

OB03

KAJIAN IDENTIFIKASI KETENTUAN KESELAMATAN DALAM DESAIN TERAS REAKTOR DAYA

Arifin M. Susanto¹, Zulfiandri², Bambang Eko Aryadi²¹Pusat Pengkajian Sistem Teknologi Pengawasan Instalasi dan Bahan Nuklir - P2STPIBN BAPETEN²Direktorat Pengaturan Pengawasan Instalasi dan Bahan Nuklir - DP2IBN BAPETEN

e-mail: a.msusanto@bapeten.go.id

ABSTRAK**KAJIAN IDENTIFIKASI KETENTUAN KESELAMATAN DALAM DESAIN TERAS REAKTOR DAYA**

Kajian identifikasi ketentuan keselamatan dalam desain teras reaktor daya merupakan hal yang penting dilakukan guna mendukung penyusunan peraturan Kepala BAPETEN tentang Desain Teras Reaktor Daya. Teras reaktor daya merupakan tempat yang digunakan untuk proses reaksi inti berantai yang terkendali. Teras reaktor menjadi sumber potensi bahaya utama reaktor karena pembangkitan panas dan radiasi bersumber dari komponen ini. Hal teknis yang perlu untuk dikaji lebih lanjut terkait dengan teras reaktor daya adalah persyaratan keselamatan umum desain teras, persyaratan keselamatan khusus desain teras, kualifikasi struktur, sistem, dan komponen teras serta pengujian dan perawatan teras. Kajian ini juga memasukkan ketentuan agar pemegang izin tetap menerapkan jaminan kualitas dalam mendesain teras reaktor daya dan melaksanakan persyaratan keselamatan umum dan persyaratan keselamatan khusus desain teras, mempertimbangkan pengujian dan perawatan teras, serta memberlakukan jaminan kualitas yang ketat dan komprehensif agar keselamatan reaktor tetap terjaga. Sasaran yang ingin dicapai dalam kajian ini adalah tersedianya ketentuan keselamatan yang akan berguna dalam penyusunan peraturan Kepala BAPETEN tentang ketentuan keselamatan desain teras reaktor daya. Ketentuan keselamatan yang berhasil diidentifikasi diharapkan dapat diimplementasikan terhadap desain teras reaktor dengan tipe *Light Water Reactor (LWR)*, *High Temperature Gas Cooled Reactor (HTGR)* tipe *pebble bed*, dan *Molten Salt Reactor (MSR)*.

Kata Kunci: desain teras, persyaratan keselamatan umum, persyaratan keselamatan khusus

ABSTRACT

IDENTIFICATION ASSESSMENT OF THE SAFETY PROVISIONS IN THE DESIGN OF POWER REACTOR CORE. *The assessment of identification of the safety provisions in the design of the power reactor core is essential to support the drafting of the BAPETEN Chairman Regulation on the Design of the Power Reactor Core. The power reactor core is the component used for a controlled chain reaction process. The reactor core becomes the main potential source of reactor hazard due to heat generation and radiation in this component. Technical aspects that need to be further studied in relation to reactor core are the general safety requirements and specific safety requirements of core design, qualification of core structure, system, and component as well as testing and maintenance of core. This assessment also includes provisions for licensee to implement quality assurance in designing the reactor core as well as specific and general safety requirements, considering core test and maintenance and apply quality management clearly to ensure reactor core safety. The objective to be achieved in this assessment is to identify safety provisions that will be useful in drafting the BAPETEN Chairman Regulations on the safety requirements of core reactor designs. The identified safety provisions are expected can be implemented on the Light Water Reactor (LWR), High Temperature Gas Cooled Reactor (HTGR) with pebble bed fuel type, and Molten Salt Reactor (MSR).*

Key words: core design, general safety requirement, specific safety requirement

I. PENDAHULUAN

BAPETEN dalam upaya meningkatkan efektivitas pengawasan di bidang instalasi nuklir perlu melakukan evaluasi terhadap input, proses, dan hasil pengawasan yang dilakukan oleh unit-unit yang terkait dengan instalasi nuklir dan pemanfaatan bahan nuklir. Evaluasi tersebut perlu dilakukan sehubungan dengan potensi pemanfaatan tenaga nuklir untuk pembangkitan daya listrik di masa datang.

Evaluasi terhadap efektivitas pengawasan dilakukan secara komprehensif terkait keselamatan (safety), keamanan (security), dan safeguards. Telah

banyak peraturan perundangan yang diterbitkan oleh BAPETEN, dari level Peraturan Pemerintah sampai Peraturan Kepala BAPETEN. Peraturan Pemerintah No. 2 Tahun 2014 merupakan peraturan yang berlaku untuk perizinan instalasi nuklir. PP tersebut menyebutkan ketentuan tentang desain yaitu pada pasal 20 dalam mendapatkan izin konstruksi pemohon izin harus menyerahkan persetujuan desain berupa dokumen desain rinci reaktor nuklir.

