

## ANALISIS NEUTRONIK TERAS PWR DENGAN PENDINGIN AIR SUPERKRITIS DENGAN BAHAN BAKAR URANIUM OKSIDA

Andang Widi Harto

Staf Pengajar Teknik Nuklir Universitas Gadjah Mada Yogyakarta (andang\_widi\_harto@mailcity.com)

Ferhat Aziz

Pusbang Sistem Reaktor Maju - BATAN

Muhammad Kunta Biddinika

Mahasiswa S-1 Teknik Nuklir Universitas Gadjah Mada

### ABSTRAK

Telah dilakukan analisis neutronik teras reaktor tipe PWR dengan tekanan superkritis. Tujuan penelitian ini adalah untuk melakukan analisis secara neutronik pada desain teras reaktor yang pendingin sistem primernya bertekanan superkritis, memiliki kemampuan inherent safety, serta efisiensi penggunaan bahan bakar yang tinggi. Penelitian ini menggunakan program SRAC. Reaktor ini terdiri dari 37 perangkat bahan bakar PWR Westinghouse dengan susunan pin 17 x 17. Bahan bakarnya  $UO_2$  dan memakai air ringan ( $H_2O$ ) sebagai moderator sekaligus fluida pendingin. Teras reaktor yang dihasilkan memiliki tinggi 150,5 cm serta diameter ekuivalen 150,5 cm. Teras dibagi menjadi 3 daerah radial dengan pengkayaan bahan bakar yang berbeda. Sedangkan secara aksial dibagi menjadi 6 daerah untuk menentukan densitas pendingin di setiap daerah aksial termasuk juga parameter perpindahan panasnya. Tekanan sistem primer sebesar 25 MPa. Daya yang digunakan pada teras simulasi ini adalah 210 MWt. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kekritisan teras didapatkan pada pengkayaan 5%, 3,329%, dan 1,234% untuk kondisi BoL dengan nilai k-efektif sebesar 1,094572. Teras memiliki koefisien suhu bahan bakar negatif demikian pula dengan koefisien suhu moderator. Dilakukan juga simulasi untuk 2 kejadian yang mengarah kepada kecelakaan reaktor, yaitu kegagalan pengambilan panas sistem primer oleh sistem sekunder dan berkurangnya laju aliran pendingin sistem primer. Hasilnya menunjukkan bahwa k-efektif teras mengalami penurunan cukup drastis tatkala terjadi kedua kejadian tersebut.

**Kata kunci:** PWR, tekanan superkritis, sistem primer integral, inherent safety

### ABSTRACT

A neutronic analysis of supercritical water-cooled power reactor has been done. The objective of the research is to perform an analysis from neutronic point of view to the design of reactor core that having coolant fluid of supercritical light-water, having inherent safety, and high efficiency on fuel utilization. The research used SRAC simulation computer code. The reactor consists of 37 PWR Westinghouse fuel assemblies with 17 x 17 fuel pins array. The fuel is  $UO_2$ . Light (ordinary) water serves as both moderator and coolant. The reactor core has a dimension of 150,5 cm of equivalent diameter and 150,5 cm of height. The core is divided into 3 radial zones with different fuel enrichment region. In axial direction, the core is divided into 6 zones for determining both density of coolant and heat transfer parameters on each axial zones. Pressure in primary system is 25 MPa. Power rate of the reactor is 210 MWt. The result of calculation indicates that core criticality is achieved on enrichment level of 5%, 3,329%, and 1,234% for BoL condition. The value of k-effective is 1,094572. The core configuration is also fulfill neutronic safety criteria. Those are having negative coefficient temperature of both fuel and moderator. Simulations are also performed on 2 events leading to reactor accidents. Those are failure on heat removal from primary system to secondary system and decreasing of primary coolant flow rate. The simulations results indicate that k-effective of the core experiences sharp drop when those events are happening.

**Keywords :** PWR, supercritical pressure-condition, integral primary-system, inherent safety

### PENDAHULUAN

Pembangunan PLTN dengan model reaktor modular integral berukuran kecil-sedang (*Small-Medium Reactor, SMR*) merupakan pilihan yang

terbaik. Disamping mengurangi biaya dan waktu konstruksi, juga lebih mudah ditranportasikan serta sederhana penyusunannya dalam PLTN (U.S.DOE, 2001).

Pengembangan disain reaktor saat ini bertujuan untuk mengoptimalkan reaktor yang sudah ada dengan beberapa modifikasi. Disain reaktor lanjut/maju (*advanced*) diantaranya diarahkan pada penyederhanaan disain sehingga mengurangi biaya fabrikasi, peningkatan nilai keselamatan, peningkatan efisiensi pembangkitan, serta mengurangi limbah nuklir yang dihasilkannya. Kesederhanaan ini akan memungkinkan pendeknya waktu konstruksi. Kecenderungan ini terutama dipengaruhi oleh keinginan untuk mengurangi biaya untuk modalnya (UIC, 2003). Kesederhanaannya diakomodasikan dengan disain integral sistem primer reaktor-reaktor generasi ketiga dan seterusnya. Dewasa ini ada beberapa disain reaktor yang dikembangkan yang menandai kecenderungan ini yaitu reaktor generasi keempat (*Generation IV Nuclear Energy System*).

Selain pengembangan reaktor integralnya, pemilihan tekanan operasi superkritis memungkinkan untuk meningkatkan efisiensi termal, mengurangi daya pompa teras reaktor, serta mengurangi beberapa komponen perlakuan uap.

