

EVALUASI KOEFISIEN REAKTIVITAS TEMPERATUR MODERATOR REAKTOR DAYA PWR 1000 MWe

T.M. Sembiring dan S. Pinem

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) - BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Gd. No. 80 Serpong, Tangerang Selatan 15310
e-mail: tagorms@batan.go.id

ABSTRAK

EVALUASI KOEFISIEN REAKTIVITAS TEMPERATUR MODERATOR REAKTOR DAYA PWR 1000 MWE. Peningkatan keselamatan pasif dan keselamatan melekat menjadi faktor penting dalam keselamatan reaktor. Salah satu parameter keselamatan melekat di reaktor daya adalah koefisien reaktivitas. Dikatakan memiliki keselamatan melekat jika reaktor memiliki koefisien reaktivitas negatif. Makalah ini menyajikan evaluasi koefisien reaktivitas temperatur moderator (KRTM) PWR kelas 1000 MWe, yaitu reaktor AP1000 yang didesain Westinghouse. Tujuan penelitian ini adalah mengevaluasi KRTM reaktor AP1000 yang ada pada dokumen desain dengan fokus kepada efek konsentrasi boron pada KRTM tanpa memperhitungkan perubahan densitas air. Perhitungan KRTM telah dilakukan dengan memodelkan teras AP1000 dalam 3-dimensi dengan program metode difusi neutron 3-dimensi, BATAN-3DIFF. Temperatur air yang dievaluasi adalah 20°C, 50°C, 100°C, 200°C dan 300°C untuk tiga konsentrasi boron, 0 ppm, 827 ppm dan 1574 ppm. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai KRTM reaktor AP1000 sangat dipengaruhi oleh konsentrasi boron, semakin tinggi konsentrasi boron menyebabkan nilai KRTM semakin menuju ke nilai nol (positif). Hasil perhitungan menunjukkan juga bahwa nilai KRTM positif pada temperatur rendah (50°C) pada konsentrasi boron sebesar 1875 ppm. Akan tetapi kondisi ini tidak mungkin tercapai karena konsentrasi boron maksimum didesain 1574 ppm. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa kestabilan reaktor AP1000 pada daya tinggi (nominal) sangat dijamin karena KRTM bernilai negatif.

Katakunci: PWR, AP1000, koefisien reaktivitas temperatur moderator, metode difusi neutron, Batan-3DIFF

ABSTRACT

EVALUATION OF MODERATOR TEMPERATURE COEFFICIENT OF REACTIVITY FOR THE 1000 MWE PWR NUCLEAR PLANT. *Passive and inherent safety improvement have become important factors in reactor safety. One of the inherent safety parameters in the power reactors is the coefficient of reactivity. It will be classified as an inherent safety if the reactor has a negative reactivity coefficient. This paper describes the evaluation of the moderator temperature coefficient of reactivity (MTC) of PWR with 1000 MWe (electric), the AP1000 reactor designed by Westinghouse. The objective of this research is to evaluate the designed MTC of AP1000 reactor with a focus on the effect of boron concentration on the MTC without water density changes. The MTC calculations have been carried out by modeling the AP1000 core in 3-dimension geometry model with a neutron diffusion method code, BATAN-3DIFF. The evaluated water temperatures are 20°C, 50°C, 100°C, 200°C and 300°C with three boron concentration levels, 0 ppm, 827 ppm and 1574 ppm. The calculation results showed that the value of the MTC of AP1000 reactor is strongly influenced by the boron concentration, the higher boron concentration could cause the value of the MTC to be 0 (positive). The calculation results also showed that MTC is positive in the low temperature (50°C) for the boron concentration of 1875 ppm. However this condition is unattainable because the designed maximum boron concentration is 1574 ppm. This research also showed that the stability of the AP1000 reactor at high power (or nominal power) is guaranteed because the MTC is negative.*

Keywords: PWR, AP1000, moderator temperature coefficient of reactivity, neutron diffusion method, Batan-3DIFF.

1. PENDAHULUAN

Untuk meningkatkan keselamatan reaktor daya (PLTN), maka telah dilakukan minimalisasi penggunaan peralatan aktif (*active devices*) dan lebih mengandalkan fenomena alamiah yang tidak bergantung pada catu daya dan tindakan operator. Oleh karena itu, dua hal yang menjadi fokus dalam desain reaktor daya adalah keselamatan pasif (*passive safety*) dan keselamatan melekat (*inherent safety*). Keselamatan melekat tidak memiliki *driving force* seperti di keselamatan pasif, akan tetapi merupakan suatu sifat yang melekat pada suatu bagian reaktor untuk mendukung kestabilan operasi reaktor pada saat normal ataupun abnormal.

