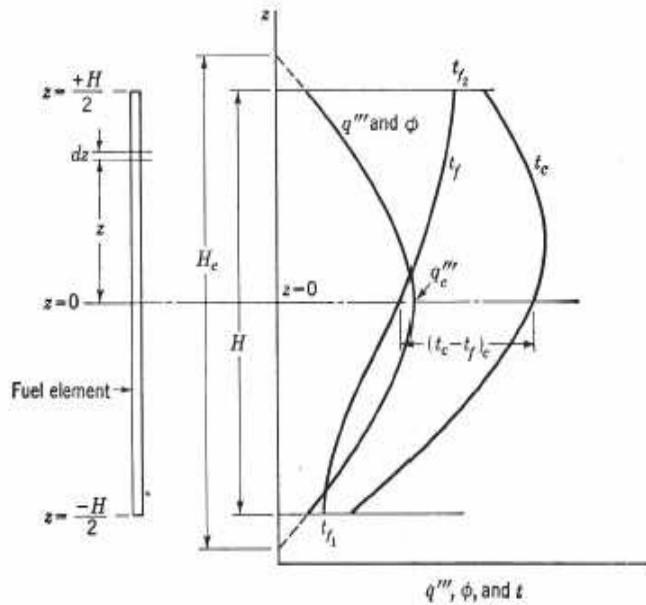
Dalam hal ini, Φ , D , B , Σ , β , λ , χ , v , v dan C masing-masing menyatakan fluks neutron, koefisien difusi neutron, *buckling*, tampang lintang interaksi neutron, fraksi neutron kasip, konstanta peluruhan precursor neutron kasip, fraksi neutron hasil fisi dengan energi pada kelompok tertentu, jumlah neutron rerata yang dihasilkan tiap reaksi fisi, kecepatan neutron dan konsentrasi precursor neutron kasip. Indeks s , f dan a masing-masing menyatakan jenis reaksi yaitu hamburan, fisi dan absorpsi. Indeks g dan h menyatakan kelompok neutron berdasarkan energi sedangkan indeks i menyatakan kelompok prekursor neutron kasip.

Dengan mengasumsikan bahwa prekursor neutron tidak berdifusi sebelum meluruh maka persamaan untuk konsentrasi prekursor neutron kasip sebagai berikut [9]:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -\lambda_i C_i + \beta_i \sum_{q=1}^G v_q \sum_{f,q} \zeta_{f,q} \Phi_q \quad (2)$$

Distribusi Temperatur Aksial Teras

Temperatur pendingin yang masuk kedalam reaktor akan bervariasi terhadap ketinggian teras sebagaimana pada Gambar 3.



Gambar 3. Sketsa distribusi temperatur aksial *cladding* dan pendingin [10]

Distribusi fluks neutron dan densitas daya termal teras diasumsikan sinusoidal (pola sinus/kosinus).

$$q''' = q'''_{A,MAX} \cos \frac{\pi z}{H_e} \quad (3)$$

Dalam hal ini, q''' menyatakan laju pembangkitan kalor per satuan volume, z menyatakan posisi aksial dihitung dari bidang tengah teras, H adalah tinggi teras aktif dan H_e menyatakan tinggi teras dengan memperhitungkan panjang ekstrapolasi. Persamaan temperatur pendingin (T_c) adalah,

$$T_c = T_{c1} + \frac{q'''_{A,MAX} A_F H_e}{m c_p c \pi} \left(\sin \frac{\pi z}{H_e} + \sin \frac{\pi H}{2 H_e} \right) \quad (4)$$

Pada persamaan ini A_F adalah luas penampang ekuivalen bahan bakar, m adalah laju aliran pendingin dan T_{c1} adalah suhu masukan pendingin. Persamaan temperatur bahan bakar (T_f) adalah,

$$T_f = T_c + \frac{q_F}{4\pi} \left(\frac{1}{2k_F R} + \frac{1}{k_F} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R+c} \right) + \frac{1}{(R+c)^2 h} \right) \quad (5)$$

Dengan R adalah jari-jari ekuivalen bahan bakar, c adalah tebal lapisan *coating* bahan bakar, h adalah koefisien transfer kalor dari permukaan luar *coating* bahan bakar ke pendingin, k_F adalah konduktivitas termal bahan bakar.