Berangkat dari dua modifikasi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk memberikan analisis neutronik disain reaktor yang sesuai. Disain ini diharapkan menjadi salah satu model yang dipertimbangkan dalam pembangunan PLTN di Indonesia.

Disain teras reaktor ini disesuaikan agar mendukung konsep reaktor integral. Oleh karenanya ukurannya cukup kecil sehingga dapat diintegrasikan ke dalam sistem primernya. Sistem primernya pun dirancang berukuran yang tidak terlalu besar sehingga mudah ditransportasikan dan mengurangi biaya pembuatan dan pemasangannya, serta mengurangi ukuran kontainmen reaktor (Buongiomo, 2002).

Ukuran teras yang kecil diharapkan mampu memenuhi kebutuhan pembangkit listrik berukuran dan berdaya kecil yang dibutuhkan Indonesia. Terutama di daerah luar Jawa yang kebutuhan listriknya kurang dari 100 MWe dan letaknya jauh dari jaringan listrik (Su'ud, 2003)

## KOMPOSISI DAN KONFIGURASI TERAS KRITIS

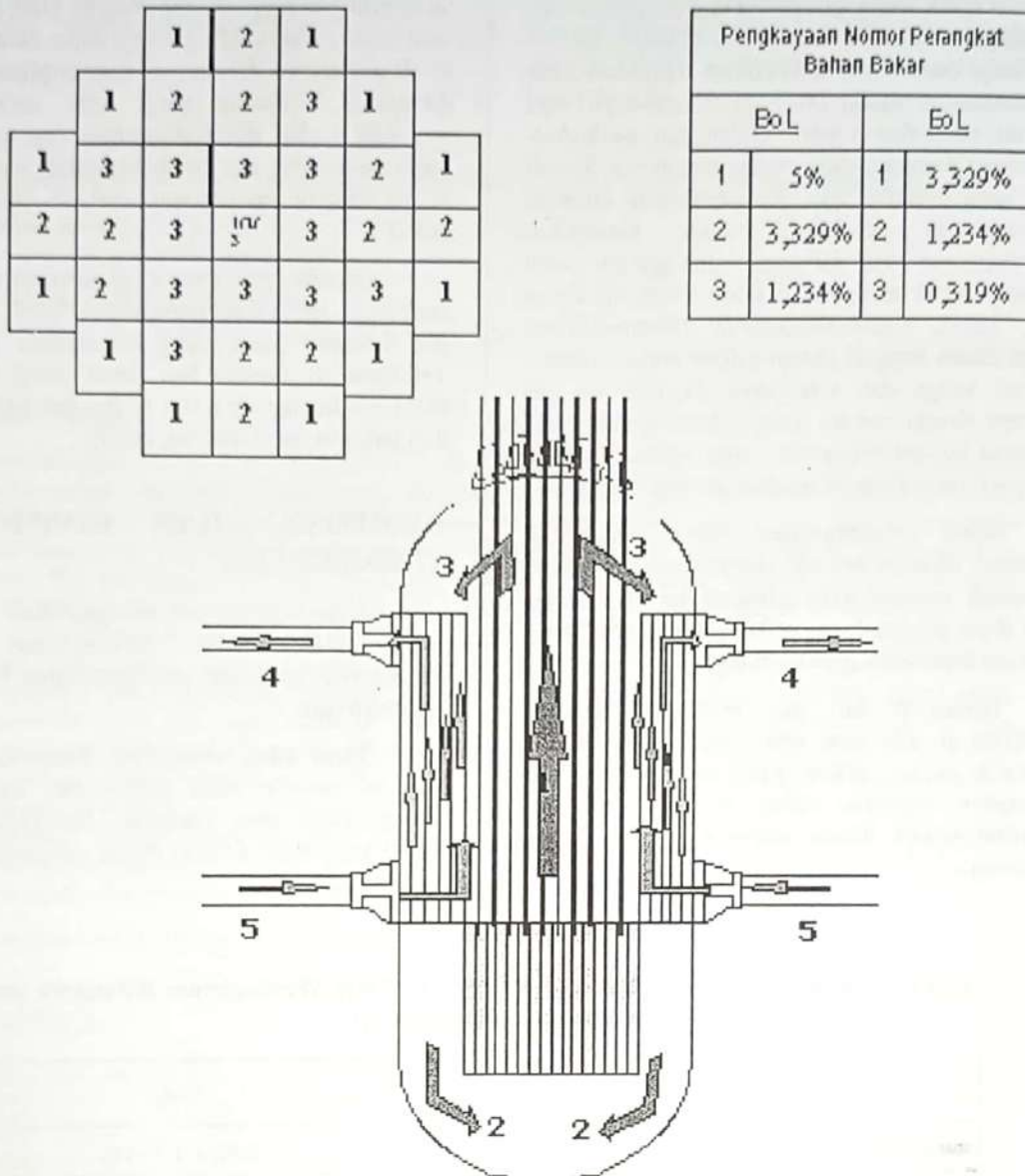
Teras reaktor ini menggunakan perangkat bahan bakar PWR *Westinghouse*. Berikut karakteristik teknis dari perangkat bahan bakar PWR *Westinghouse*.