Dari aspek keselamatan reaktor, koefisien reaktivitas umpan balik yang bernilai negatif merupakan salah satu keselamatan melekat. Aplikasinya dalam operasi reaktor yaitu saat reaktor mengalami kenaikan daya akibat pemberian reaktivitas positif maka kenaikan daya reaktor akan stabil karena ada umpan balik reaktivitas yang bernilai negatif. Salah satu parameter koefisien reaktivitas umpan balik yang penting di reaktor daya yang menggunakan air ringan sebagai pendinginnya, misal reaktor daya PWR (*Pressurized Water Reactor*), adalah koefisien reaktivitas temperatur moderator (KRTM).

Koefisien Reaktivitas Temperatur Moderator (KRTM) adalah besarnya perubahan reaktivitas akibat naiknya temperatur moderator. Dalam desain reaktor dipersyaratkan bahwa KRTM memiliki negatif agar reaktor dapat memiliki keselamatan melekat. Khusus untuk reaktor daya jenis PWR, moderator H₂O ditambahkan boron untuk mengendalikan reaktivitas lebih teras. Penambahan boron dalam jumlah tertentu dapat mengakibatkan nilai KRTM PWR bernilai positif dalam rentang temperatur tertentu, terutama pada konsentrasi boron yang tinggi^[1]. Oleh karena itu, evaluasi karakteristik KRTM untuk reaktor jenis PWR sangat penting dilakukan.

Makalah ini menyajikan hasil evaluasi KRTM reaktor daya PWR kelas 1000 MWe (elektrik) yaitu reaktor AP1000 yang didesain oleh Westinghouse^[2]. Penelitian yang berkaitan dengan parameter koefisien reaktivitas PWR yang telah dilakukan pada umumnya berkaitan dengan PWR Generasi-III^[3]. Sedangkan penelitian KRTM untuk PWR Generasi-III+, yaitu AP1000, belum pernah dipublikasikan kecuali dalam hasil desain^[4]. Dengan demikian penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi KRTM reaktor AP1000 yang ada pada dokumen desain dengan fokus kepada efek konsentrasi boron pada KRTM tanpa memperhitungkan perubahan densitas air.

Melalui penelitian ini akan diperoleh suatu metodologi perhitungan koefisien reaktivitas lainnya, seperti koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar, untuk digunakan sebagai *input* perhitungan gayut waktu (*transient*). Disamping itu, manfaat dari penelitian ini adalah mengetahui karakteristik KRTM reaktor AP1000 yang memiliki daya dan teras yang besar. Dengan daya dan teras yang besar maka reaktor AP1000 memerlukan konsentrasi boron yang tinggi yang dapat berdampak pada nilai KRTM yang cenderung positif. Disamping itu jika memiliki KRTM yang terlalu negatif juga tidak baik karena dapat memberikan dampak ketidakstabilan saat penurunan daya. Karena itu penelitian ini sangat bermanfaat untuk mengetahui jaminan dipenuhinya keselamatan melekat di reaktor AP1000.

Karena dalam penelitian ini tidak diperhitungkan efek perubahan densitas air saat temperatur air naik, maka nilai KRTM yang diperoleh dari penelitian ini hanya efek dari perubahan temperatur. Oleh karena itu, akan diperoleh karakteristik KRTM akibat perubahan spektrum neutron di air yang dipengaruhi oleh perubahan temperatur. Penelitian ini merupakan langkah awal untuk evaluasi keseluruhan parameter keselamatan melekat yang didesain di reaktor AP1000.

Evaluasi KRTM reaktor AP1000 dilakukan dengan paket program metode difusi neutron 3-dimensi, BATAN-3DIFF^[5]. Perhitungan faktor pelipatan efektif dilakukan untuk tiap kondisi temperatur untuk masing-masing konsentrasi boron. Model teras 3-dimensi AP1000 yang digunakan dalam penelitian ini mengadopsi model teras yang telah diperoleh pada penelitian sebelumnya dengan akurasi parameter teras hasil perhitungannya telah terbukti sangat memuaskan^[6].