Koefisien Transfer Kalor

Perhitungan koefisien transfer kalor pada FBNR menggunakan korelasi Whitaker untuk memperoleh bilangan Nusselt (Nu) dengan persamaan sebagai berikut [5],

$$Nu = 2 + \left(0,4 Re \frac{1}{2} + 0,06 Re \frac{2}{3} \right) Pr^{0,4} \left(\frac{\mu}{\mu_g} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

Korelasi ini valid untuk bilangan Reynolds (Re) dalam rentang $3,5 \leq Re \leq 80000$ dan bilangan Prandtl (Pr) dalam rentang $0,7 \leq Pr \leq 380$ [11]. Semua data termohidrolik pada korelasi Whitaker ditentukan berdasarkan temperatur pendingin T_c , sedangkan μ_s adalah viskositas pendingin yang diukur pada temperatur permukaan *coating*. Selanjutnya koefisien transfer kalor dapat ditentukan dengan persamaan [11]:

$$h = \frac{Nuk_c}{D} \quad (7)$$

dengan D adalah diameter ekivalen saluran pendingin dan k_c adalah konduktivitas pendingin

Pemodelan Transfer Energi Transien pada FBNR

Pemodelan transfer energi pada keadaan transien dilakukan dengan menggunakan neraca energi sebagaimana pada perhitungan distribusi temperatur zona bahan bakar, *coating*, dan pendingin, namun keadaan gayut waktu pada persamaan tersebut diperhitungkan di pemodelan ini.

Neraca energi pada bahan bakar (zona bahan bakar + *coating*) dapat ditentukan dengan,

$$\frac{\partial T_F}{\partial t} = \left(q_F^m - \frac{3(T_F - T_c)}{R^2 \left(\frac{1}{2k_F R} + \frac{1}{k_c \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R+c} \right)} \right)} + \frac{1}{h(R+c)^2} \right) \frac{1}{\phi_F} \quad (8)$$

$$\text{atau } \frac{\partial T_F}{\partial t} = \left(q_F^m - \frac{3(T_F - T_c)}{R^2 \left(\frac{1}{2k_F} + \frac{1}{k_F \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R+c} \right)} + \frac{1}{h(R+c)^2} \right)} \right) \frac{1}{\phi_F} \quad (9)$$

dengan,

$$\phi_F = \rho_F c_{vc} + \left(\rho_F \frac{\delta c_{vF}}{\delta T_F} + c_{vF} \frac{\delta \rho_F}{\delta T_F} \right) \quad (10)$$

Neraca energi untuk pendingin dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{1}{\phi_c H} \left(\frac{m}{4hR^2} (c_{vc} T_c - c_{vc,m} T_{c2}) - \frac{3h(R+c)^2 (T_F + T_c)}{R^2} H \right) \quad (11)$$

dengan,

$$\phi_c = \rho_F c_{vc} + T_c \left(\rho_F \frac{\delta c_{vF}}{\delta T_F} + c_{vF} \frac{\delta \rho_F}{\delta T_F} \right) \quad (12)$$

$$H = \int_{\frac{M}{Z}}^{\frac{M}{Z}} \cos \frac{\pi s}{He} ds \quad (13)$$

Pada persamaan 8 hingga persamaan 12, c_p menyatakan kalor jenis pada tekanan konstan dan ρ menyatakan densitas massa. Indeks F menyatakan bahan bakar dan indeks F menyatakan bahan bakar sedangkan indeks C menyatakan pendingin