Teras yang diinginkan didapatkan dengan analisis *burn-up* pada pengkayaan bahan bakar paling tinggi yang mungkin. Pengkayaan paling tinggi yang akan dipakai dalam komposisi teras ini adalah 5%.

Tabel 1. Karakteristik Perangkat Bahan Bakar PWR *Westinghouse* (Glasstone dan Sesonke, 1981; Okumura, *et.al.*, tanpa tahun).

Material bahan bakar	UO <sub>2</sub>	
Dimensi Pelet (diameter dan tinggi)	0,82 x 1,35 cm	
Assembly Array	17 x 17	
Material Kelongsong bahan bakar ( <i>fuel cladding</i> )	Zircaloy-2	
	Sn 1,5 %	Ni 0,05 %
	Fe 0,14 %	N 0,08 %
	Cr 0,09 %	O 0,13 %
Jarak antar perangkat bahan bakar ( <i>assembly pitch</i> )	30,4 cm	
Jarak antar pin bahan bakar ( <i>rod pitch</i> )	1,26 cm	
Diameter terluar kelongsong bahan bakar ( <i>outer diameter</i> )	0,95 cm	
Tebal kelongsong bahan bakar ( <i>cladding thickness</i> )	0,65 mm	





#### Keterangan skema

- 1, 3. aliran primer dari teras menuju elemen penukar panas
2. aliran primer dari elemen penukar panas menuju teras reaktor
4. aliran sekunder (uap) dari elemen penukar panas menuju turbin (*hot leg*)
5. aliran sekunder (cair) dari turbin menuju elemen penukar panas (*cold leg*)

Gambar 1. Konfigurasi Teras Reaktor, Skema Reaktor, serta Arah Aliran Pendingin.

Jumlah 37 perangkat bahan bakar ini merupakan jumlah terkecil yang paling memungkinkan untuk memenuhi 3 daerah pengkayaan seperti pada PWR Westinghouse komersial lainnya. Tiga daerah pengkayaan ini dimaksudkan untuk membuat profil fluks neutron termal pada teras menjadi lebih datar (Sesonke, 1973). Susunan 37 perangkat ini mem-

berikan diameter teras ekuivalen sebesar 150,5 cm. Oleh karenanya, tinggi reaktor pun diambil sama dengan diameternya (Lamarsh, 1966).

Teras reaktor yang dihasilkan dari penelitian ini memiliki karakteristik yang disajikan dalam bentuk Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik Teras PWR Superkritis.

Daya termal	210 MWt
Tinggi aktif teras (tinggi pin bahan bakar)	150,5 cm
Diameter teras (ekuivalen)	150,5 cm
Jumlah perangkat bahan bakar	37
Pengkayaan	3 daerah
Pendingin	Air ringan ( <i>ordinary/light water</i> ) H <sub>2</sub> O
Tekanan sistem	25 MPa
Laju aliran massa pendingin	255,8375 kg/detik
Suhu masukan pendingin	325 °C
Suhu keluaran pendingin	400 °C
Periode <i>refueling</i>	950 hari (2,5 tahun 20 hari)
Disain <i>burn-up</i>	82.000 MWD/ton
Tipe batang kendali	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Batang kendali <i>Shutdown</i>,</li> <li>- batang kendali kompensasi (<i>compensating rods</i>),</li> <li>- batang kendali pengatur daya (<i>regulating rods</i>)</li> </ul>

## KRITIKALITAS TERAS

Kritikalitas dihitung dengan membagi teras menjadi 6 (enam) daerah aksial untuk mengakomodasikan perubahan densitas pendingin dari *inlet* teras di bagian bawah menuju ke *outlet* di bagian atasnya (lihat Gambar 1). Beda densitas akibat beda suhu ini berpengaruh pada parameter neutronik dan termohidrolik teras. Keenam daerah tersebut dapat diketahui suhu pendinginnya dari perhitungan entalpinya.

Setelah suhu pendingin di tiap daerah aksial ditentukan, suhu kelongsong dan pelet di tiap daerah aksial juga dapat ditentukan. Variasi suhu dan densitas tersebut membuat parameter-parameter  $k_f$ ,  $k_c$ , dan  $h$  juga bervariasi terhadap suhu (Ma, 1983; Incropera dan DeWitt, 1990; El-Wakil, 1978).

Perhitungan dengan program komputer SRAC mendapatkan k-efektif teras sebesar 1,094572 untuk teras awal (*beginning of life, BoL*) dan 1,001314 untuk teras akhir (*end of life, EoL*). Baik pada EoL maupun BoL-nya sedikit di atas kondisi kritis ( $k = 1$ ) agar teras mampu menaikkan dayanya pada kondisi EoL sekalipun. k-efektif untuk kondisi BoL yang lebih tinggi daripada kondisi EoL-nya

akan dikompensasi dengan masuknya batang kendali kompensasi. Pada kondisi BoL, batang kendali ini akan masuk (*inserted*) dengan prosentase maksimalnya ke dalam teras reaktor. Sejalan dengan beroperasinya reaktor, sedikit demi sedikit batang kendali kompensasi diangkat sehingga prosentase masuknya berkurang juga sedikit demi sedikit.