2. DESKRIPSI REAKTOR AP1000

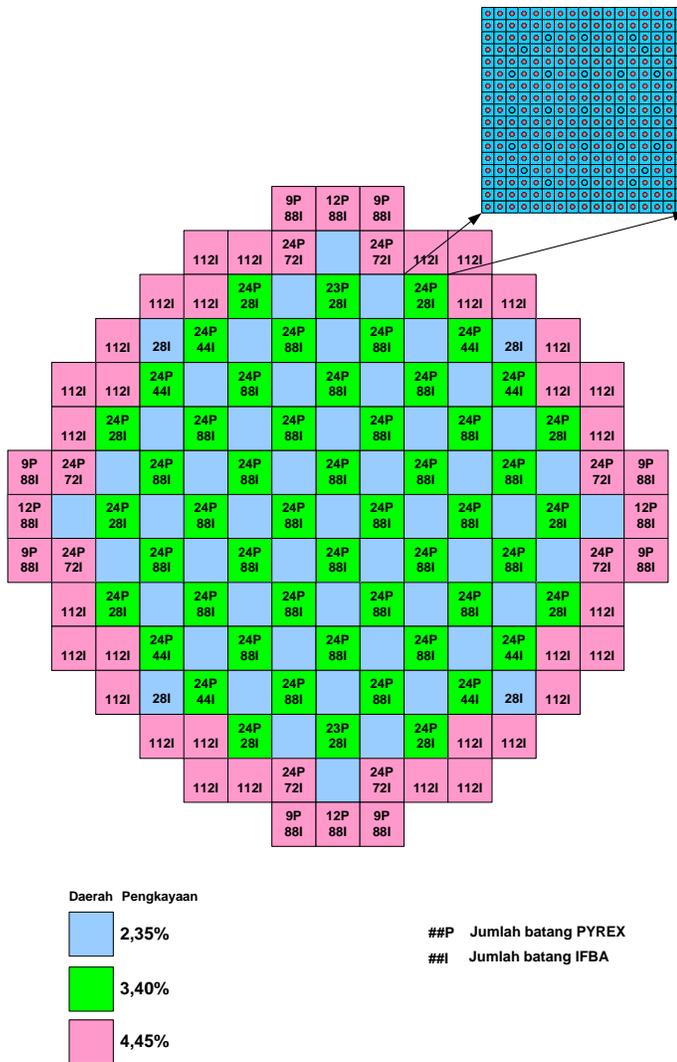
Reaktor AP1000 adalah reaktor PWR Generasi-III+ yang dapat menghasilkan daya elektrik sebesar 1117 MW dari daya termal sebesar 3400 MW dengan sistem dua-untai (*two-loop*)^[2,4]. Teras reaktor AP1000 disusun atas 157 perangkat bahan bakar UO₂ (*fuel assembly*, FA) dengan tiga jenis pengkayaan yaitu 2,35%, 3,40% dan 4,45% yang disusun atas 17 × 17 (Gambar 1). Untuk mengendalikan reaktivitas lebih, maka ada 3 (tiga) cara yaitu^[4]:

1. menambahkan boron ke moderator H₂O yang juga berfungsi sebagai pendingin. Karena boron memiliki sifat sebagai penyerap neutron yang kuat (¹⁰B), maka penambahannya berorde ppm. Dalam desain reaktor AP1000, konsentrasi boron bervariasi tergantung pada kondisi operasi. Pada saat dingin dan daya rendah, konsentrasi boron dapat mencapai 1574 ppm, sedangkan pada saat panas, daya penuh dan xenon setimbang, konsentrasi boron sebesar 827 ppm^[4].
2. menambahkan racun dapat bakar *discrete burnable absorber rods*, yang terbuat dari *borosilicate glass* atau sering disebut PYREX, di beberapa posisi teras melalui posisi tabung pengarah.
3. menambahkan bahan bakar (*pellet*) yang sudah dilapisi penyerap neutron, *boride coating*, yang disebut *integral fuel burnable absorber* (IFBA).

Susunan IFBA dan PYREX dalam teras AP1000 (Gambar 1), juga memberikan dampak kepada kerataan pembangkitan panas secara lokal. Kondisi temperatur moderator saat daya nominal di teras AP1000 dapat dilihat di Tabel 1. Dimensi dan susunan tiap bagian teras AP1000 dapat dilihat lebih lengkap di dokumen desain^[4] dan hasil penelitian yang telah dilakukan Sembiring^[6].