Dalam penerapannya, PP No. 2 Tahun 2014 ini memerlukan Peraturan Kepala BAPETEN untuk melaksanakan amanah pada beberapa pasal-pasalanya. Beberapa Perka sudah diterbitkan terkait dengan desain antara lain Perka No. 3 tahun 2011 tentang Keselamatan Desain Reaktor Daya namun

sedang dalam proses revisi dan draft Perka desain yang baru menunggu pengesahan. Peraturan tentang ketentuan desain tersebut memerlukan rincian lebih lanjut khususnya untuk persyaratan teknis desain sistem-sistem pada reaktor daya.

Kajian ini merupakan kajian desain teras reaktor daya secara rinci dengan parameter-parameter utama untuk mendukung keselamatan, proteksi radiasi dan keselamatan teknis. Kajian ini mencakup reaktor daya dengan jenis LWR, HTGR tipe pebble bed reactor, dan MSR.

Kajian ini dilakukan untuk mendukung penyusunan peraturan Kepala BAPETEN tentang Peraturan desain teras reaktor daya. Pokok bahasan dalam kajian ini adalah:

1. Pertimbangan Keselamatan Umum, yang meliputi:
 - a. Tujuan desain
 - b. Desain neutronik
 - c. Desain termohidrolik
 - d. Desain Mekanik (a.l. integritas kelongsong, mekanisme vibrasi, mekanisme *cladding wear*)
 - e. Aspek klasifikasi keselamatan desain teras (a.l. analisis kecelakaan dan transien)
2. Pertimbangan Keselamatan Khusus, yang meliputi:
 - a. Elemen dan perangkat bahan bakar
 - b. Pendingin
 - c. Moderator
 - d. Karakteristik reaktivitas teras dan cara pengendaliannya
 - e. Sistem *shutdown*
 - f. Teras reaktor dan struktur terkait
 - g. Manajemen teras
 - h. Sistem pemantauan teras
 - i. Analisis keselamatan teras
3. Kualifikasi, Pengujian dan Perawatan, yang meliputi:
 - a. Kualifikasi peralatan
 - b. Ketentuan untuk pengujian dan perawatan.
4. Jaminan Kualitas dalam desain

Kajian dilakukan dengan didasarkan pada IAEA Safety Guide NS-G-1.12, SSR 2.1 dan SSR 2.2 serta implikasinya untuk reaktor tipe LWR, HTGR *pebble bed* dan MSR.

Makalah ini hanya membahas desain teras HTGR dan MSR.

II. POKOK BAHASAN

II.1 Aspek Pertimbangan Desain Teras

Aspek-Aspek dalam Pertimbangan Keselamatan Umum Desain Teras Reaktor

Berdasarkan IAEA Safety Guide NS-G-1.12 [40] pertimbangan keselamatan umum desain teras reaktor meliputi beberapa aspek, yaitu:

1. Tujuan desain
2. Desain neutronik
3. Desain Termohidrolik
4. Desain Mekanik (a.l integritas kelongsong, mekanisme vibrasi, mekanisme *cladding wear*)

5. Aspek klasifikasi keselamatan desain teras (a.l. analisis kecelakaan dan transien)

Pertimbangan Tujuan Desain Keselamatan Umum Teras Reaktor

Dalam IAEA Safety Guide NS-G-1.12 [40] pertimbangan tujuan desain keselamatan umum teras reaktor meliputi beberapa aspek, yaitu:

1. Tujuan dan konsep keselamatan
2. Kejadian yang harus dicegah dan konsep pertahanan berlapis (*defence in-depth*)
3. Fungsi keselamatan dasar yang harus dipertimbangkan dalam desain teras
4. minimalisasi efek dari berbagai kejadian awal terpostulasi
5. Fitur-fitur keselamatan umum
6. Kesesuaian dengan *engineering code* nasional atau internasional berkaitan dengan struktur, sistem dan komponen teras dalam hal perancangan, fabrikasi, instalasi, pengujian dan pemeriksaan
7. Kemampuan desain teras untuk di-*review* dan dimodifikasi bilamana diperlukan
8. Desain teras harus tetap terjaga integritasnya untuk kondisi operasi normal, kondisi operasi transien terantisipasi dan kecelakaan dasar desain dengan tingkat kerusakan minimum yang dapat ditoleransi
9. Dosis radiasi yang diterima oleh pekerja radiasi dan masyarakat umum pada saat semua kondisi operasi termasuk perawatan, pengujian, inspeksi dan *decommissioning* tidak melebihi batas yang diizinkan dan sesuai dengan konsep ALARA (*as low as reasonably achievable*) berdasarkan ketentuan atau peraturan yang berlaku
10. Persyaratan-persyaratan tambahan bilamana diperlukan