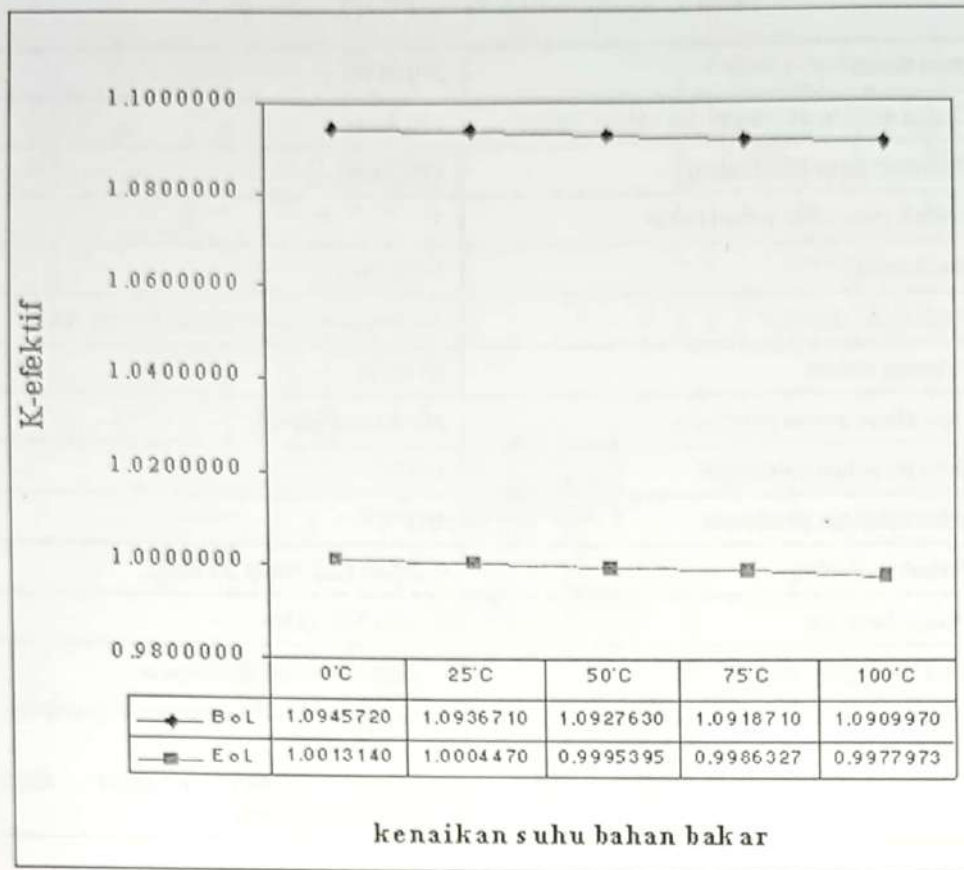
Setelah komposisi kritis teras didapatkan, maka akan dicari koefisien suhu bahan bakar dan moderator. Selain itu akan dikaji juga gangguan pada aliran pendingin sistem primer dan pada pengambilan panas oleh sistem sekunder

## KOEFISIEN SUHU BAHAN BAKAR

Koefisien suhu bahan bakar dihitung berdasarkan penurunan k-efektif teras yang disebabkan kenaikan suhu bahan bakar saja. Pada perhitungan ini, k-efektif teras dihitung untuk tiap kenaikan suhu bahan bakar sebesar 25 °C. Data k-efektif diambil untuk 5 (lima) tingkat kenaikan suhu.

Grafik penurunan faktor perlipatan efektif teras seiring dengan kenaikan suhu bahan bakar diberikan dalam Gambar 2.





Gambar 2. Grafik pengaruh kenaikan suhu bahan bakar pada faktor perlipatan efektif.

Reaktor ini memiliki koefisien suhu bahan bakar yang negatif, artinya setiap kenaikan suhu bahan bakar menyebabkan turunnya k-efektif teras. Penurunan ini akan mengurangi jumlah reaksi fisi yang terjadi selanjutnya. Hal ini akan mengurangi populasi neutron dalam teras reaktor. Turunnya populasi neutron akan menurunkan juga daya reaktor. Akibatnya kenaikan suhu bahan bakar akan menurunkan daya reaktor. Hal tersebut tentu akan turut menurunkan suhu teras reaktor juga. Teras reaktor dengan demikian menjamin keselamatannya sendiri (*inherent safety*).

## KOEFISIEN SUHU MODERATOR

Koefisien suhu moderator dihitung berdasarkan penurunan k-efektif teras yang disebabkan oleh kenaikan suhu pendingin saja. Dalam penelitian ini, penghitungan dilakukan tidak dengan menaikkan suhu pendingin namun dengan menaikkan entalpi pendingin. Kenaikan entalpi pendingin kemudian digunakan untuk menghitung suhunya pada tekanan operasi reaktor yaitu 25 MPa. Kenaikan suhu yang