Tabel 1. Kondisi temperatur moderator/pendingin di teras AP1000^[4]

Parameter Desain	Nilai
Temperatur masuk (<i>inlet</i>) nominal, °C	279,44
Naiknya temperatur rerata, °C	45,22
Temperatur rerata di teras, °C	303,39



Gambar 1. Konfigurasi teras AP1000^[4]

3. METODE PERHITUNGAN

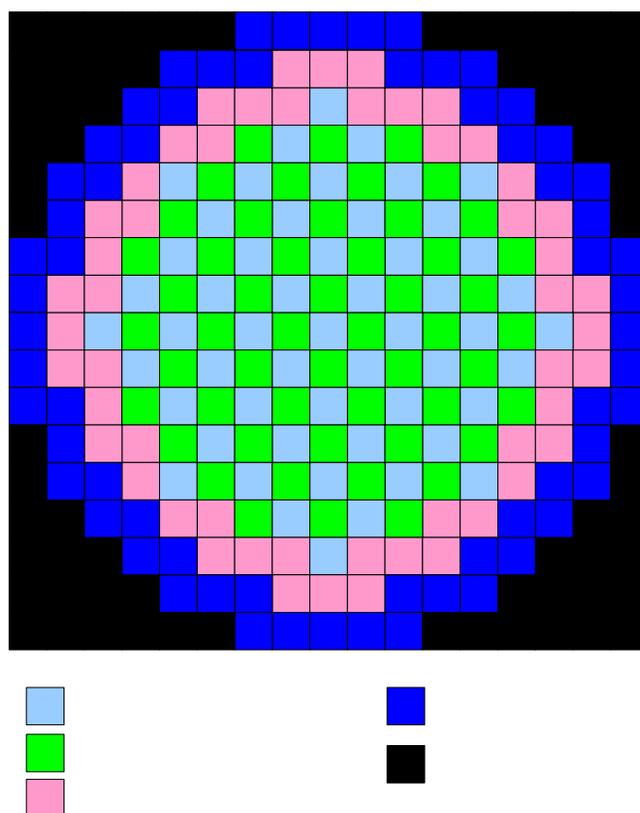
Perhitungan KRTM dapat dilakukan jika faktor lipatan efektif, k_{eff} , teras AP1000 dilakukan untuk setiap temperatur air yang disurvei dengan berbagai konsentrasi boron. Oleh karena itu dalam penelitian ini perhitungan dilakukan dengan 2 (dua) perangkat analitis yaitu:

1. SRAC 2006^[7], digunakan untuk menggenerasi konstanta kelompok difusi (tampang lintang makroskopis) tiap material penyusun teras. Metode yang digunakan adalah metode kebolehdian tumbukan dengan modul PIJ^[7].
2. BATAN-3DIFF^[5] digunakan untuk menghitung k_{eff} teras AP1000 sebagai fungsi temperatur air untuk berbagai konsentrasi boron. Validasi paket program BATAN-3DIFF dalam menghitung parameter teras telah dibuktikan di beberapa penelitian sebelumnya, salah satunya adalah perhitungan koefisien reaktivitas reaktor riset jenis MTR (*Material Testing Reactor*)^[8].

Parameter yang digunakan sebagai *input* di paket program SRAC2006 adalah data komposisi material perangkat bahan bakar, IFBA dan PYREX. Data input yang penting adalah temperatur air

dan kerapatan atom boron. Konstanta kelompok yang dihasilkan dinyatakan dalam 2 (dua) kelompok energi neutron. Batasan energi termal di desain AP1000 adalah 0,625 eV. Karena struktur energi yang dimiliki SRAC2006 tidak ada tepat di batas tersebut, maka batas energi termal yang dipilih adalah 0,68256 eV.

Untuk perhitungan teras dengan BATAN-3DIFF, data input yang paling penting adalah model teras. Agar perhitungan teras menghasilkan nilai k_{eff} yang akurat maka teras AP1000 dimodelkan dalam 3-dimensi. Komposisi reflektor samping dan reflektor di atas dan bawah teras diacu dari hasil penelitian sebelumnya^[6]. Model 3-dimensi teras AP1000 ke arah radial dan aksial masing-masing dinyatakan dalam Gambar 2 dan 3.