Persamaan Reaktivitas pada FBNR

Perubahan temperatur material reaktor selama kondisi transien akan memberikan dampak pada tampang lintang resonansi, yang dikenal sebagai pelebaran Doppler[9]. Kondisi ini akan mengakibatkan reaktor memiliki reaktivitas yang positif atau negatif. Penelitian FBNR sebelumnya [7] menunjukkan bahwa koefisien reaktivitas bahan bakar dan pendingin reaktor adalah negatif. Dengan demikian kenaikan temperatur bahan bakar akan menurunkan daya reaktor. Perubahan reaktivitas (ρ) terhadap waktu (t) dapat ditentukan dengan,

$$\frac{d\rho}{dt} = \alpha_F \frac{dT_F}{dt} + \alpha_c \frac{dT_c}{dt} \quad (14)$$

dengan α_F, α_c adalah koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar dan pendingin.

Pelaksanaan Penelitian

Pemodelan bahan bakar FBNR pada paket program SRAC menggunakan modul PIJ [12]. Pada modul ini bahan bakar dimodelkan dalam bentuk bola berlapis dengan tipe CERMET yaitu partikel bahan bakar hanya dilapisi oleh satu lapisan Zirkonium dan dimasukkan ke dalam matriks Zirkonium serta dilapisi lagi dengan Zirkonium sehingga membentuk *micro fuel element*. Untuk menunjukkan bahwa terdapat partikel berlapis di dalam zona bahan bakar MFE maka pada perhitungan di modul PIJ digunakan metode double heterogenity. Metode ini pada prinsipnya membedakan bahan bakar menjadi sel mikro dan sel makro. Pemodelan selanjutnya adalah pemodelan teras reaktor dengan menggunakan modul CITATION [12].

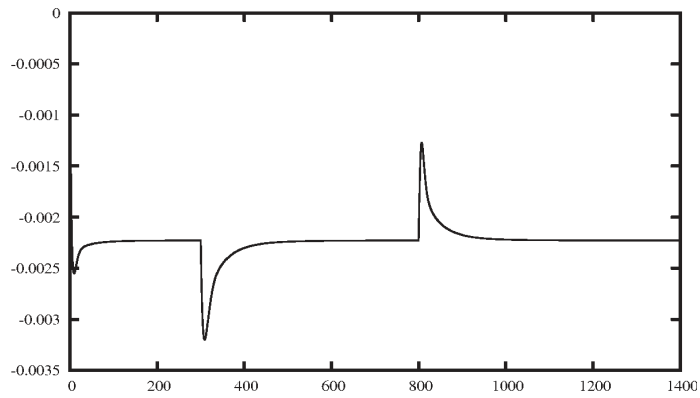
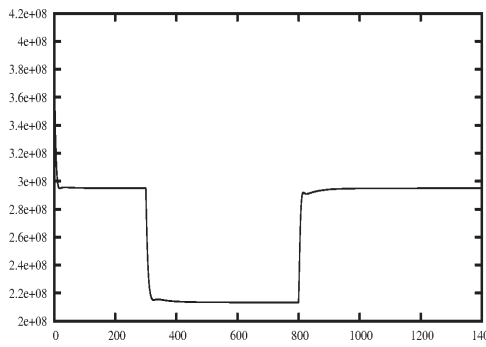
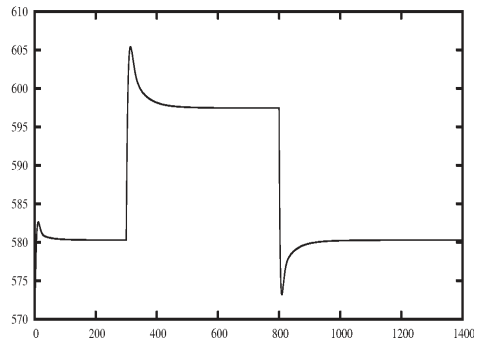
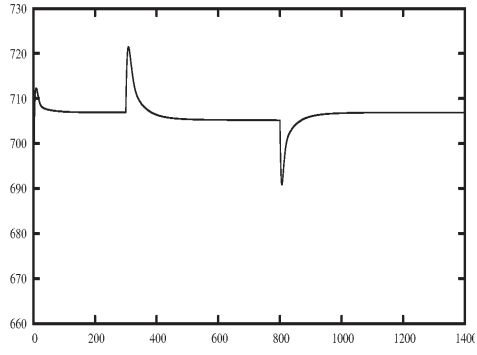
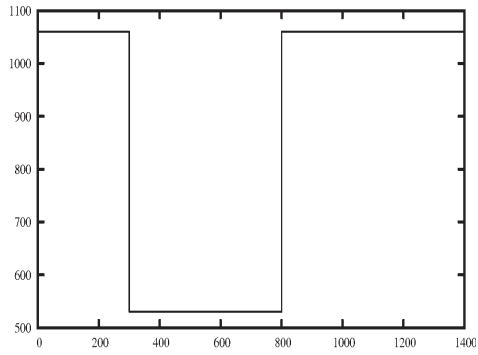
Beberapa asumsi yang digunakan pada modul ini adalah teras dianggap tanpa batang kendali dan fluks neutron konstan terhadap perubahan sudut. Kemudian dengan asumsi yang dibentuk maka teras reaktor dimodelkan menjadi $\frac{1}{2}$ teras berbentuk silinder (R-Z). Penggunaan modul CITATION bertujuan untuk memperoleh data fluks neutron, konstanta grup, fraksi neutron kasip, konstanta peluruhan prekursor neutron kasip, dan beberapa data penting lainnya.