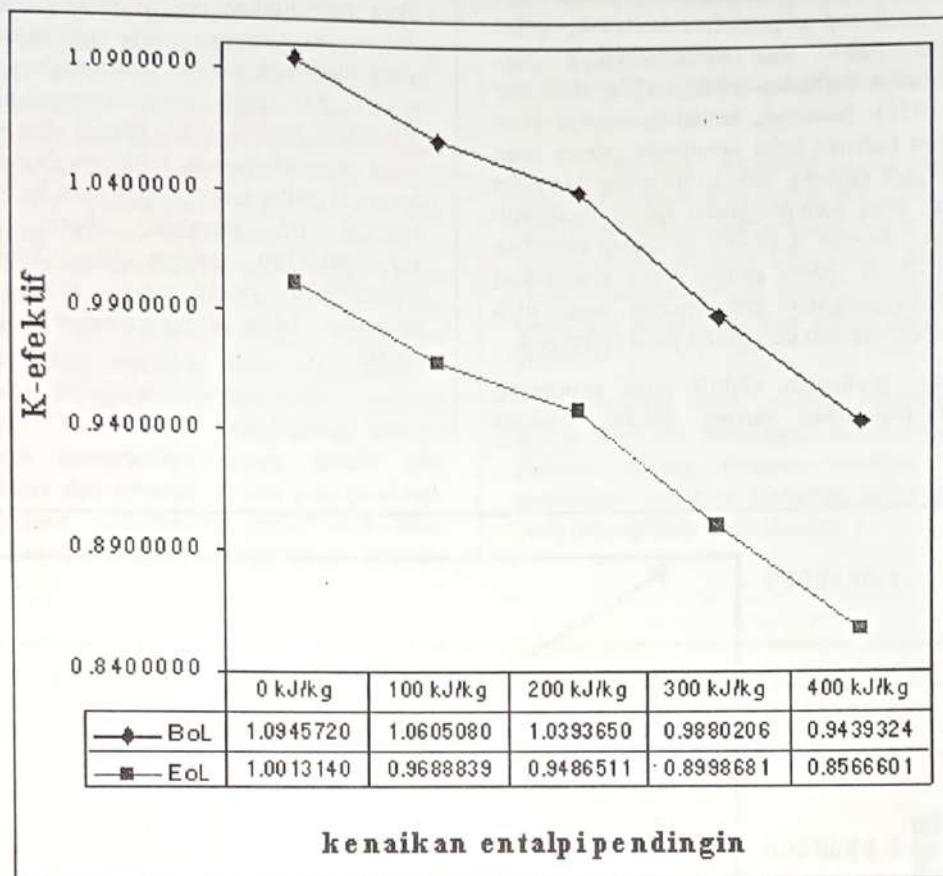
mengikuti kenaikan entalpi inilah yang digunakan sebagai dasar penghitungan koefisien suhu moderator.

Pada perhitungan ini kenaikan suhu yang terjadi pada pendingin tidak diikuti dengan kenaikan suhu pada bahan bakar dan kelongsongnya. Perhitungan ini diharapkan dapat dipakai untuk mengetahui nilai koefisien suhu moderator. Variasi suhu pendingin juga akan membuat densitas pendingin juga bervariasi.

Variasi suhu dan densitas pendingin tersebut digunakan untuk mengetahui perubahan k-efektif terhadap perubahan suhu pendingin. Reaktor ini memiliki koefisien suhu moderator yang negatif. Artinya setiap kenaikan suhu moderator akan menyebabkan turunnya k-efektif teras. Penurunan ini akan mengurangi jumlah reaksi fisi yang terjadi selanjutnya. Hal ini akan mengurangi populasi neutron dalam teras reaktor. Turunnya populasi neutron akan menurunkan juga daya reaktor. Akibatnya kenaikan suhu bahan bakar akan menurunkan daya reaktor. Hal tersebut tentu akan turut menurunkan suhu teras reaktor juga. Teras

reaktor dengan demikian menjamin keselamatannya sendiri (*inherent safety*).

Pada Gambar 3 disajikan grafik penurunan faktor perlipatan efektif teras seiring dengan meningkatnya entalpi moderator.



Gambar 3. Grafik pengaruh kenaikan entalpi pendingin pada faktor perlipatan efektif untuk menghitung koefisien suhu moderator.

### Gangguan Pengambilan Panas (*Heatsink Problem*)

Kegagalan dapat terjadi pada pengambilan panas sistem primer oleh sistem sekunder. Kegagalan ini diakibatkan oleh hilangnya pendingin pada sistem sekunder dan hilangnya aliran pada sistem sekunder. Kedua kejadian (*event*) ini akan menyebabkan gangguan pengambilan panas dari sistem primer reaktor. Sehingga pendingin sistem primer akan terus mengalami kenaikan entalpi dan tidak mengalami penurunan tatkala melewati sistem sekundernya. Hal ini menjadikan pendingin yang melewati teras terus mengalami kenaikan entalpi.

Penelitian ini mensimulasikan pendingin sistem primer yang terus mengalami kenaikan entalpi selama melewati teras reaktor. Kenaikan entalpi yang diambil adalah sebesar 100 kJ/kg.

Kenaikan entalpi ini akan menyebabkan kenaikan suhu pendingin. Suhu pendingin yang naik ini akan diikuti dengan naiknya suhu kelongsong dan suhu pelet bahan bakar. Oleh karenanya, perhitungan k-efektif untuk keperluan penyelidikan ini turut memperhitungkan perubahan suhu kelongsong bahan bakar dan suhu pelet bahan bakar. Dengan digunakannya air biasa (*light water*) sebagai pendingin teras, maka perubahan suhu pendingin ini akan menyebabkan pula perubahan densitas pendingin (Çengel dan Boles, 1989). Selain densitasnya, air juga mengalami perubahan pada kekentalannya (*viscosity*), konduktivitas panasnya, dan kapasitas panasnya pada tekanan tetap ( $C_p$ ). Perubahan parameter-parameter di atas akan merubah pula bilangan Reynolds dan bilangan Prandtl yang akan mempengaruhi koefisien konveksi ( $h$ ) pendingin (Incropera dan DeWitt, 1990).