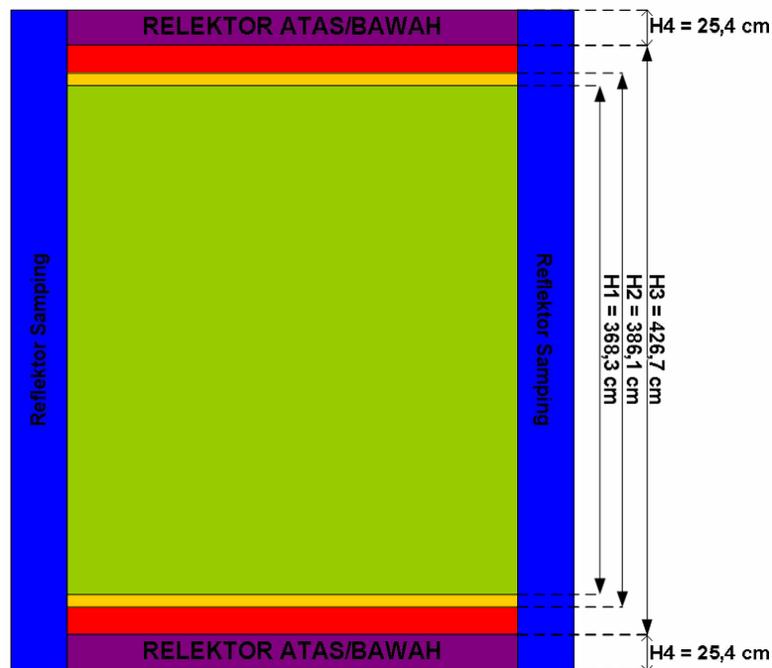


Gambar 2. Model teras AP1000 ke arah radial

Syarat batas untuk tiap sisi luar pada bidang radial dan aksial adalah vakum. Tabel 2 menunjukkan komposisi dan pembagian zona teras ke arah aksial.

Tabel 2. Pembagian zona teras AP1000 ke arah aksial

Zona	Tinggi, cm	Komposisi
H1	368,3	PYREX + IFBA + UO ₂
H2	386,1	Zona H1 + IFBA (bagian atas dan bawah)
H3	426,7	Zona H1 + H2 + UO ₂ (bagian atas dan bawah)
H4	25,4	Reflektor bawah (SS304 +H ₂ O)



Gambar 3. Model teras AP1000 ke arah aksial

Parameter yang dievaluasi dalam perhitungan koefisien reaktivitas temperatur moderator (KRTM) adalah:

1. Temperatur moderator, yaitu 20 °C, 50 °C, 100 °C, 200 °C dan 300 °C. Dipilihnya temperatur 300 °C sebagai temperatur maksimum dalam penelitian ini karena mendekati temperatur rerata moderator di teras (Tabel 1). Temperatur 20 °C dipakai sebagai nilai acuan untuk menentukan perubahan reaktivitas.
2. Konsentrasi boron, yaitu 0 ppm (tanpa boron), 827 ppm dan 1574 ppm. Dipilihnya konsentrasi 827 ppm dan 1574 ppm karena masing-masing merupakan konsentrasi minimum dan maksimum dalam desain reaktor AP1000^[6]. Perhitungan KRTM dilakukan untuk tiap temperatur sebagai fungsi konsentrasi boron.

Dalam penelitian ini dipakai beberapa asumsi yaitu:

- kerapatan air tidak berubah akibat naiknya temperatur. Dengan demikian hasil KRTM dalam penelitian hanya dari efek temperatur saja. Kerapatan acuan H₂O yang dipakai adalah pada temperatur 20 °C.
- komposisi kerapatan atom dari H₂O hanya dipengaruhi oleh konsentrasi boron.
- temperatur di reflektor di samping dan di atas/bawah teras aktif sama dengan temperatur moderator di perangkat bahan bakar.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Koefisien reaktivitas temperatur moderator (KRTM) ditentukan dari perubahan nilai k_{eff} akibat perubahan temperatur. Oleh karena itu sebelum melakukan perhitungan KRTM, maka perlu

dilakukan evaluasi terhadap perhitungan faktor perlipatan efektif teras, k_{eff} , pada kondisi dingin (20 °C) dan daya rendah atau sering disebut CZP (*cold zero power*) tanpa boron.

Nilai desain k_{eff} teras AP1000 pada kondisi CZP adalah 1,205 dan nilai k_{eff} hasil perhitungan BATAN-3DIFF adalah 1,211. Hasil ini menunjukkan perbedaan relatif sebesar 0,50% antara hasil perhitungan dan nilai desain. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi perhitungan sel dan perhitungan teras masing-masing dengan SRAC2006 dan BATAN-3DIFF, memberikan hasil perhitungan parameter k_{eff} yang akurat.

4.1. Moderator tanpa Boron

Tabel 3 menunjukkan nilai KRTM reaktor AP1000 pada saat moderator tanpa boron untuk tiap rentang temperatur yang menggunakan 20 °C sebagai tempertaur acuan. Terlihat jelas di Tabel 3 bahwa untuk tiap rentang temperatur nilai KRTM bernilai negatif dengan rentang -2,37 pcm/°C sampai -2,94 pcm/°C. Karena dalam penelitian ini tidak dilakukan perubahan kerapatan air akibat perubahan temperatur, maka menurunnya nilai k_{eff} dengan naiknya temperatur moderator H₂O bukan karena hilangnya moderasi akibat penurunan densitas^[9]. Nilai k_{eff} dapat turun karena laju serapan neutron meningkat atau laju pembelahan atau produksi neutron menurun. Berdasarkan hasil perhitungan sel dengan SRAC2006 diperoleh bahwa tampang lintang makroskopis serapan neutron meningkat dengan naiknya temperatur H₂O, untuk semua perangkat bahan bakar. Oleh karena itu, hasil perhitungan teras dengan Batan-3DIFF juga menunjukkan kenaikan laju serapan neutron yang terjadi di daerah bahan bakar dan reflektor.