Selanjutnya data-data yang diperoleh dari keluaran SRAC beserta data termohidrolis FBNR digunakan pada paket program dalam bahasa pemrograman Python untuk mengetahui beberapa parameter reaktor saat kondisi transien. Persamaan-persamaan yang melibatkan persamaan diferensial dengan initial *value problem* diselesaikan dengan metode adaptif Runge-Kutta [13].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Laju Aliran Pendingin Terhadap Daya Reaktor

Reaktor dikondisikan mengalami penurunan laju aliran massa pendingin yang masuk ke dalam teras. Kondisi ini diperoleh dengan memberikan input undak (*step input*) laju aliran massa pendingin pada paket program yang telah dibuat. Pada 300 sekon pertama aliran pendingin berada pada kondisi normal, kemudian dari detik ke-300 hingga sekon ke-800 diberikan gangguan berupa penurunan laju aliran massa pendingin sebesar 50% dan dikembalikan ke kondisi normal pada waktu selanjutnya. Hasil yang diperoleh berupa daya termal teras, temperatur rerata bahan bakar, temperatur rerata pendingin, dan reaktivitas akibat perubahan laju aliran massa pendingin ditunjukkan pada Gambar 4.



bakar dan pendingin yang dicapai adalah 721,45 K dan 605,39 K. Temperatur rerata bahan bakar tidak melebihi kondisi kecelakaan untuk bahan bakar tipe CERMET yaitu 873,15 K [14] dan temperatur pendingin tidak melebihi temperatur saturasi sebesar 620,15 K [11].

Sementara itu, dengan penurunan laju aliran massa pendingin sebesar 50% dari laju aliran pendingin kondisi operasi normal, menyebabkan daya reaktor FBNR turun menjadi 28% dibanding daya sebelumnya. Selanjutnya ketika laju aliran kembali ke kondisi normal maka daya reaktor kembali pada daya semula.