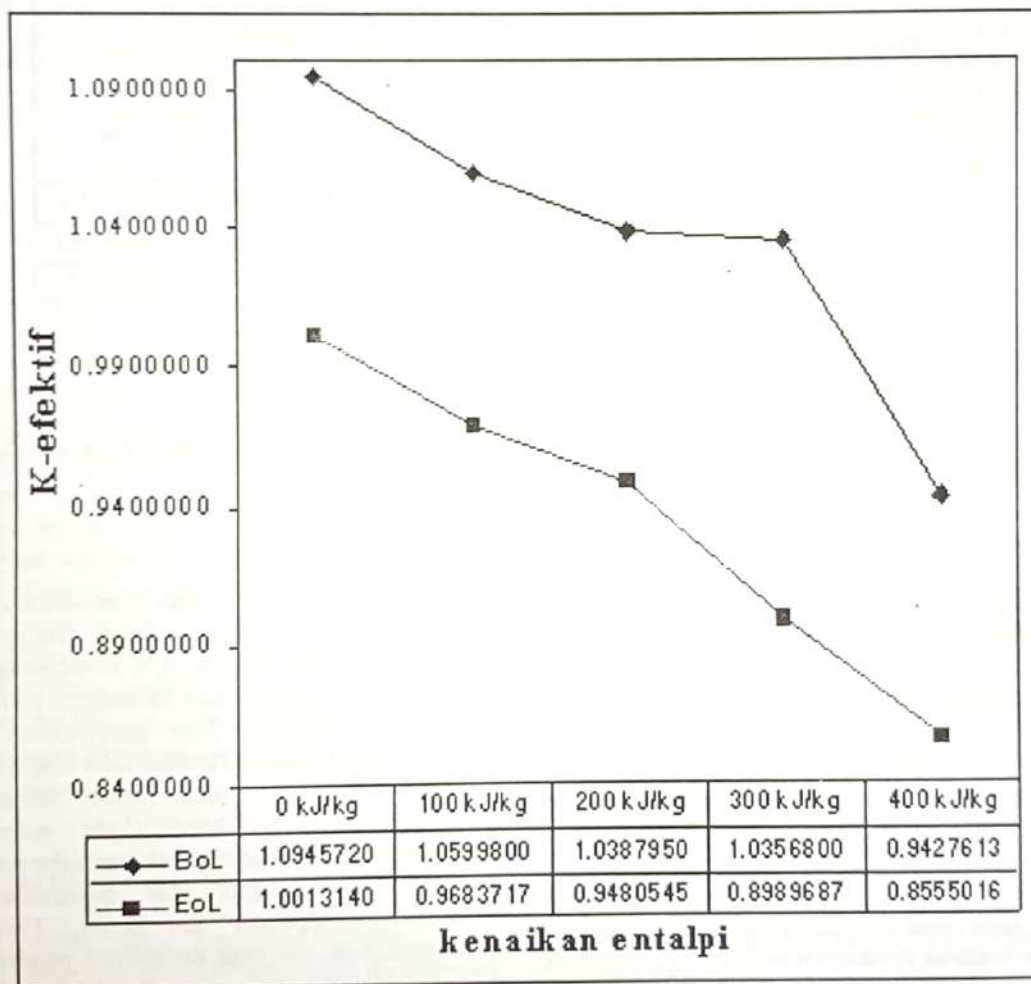


Perubahan koefisien konveksi ini akan mempengaruhi hubungan antara suhu pendingin, suhu kelongsong, dan suhu pelet bahan bakar.

Selain perubahan koefisien konveksi dari pendingin, koefisien perpindahan panas konduksi pelet bahan bakar dan kelongsongnya juga mengalami variasi terhadap suhunya (Ma, 1983 dan El-Wakil, 1978). Hasilnya, kenaikan entalpi yang menyebabkan naiknya suhu pendingin primer akan menjadikan pula naiknya suhu kelongsong dan pelet bahan bakar akan mempengaruhi faktor perlipatan efektif teras. Respon  $k$ -efektif terhadap kenaikan entalpi pendingin sistem primer yang disebabkan oleh kegagalan/gangguan pengambilan panas oleh sistem sekunder terlihat dari grafik pada Gambar 4.

Faktor perlipatan efektif teras cenderung mengalami penurunan seiring dengan naiknya

entalpi pendingin primer. Hal ini cukup menjamin keselamatan teras reaktor itu sendiri. Jika terjadi kegagalan sistem sekunder dalam mengambil panas dari pendingin sistem primer, maka teras reaktor akan menurunkan sendiri dayanya. Hal ini terjadi dengan menurunnya faktor perlipatan efektif teras yang membuat jumlah neutron yang menyebabkan reaksi fisi juga terus mengalami penurunan. Turunnya jumlah reaksi fisi ini akan membuat suhu teras juga berkurang sehingga dayanya juga akan turun. Kondisi teras yang seperti ini membuat teras reaktor ini memiliki sistem pasif dalam mengendalikan dirinya jika terjadi gangguan pengambilan panas sistem primer oleh sistem sekunder. Teras ini juga disebut memiliki *inherent safety*.



Gambar 4. Grafik respon K-efektif terhadap kenaikan entalpi pendingin sistem primer akibat kegagalan/gangguan pengambilan panas oleh sistem sekunder.