Nilai k_{eff} turun dengan naiknya temperatur H₂O juga karena tampang lintang makroskopis pembelahan atau produksi neutron menurun. Hal ini menunjukkan dengan naiknya temperatur H₂O, spektrum neutron di teras berubah sedemikian sehingga laju serapan meningkat dan laju pembelahan/produksi neutron menurun.

Tabel 3. Nilai KRTM hasil perhitungan tanpa boron

Temperatur (°C)	$\Delta\rho$, pcm	KRTM (pcm/°C)
20	-	-
50	-71,21	-2,37
100	-208,32	-2,60
200	-510,48	-2,84
300	-814,85	-2,91

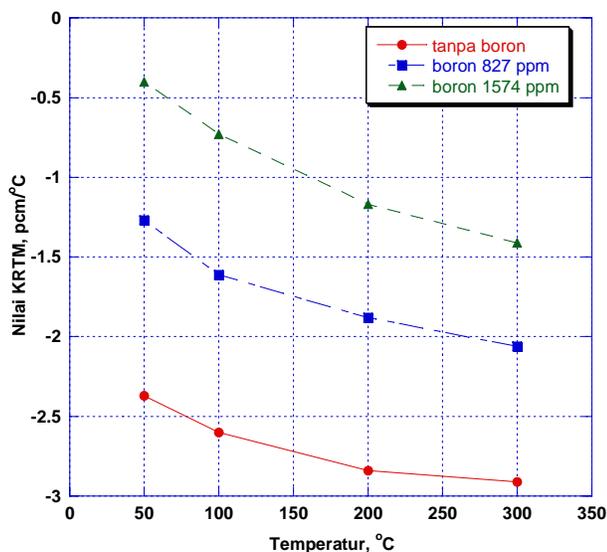
Jika dibanding dengan nilai desain AP1000, 0 pcm/°C sampai -72 pcm/°C^[4], maka hasil perhitungan, dengan rentang -2,37 pcm/°C sampai -2,94 pcm/°C, masuk dalam rentang desain. Meskipun demikian rentang perubahan KRTM hasil perhitungan sangat sempit, yaitu 0,57 pcm/°C, dibanding nilai desain sebesar 72 pcm/°C. Perbedaan ini diakibatkan dalam desain, perhitungan KRTM memperhitungkan perubahan densitas air yang tidak menjadi pertimbangan dalam penelitian ini. Dengan demikian rentang desain dapat mencapai -72 pcm/°C. Hal ini dapat dimengerti karena

densitas air pada temperatur 300 °C dapat berkurang 30% dibanding pada temperatur 20°C. Tentunya perbedaan yang besar ini yang memungkinkan ada rentang sampai sebesar itu.

4.2. Moderator dengan Boron

Hasil perhitungan KRTM dengan adanya boron dalam moderator disajikan di Tabel 4 dan Gambar 4. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai KRTM mendekati nol (positif) dengan meningkatnya konsentrasi boron untuk tiap rentang temperatur jika dibanding dengan moderator tanpa boron (Tabel 3). Secara rerata, nilai KRTM pada 827 ppm dan 1574 ppm masing-masing berkurang (rerata) sekitar 36% dan 65% dibanding dengan nilai KRTM tanpa boron. Dibanding temperatur lainnya, pada temperatur 50°C terjadi penurunan nilai KRTM yang lebih besar, menuju 0 (positif), mencapai 47% dan 83% masing-masing untuk konsentrasi boron 827 ppm dan 1574 ppm. Sedangkan untuk temperatur 300°C, penurunan nilai KRTM sebesar 29% dan 52% masing-masing untuk konsentrasi boron 827 ppm dan 1574 ppm, jika dibanding tanpa boron pada temperatur yang sama. Sehingga tampak jelas, penurunan nilai KRTM semakin kecil dengan naiknya temperatur untuk seluruh tingkat konsentrasi boron.