Pengaruh Ketinggian *Suspended Core* Terhadap Daya Reaktor

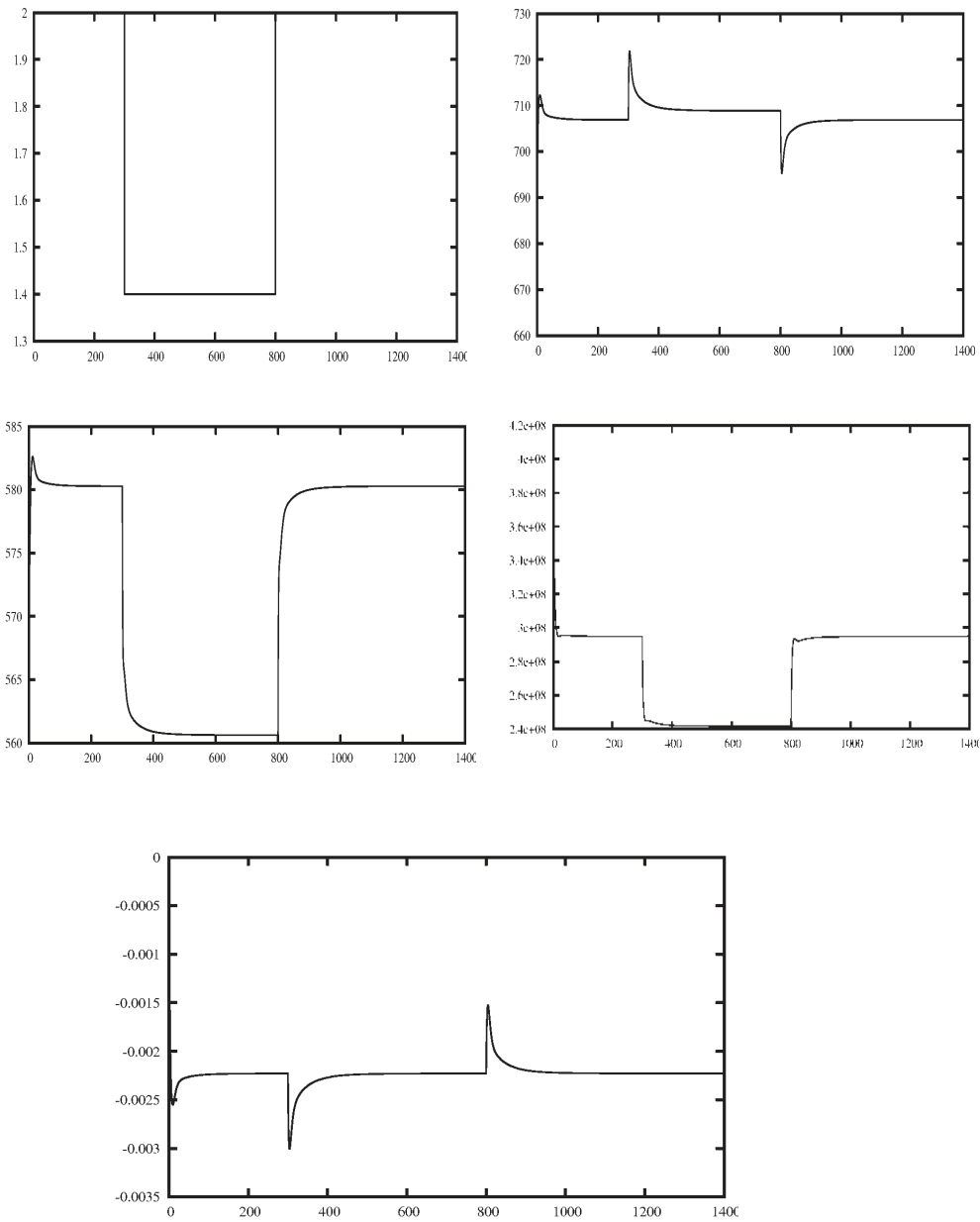
Pengaruh ketinggian *suspended core* ditunjukkan pada Gambar 5. Pada kondisi normal, FBNR memiliki ketinggian teras, *suspended core*, sebesar 200 cm. Ketinggian teras dapat diatur dengan bantuan *core level limiter* pada bagian atas teras, yang mampu bergerak naik dan turun. Reaktor kemudian dikondisikan mengalami penurunan ketinggian teras. Kondisi ini diperoleh dengan memberikan input undak (*step input*) ketinggian di dalam paket program. Ketinggian teras diturunkan menjadi 30% dari ketinggian sebelumnya pada detik ke-300 dan kemudian dikembalikan lagi pada ketinggian teras sebelumnya pada sekon ke-800.