### GANGGUAN ALIRAN SISTEM PENDINGIN PRIMER REAKTOR (FLOW BLOCKAGE)

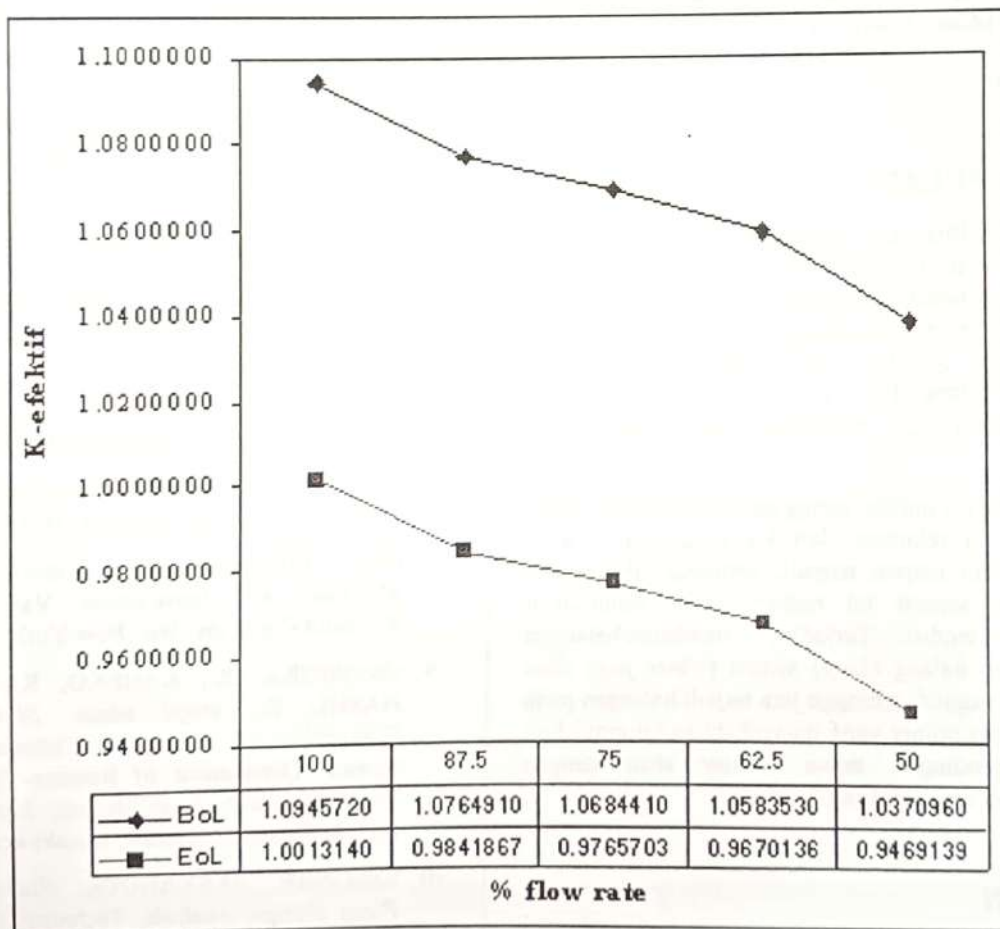
Gangguan aliran yang dipostulasikan terjadi pada teras reaktor ini adalah gangguan yang menyebabkan aliran sistem pendingin primer menjadi berkurang. Berkurangnya laju aliran pendingin primer ini dapat diakibatkan baik oleh halangan atau gangguan pada jalur kalang (*loop*) yang dilalui oleh pendingin primer maupun oleh kegagalan yang dialami oleh sistem pemompaan. Halangan pada aliran sistem pendingin primer paling mungkin akan menyebabkan berhentinya aliran pada lokal tertentu di teras reaktor. Kegagalan pemompaan paling mungkin akan menyebabkan kerusakan pada sebagian besar atau bahkan seluruh struktur teras. Terkuncinya baling-baling (rotor) pompa dapat menurunkan secara drastis laju alirannya. Suhu dan tekanan sistem primer secara keseluruhan dapat naik hingga tingkat yang tidak diinginkan jika panas yang dihasilkan oleh teras

tidak dapat dipindahkan dari pendingin sistem primer (Lewis, 1977).

Pada penelitian ini, dilakukan simulasi terjadinya halangan pada jalur kalang sistem primer. Halangan ini akan menyebabkan turunnya laju aliran pendingin sistem primer. Dimisalkan jika aliran pendingin primer berkurang hingga 50% dari laju aliran normalnya.

Data-data distribusi suhu dan densitas pendingin, suhu kelongsong, dan suhu bahan bakar yang diakibatkan oleh turunnya laju aliran pendingin sistem primer tersebut dimasukkan dalam masukan (*input*) program SRAC untuk menghitung k-efektif teras tiap penurunan laju aliran pendingin sistem primer.

Sebagai dasar analisis terhadap gangguan aliran ini (*flow blockage*), faktor perlipatan teras diambil seiring dengan turunnya laju aliran pendingin. Hasilnya diplotkan dalam sebuah grafik yang ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik respon k-efektif teras terhadap gangguan aliran sistem primer.