Seperti dibahas pada kondisi tanpa boron, bahwa naiknya temperatur H₂O akan mengubah spektrum neutron yang berakibat laju serapan neutron meningkat dan laju produksi neutron menurun. Dengan naiknya konsentrasi boron, maka konsentrasi H₂O berkurang, yang mengakibatkan besarnya penurunan laju reaksi serapan neutron akibat H₂O lebih kecil dibanding tanpa boron. Dengan demikian nilai KRTM akan cenderung menuju nol (positif) untuk seluruh temperatur dengan meningkatnya konsentrasi boron dalam H₂O. Atau dengan kata lain, naiknya konsentrasi boron membuat perubahan reaktivitas, Δk (pcm), lebih kecil, sehingga nilai KRTM menuju nol (positif).



Gambar 4. Nilai KRTM untuk tiap temperatur dengan variasi konsentrasi boron

Dari Gambar 4 dan Tabel 4 tampak jelas dengan naiknya temperatur maka perubahan reaktivitas, Δk (pcm), akan semakin meningkat, yang disebabkan laju serapan neutron oleh boron dan air semakin meningkat akibat naiknya temperatur. Perubahan reaktivitas yang tinggi terjadi pada kondisi tanpa boron. Hal ini menunjukkan bahwa peran H₂O dalam menyerap neutron tetap signifikan walau boron memiliki tampang lintang serapan neutron yang tinggi. Meskipun demikian, kecenderungan (gradien) naiknya KRTM (nilai negatif) memiliki bentuk yang sama untuk seluruh konsentrasi boron.

Tabel 4. Nilai KRTM untuk konsentrasi boron 827 ppm dan 1574 ppm dalam moderator sebagai fungsi temperatur

Temperatur (°C)	Konsentrasi boron			
	827 ppm		1574 ppm	
	$\Delta\rho$, pcm	KRTM (pcm/°C)	$\Delta\rho$, pcm	KRTM (pcm/°C)
20	-	-	-	-
50	-38,02	-1,27	-11,88	-0,40
100	-128,69	-1,61	-58,57	-0,73
200	-339,02	-1,88	-210,37	-1,17
300	-576,56	-2,06	-394,49	-1,41

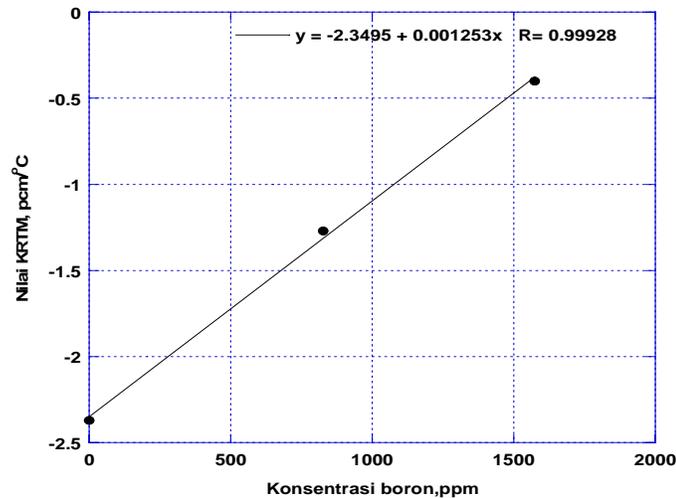
Hasil perhitungan di atas menunjukkan bahwa reaktor AP1000 sangat stabil di daya tinggi kerana nilai KRTM tetap bernilai negatif pada temperatur tinggi meskipun konsentrasi boron yang relatif tinggi. Akan tetapi pada daya rendah dengan konsentrasi boron yang tinggi perlu diantisipasi dalam prosedur operasi. Salah satu cara agar mendapat nilai KRTM yang negatif, maka sebelum reaktor dioperasikan, air dinaikkan temperaturnya dengan mengoperasikan pompa sehingga terjadi friksi di sepanjang aliran primer. Kondisi ini harus diaplikasikan dalam prosedur operasi reaktor agar diperoleh jaminan keselamatan melekat.

Evaluasi untuk menentukan konsentrasi boron minimum yang dapat menyebabkan nilai KRTM nol perlu dilakukan. Penentuannya dapat dilakukan dengan mencari terlebih dahulu persamaan regresi linier antara nilai KRTM pada temperatur 50 °C dengan konsentrasi boron yang tertera di Tabel 4. Penggunaan regresi linier dalam menentukan hubungan KRTM vs. temperatur air dilakukan berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Matos, Pennington, Freese dan Woodruff^[10]. Berdasarkan data hasil perhitungan diperoleh hubungan antara KRTM dan temperatur air (T_{H_2O}) adalah:

$$KRTM = 0,001253T_{H_2O} - 2,3495$$

yang ditunjukkan di Gambar 5.