Penurunan ketinggian kolom *suspended core* pada FBNR dapat menyebabkan kenaikan suhu rerata bahan bakar. Keadaan ini disebabkan oleh berkurangnya volum pendingin di teras untuk transfer kalor dari bahan bakar. Peningkatan ini memberikan umpan balik reaktivitas negatif yang menyebabkan penurunan daya reaktor. Selanjutnya hal ini akan berdampak pada penurunan temperatur rerata bahan bakar hingga kembali ke kondisi operasi normal. Sedangkan temperatur rerata pendingin mengalami penurunan ketika terjadi penurunan ketinggian *suspended core*, dikarenakan pengurangan jumlah bahan bakar yang dapat masuk ke teras sehingga kalor yang ditransfer ke pendingin menurun. Temperatur rerata maksimum bahan bakar yang dicapai adalah 721,29 K. Nilai ini masih dibawah temperatur leleh bahan bakar tipe CERMET [14].

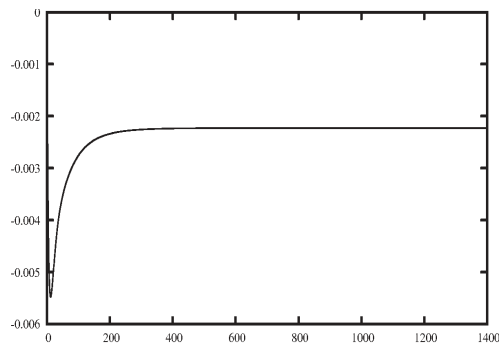
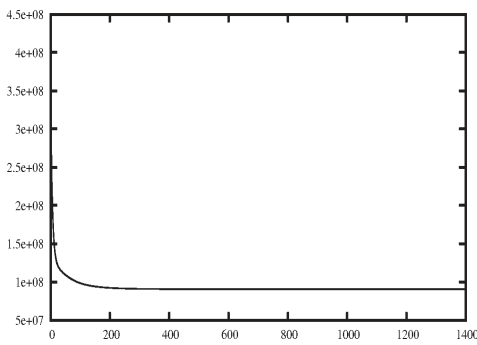
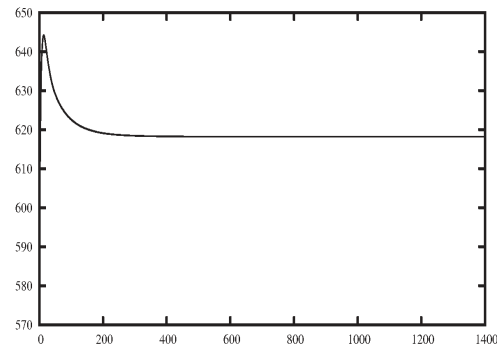
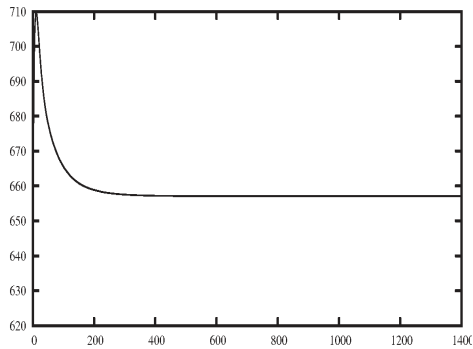
Penurunan ketinggian kolom *suspended core* sebesar 30% dari ketinggian pada kondisi operasi normal, menyebabkan daya reaktor FBNR turun menjadi 17% dari daya sebelumnya. Selanjutnya ketika ketinggian kembali ke kondisi normal maka daya reaktor kembali pada daya semula.