Panas yang dibangkitkan dari susunan bahan bakar di teras reaktor akan diambil oleh sistem pendingin primer. Pendingin ini akan bersirkulasi dengan laju aliran tertentu melewati bagian bawah teras sebagai inlet teras dan bagian atasnya sebagai outlet. Suhu pendingin di bagian bawah teras lebih rendah dibandingkan dengan pendingin yang keluar di bagian atasnya. Jika terjadi halangan di jalur kalang aliran sistem pendingin primer maka laju aliran pendingin primer akan berkurang. Hal ini membuat entalpi pendingin yang keluar dari teras akan bertambah. Sama halnya dengan yang terjadi pada kenaikan entalpi pada kejadian-kejadian yang sebelumnya disimulasikan, maka k-efektif teras akan mengalami penurunan juga. Hal ini membuat teras reaktor memiliki respon yang sesuai dengan kriteria keselamatan.

Jika terjadi gangguan pada kalang aliran pendingin sistem primer yang menyebabkan berkurangnya laju aliran pendingin yang melewati teras maka akan menurunkan k-efektif teras. Hal ini akan dengan sendirinya menurunkan dayanya. Oleh karena itu teras reaktor tidak akan mengalami kenaikan daya yang mengarah kepada kecelakaan reaktor. Teras reaktor ini dapat disebut memiliki *inherent safety* yaitu keselamatan berdasarkan disainnya.

## KESIMPULAN

Penelitian ini mendapatkan konfigurasi teras kritis dengan k-efektif sebesar 1,094572 (BoL). Kekritisitas tersebut dicapai dengan 13 perangkat bahan bakar berpengkayaan 5%, 12 perangkat berpengkayaan 3,329%, dan 12 perangkat berpengkayaan 1,234%. Teras ini memiliki koefisien suhu bahan bakar dan moderator yang kedua-duanya negatif.

Pada simulasi gangguan pengambilan panas oleh sistem sekunder dari sistem primer, reaktor memberikan respon negatif, sehingga jika terjadi gangguan seperti ini reaktor akan menurunkan dayanya sendiri. Terjadinya hambatan/halangan pada jalur kalang (*loop*) sistem primer juga akan direspon negatif, sehingga jika terjadi halangan pada *loop* sistem primer yang menyebabkan turunnya laju aliran pendingin, maka reaktor akan dengan sendirinya menurunkan dayanya.

## SARAN

Penelitian lebih lanjut yang sangat direkomendasikan pada teras reaktor adalah penelitian yang berkaitan dengan analisis

termohidrolik. Hasil yang diperoleh dari penelitian termohidrolik ini masih perlu diteliti lagi bersama dengan hasil penelitian neutroniknya. Selain itu, perlu juga diadakan penelitian yang berkaitan dengan pemanfaatan tekanan superkritis terutama dalam operasi teras reaktor nuklir. Pengalaman pembangkit listrik non-nuklir dalam pemanfaatan tekanan superkritis perlu diikuti kajian mendalam dan menyeluruh untuk pemanfaatannya dalam teras reaktor nuklir.

## DAFTAR PUSTAKA

1. BUONGIORNO, JACOPO, *The Supercritical-Water-Cooled Reactor (SCWR)*, ANS, 2002 Winter Meeting, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, 2002.
2. ÇENGEL, YUNUS A., and BOLES, MICHAEL A., *Thermodynamics An Engineering Approach*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1989.
3. El-Wakil, M.M., *Nuclear Heat Transport*, The American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois, 1978.
4. GLASSTONE, SAMUEL, dan SESONKE, ALEXANDER, *Nuclear Reactor Engineering 3<sup>rd</sup> edition*, Van Nostrand-Reinhold Company, New York, 1981.
5. INCROPERA, FRANK P., dan DEWITT, DAVID P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 3<sup>rd</sup> edition*, John Wiley & Sons, Inc., Canada, 1990.
6. LAMARSH, JOHN R., *Introduction to Nuclear Reactor Theory*, Addison-Wesley Company, Reading, Massachusetts, 1966.
7. LEWIS, E.E., *Nuclear Power Reactor Safety*, John Wiley & Sons, Inc., Canada, 1977.
8. MA, BENJAMIN M., *Nuclear Reactor Materials and Applications*, Van Nostrand-Reinhold Company, Inc., New York, 1983.
9. OKUMURA, K., KANEKO, K., TSUCHIHASHI, K., tanpa tahun. *SRAC95 The Comprehensive Neutronics Calculation Code System*, Department of Reactor Engineering, Tokai Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute, Ibaraki-ken, Jepang.
10. SESONKE, ALEXANDER, *Nuclear Power Plant Design Analysis*, Technical Information Center, Office of Information Services, United States Atomic Energy Commission, Amerika Serikat, 1973.

11. SU'UD, ZAKI, *Studi Disain Reaktor Daya Berukuran Sangat Kecil Dengan Pendingin Pb-Bi dan Bahan Bakar Nitrida*. Prosiding Seminar Nasional ke-9 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, Jakarta 20 Agustus 2003.
12. U.S. DoE, Office of Nuclear Energy, Science and Technology, 2001. *Report to Congress on Small Modular Nuclear Reactor*, U.S. DoE, USA
13. Uranium Information Centre Ltd., 2003. *Small Nuclear Power Reactors*, UIC Nuclear Issues Briefing Paper # 60

---

## TANYA JAWAB

Tukiran S.

- Apakah PLTN yang bapak analisis disain baru?
- Apakah teknologinya sudah teruji?
- Kode SRAC yang mana?

Andang WH.

- Masih baru.
- Masih perlu banyak pengkajian.
- SRAC 95 PC.