Dengan melakukan ekstrapolasi menggunakan persamaan linier di atas, diperoleh bahwa konsentrasi boron minimum sebesar 1875 ppm akan memberikan nilai KRTM = 0 pcm/°C. Jika dilihat dari data desain, konsentrasi boron maksimum reaktor AP1000 adalah 1574 ppm, sehingga nilai KRTM negatif tetap terjamin.



Gambar 5. Nilai KRTM (pcm/°C) vs konsentrasi boron (ppm) pada temperatur 50°C

5. KESIMPULAN

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa nilai koefisien reaktivitas temperatur moderator (KRTM) reaktor AP1000 sangat dipengaruhi oleh konsentrasi boron, semakin tinggi konsentrasi boron maka nilai KRTM semakin menuju ke nilai nol (positif). Konsentrasi boron yang lebih besar 1875 ppm akan memberikan nilai KRTM yang positif di temperatur 50°C. Meskipun demikian nilai KRTM tetap negatif untuk temperatur pada daya nominal (*full power*) walau konsentrasi boron relatif tinggi. Dengan demikian reaktor AP1000 sangat stabil pada daya tinggi karena nilai KRTM tetap bernilai negatif.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. IAEA. Design of the reactor core for nuclear power plants, Safety Guide No. NS-G-1.12. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency (IAEA); 2005.
- [2]. SCHULZ TL. Westinghouse AP1000 advanced passive plant. Nuclear Engineering and Design 2006;236:1547-57.
- [3]. KROMAR M., KURINCIC, B. Impact of thicker cladding on the nuclear parameters of the NPP Krsko fuel. Nuclear Engineering and Design 2011;241:1087-89.
- [4]. Westinghouse AP1000 Control Document Rev.16 [internet]. US: Westinghouse;2007. Tier 2 Chapter 4 Reactor, [cited 2010 August 3]. Available from: <http://adamswebsearch2.nrc.gov/idmws/ViewDocByAccession.asp?AccessionNumber=ML071580939>
- [5]. LIEM, P.H. Pengembangan paket program difusi neutron banyak kelompok standar BATAN 3-dimensi (Batan-3DIFF). Prosiding Workshop Komputasi dalam Ilmu dan Teknologi Nuklir; Serpong, Indonesia. Serpong: Pusat Pengembangan Informatika (PPI) - BATAN; 1995.

- [6]. SEMBIRING TM.. Analisis model teras 3-dimensi untuk evaluasi parameter kritikalitas reaktor PWR maju kelas 1000 MW. (akan diterbitkan di Jurnal Teknologi Reaktor Tri Dasa Mega 2011).
- [7]. JAEA. SRAC2006 : A comprehensive neutronics calculation code system. JAEA-Data/Code 2007-004. Tokai-mura, Japan: Japan Atomic Energy Agency (JAEA); 2007
- [8]. SEMBIRING TM., PINEM S. Analisis koefisien reaktivitas umpan balik teras silisida RSG-GAS. Jurnal Teknologi Reaktor Tri Dasa Mega 2002; 4(2):64-72
- [9]. MOURTZANOS K, HOUSIADAS C, ANTONOPOULOS-DOMIS M. Calculation of the moderator temperature coefficient of reactivity for water moderated reactors. Annals of Nuclear Energy 2001;28:1773-82
- [10]. MATOS JE, PENNINGTON EM, FREESE KE, WOODRUFF WL. Safety-related benchmark calculations for MTR-type reactors with HEU, MEU and LEU fuels. Research reactor conversion guide book - Vol. 3: Analytical verification; IAEA-TECDOC-643. Vienna: IAEA; 1992. p. 15 -64.

DISKUSI/TANYA-JAWAB:

1. PERTANYAAN: (M. Subekti, PTRKN-BATAN)

- Berdasarkan grafik pada Gambar 4, nilai KRTM vs T, mana nilai desain konsentrasi boron paling optimal?

JAWABAN: (T. M. Sembiring, PTRKN-BATAN)

- *Konsentrasi boron yang dipilih 0 ppm, 827 ppm dan 1574 ppm merupakan kondisi konsentrasi yang mungkin terjadi dalam operasi AP1000. Jadi penentuan optimal boron dalam hubungannya dengan KRTM tidak dapat ditentukan dengan grafik tersebut. Dalam reaktor jenis PWR, konsentrasi boron yang semakin kecil akan semakin baik untuk Koefisien Reaktivitas Terpadu Moderator (KRTM).*