Pengaruh Kegagalan Sistem Pelepasan Kalor Terhadap Daya Reaktor

Reaktor FBNR dapat mengalami kegagalan pelepasan kalor ketika turbin tidak bekerja secara normal yang akan mengakibatkan terganggunya transfer kalor pada pembangkit uap (*steam generator*). Kondisi ini menyebabkan temperatur pendingin yang masuk dan keluar dari teras menjadi sama. Pada penelitian ini reaktor akan dikondisikan mengalami kegagalan sistem pelepasan kalor dengan mengatur input temperatur pendingin dalam paket program sama baik yang keluar dan masuk teras reaktor sebesar 578,7 K.



yang terjadi pada reaktor sebesar 76% selama gangguan. Di samping itu, diketahui bahwa saat terjadinya kegagalan pelepasan kalor reaktor FBNR mampu memberikan respon yang cepat terhadap perubahan tersebut. Hal ini ditunjukkan dengan nilai reaktivitas sebesar $-0,0054721 \Delta k/k$ yang dicapai pada detik ke-11 sebelum akhirnya kembali normal pada detik ke-500. Hasil ini memberikan gambaran bahwa FBNR memiliki karakteristik keselamatan yang baik bila terjadi kegagalan sistem pelepasan kalor.



DAFTAR PUSTAKA

1. Population Division. World population to 2300. United Nations Department of Economic and Social Affairs. Available from:URL: <http://www.un.org/esa/population/publications/longrange2/WorldPop2300final.pdf>. Accessed 25 April 2011.
2. World Nuclear Association. Nuclear power in the world today. Available from:URL:<http://www.world-nuclear.org/info/inf01.html>. Accessed 25 April 2011.
3. Methodology for the Assessment of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles. Dokumen teknis, IAEA-TECDOC-1434, International Atomic Energy Agency, Vienna; 2004.
4. Sümer Şahin, Hacl Mehmet Şahin, dan Adem Acir. Criticality and burn up evolutions of the fixed bed nuclear reactor with alternative fuels. *Energy Conversion and Management*, 51:1781-1787; 2010.
5. Ioannes Tessaro dan Farhang Sefidvash. Thermohydraulics Calculations of FBNR. Dokumen teknis, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
6. Sümer Şahin dan Farhang Sefidvash. "The Fixed Bed Nuclear Reactor Concept". *Energy Conversion and Management*, 49:1902-1909; 2008.
7. Wahyuni. Studi Netronik dan Keselamatan Fixed Bed Nuclear Reactor (FBNR) Menggunakan Paket Program SRAC. Skripsi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta; 2006.
8. M. Markus Imron. Analisis Transien pada Passive Compact Molten Salt Reactor (PCMSR). Skripsi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2010.
9. James J. Duderstadt dan Louis J. Hamilton. *Nuclear Reactor Analysis*. John Wiley & Sons, Inc., New York; 1976.
10. M. M. El-Wakil. *Nuclear Power Engineering*. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York; 1962.
11. Yunus A. Cengel. *Heat and mass transfer: A Practical Approach*. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York; 2006.
12. Keisuke Okumura, Teruhiko Kugo, Kunio Kaneko, dan Keichiro Tsuchihashi. SRAC (Ver.2002); The comprehensive neutronics calculation code system. Japan Atomic Energy Research Institute; 2002.
13. Jaan Kiusalaas. *Numerical methods in engineering with python*. Cambridge University Press, New York; 2005.
14. D.J. Senior, C.L. Painter, K.J. Geelhood, D.W. Wootan, G.H. Meriwether, J.M. Cuta, H.E. Adkins, D.W. Matson, dan C.P. Abrego. A new innovative spherical cermet nuclear fuel element to achieve an ultra-long core life for use in grid-appropriate LWRs. Dokumen teknis, PNNL-16647, Pacific Northwest National Laboratory, Washington; 2007.