Pertimbangan Desain Neutronik

Dalam IAEA Safety Guide NS-G-1.12 [40] pertimbangan desain neutronik teras reaktor meliputi beberapa aspek, yaitu:

1. Desain teras harus memiliki umpan-balik daya yang dapat mengimbangi peningkatan reaktivitas (berdasarkan aspek neutronik, termalhidraulik dan sistem kendali) untuk seluruh kondisi operasi reaktor, kondisi transien terantisipasi dan kecelakaan [40]
2. Penyisipan-maksimum reaktivitas positif dalam kondisi operasional, transien terantisipasi, dan kecelakaan dasar desain harus dibatasi sehingga sarana-sarana pengurangan daya reaktor dapat berfungsi secara efektif untuk mencegah kecelakaan [41]
3. Desain teras harus secara minimal memiliki dua sistem *shutdown* yang independen [41]
4. Perhitungan distribusi daya teras harus dilakukan dalam desain untuk kondisi operasi yang sesuai guna memberikan informasi yang bisa dimanfaatkan untuk menentukan:

- (a) batas-batas dan kondisi-kondisi operasi;
 - (b) nilai-nilai *set-point* tindakan untuk sistem proteksi keselamatan;
 - (c) prosedur pengoperasian yang akan memastikan kepatuhan pada batas-batas desain, termasuk parameter desain teras, sepanjang umur teras reaktor.
5. Perangkat kendali reaktivitas harus digunakan untuk mempertahankan reaktor dalam kondisi subkritis, dengan juga mempertimbangkan kemungkinan kecelakaan dasar desain beserta segala konsekuensinya. Desain juga harus dilengkapi dengan kemampuan untuk mempertahankan keadaan subkritis pembangkit manakala *shutdown* normal, pendinginan bahan bakar, atau integritas sistem pendingin primer dinonaktifkan untuk sementara waktu, misalnya ketika bejana reaktor dibuka untuk perawatan atau pengisian ulang bahan bakar.
 6. Sejauh bisa dipraktikkan, sistem *shutdown* harus bisa diuji selama operasi guna memberi jaminan bahwa sistem tersebut senantiasa siaga saat dibutuhkan.

Pertimbangan Desain Termohidrolik

Dalam IAEA Safety Guide NS-G-1.12 [40] pertimbangan desain termalhidraulik teras reaktor meliputi beberapa aspek, yaitu:

1. Batas-batas desain termohidrolik pada parameter-parameter harus ditetapkan sedemikian rupa agar tersedia cukup *margin* dalam kondisi operasi untuk menjaga laju kegagalan elemen bahan bakar dalam kondisi kecelakaan dasar desain pada tingkat rendah yang dapat diterima.
2. Sarana instrumentasi dan kendali yang memadai harus disediakan agar parameter-parameter kondisi teras dapat dipantau dan dikontrol secara aman.
3. Instrumentasi yang memadai untuk pemantauan harus disediakan untuk menilai keadaan teras dan fitur-fitur terkait pada kondisi-kondisi kecelakaan.

Pertimbangan Desain Mekanik

Dalam IAEA Safety Guide NS-G-1.12 [40] pertimbangan desain mekanik teras reaktor meliputi beberapa aspek, yaitu:

1. Desain sistem atau elemen atau perangkat bahan bakar dan pendukungnya harus mampu mengungkung material nuklir dan material radioaktif pada semua kondisi operasi sepanjang umur hidupnya.
2. Dalam desain bahan bakar nuklir, perangkat kendali, racun dapat bakar dan perangkat/bundel bahan bakar, harus memasukkan aspek pengaruh suhu, tekanan, iradiasi, produk-produk fisi, beban mekanik statis dan dinamis, beban gempa, aliran yang disebabkan getaran dan perubahan sifat kimiawi dari bahan penyusunnya.

3. Sarana untuk penanganan secara selamat dari komponen teras harus tersedia untuk menjamin integritas selama transportasi, penyimpanan, instalasi dan pengisian bahan bakar
4. Integritas struktur teras harus terjamin sehingga teras dapat dikendalikan secara selamat, baik dalam keadaan operasi normal, transien maupun dalam keadaan kecelakaan dasar desain. Dalam hal ini, beban mekanik, statis, dinamis, termasuk stres termal harus dipertimbangkan.
5. Perangkat bahan bakar, struktur bagian dalam bejana reaktor dan sistem pendingin reaktor harus dirancang untuk meminimalkan peluang penyumbatan aliran pendingin karena pelepasan bagian yang longgar, sehingga mencegah kerusakan teras saat sedang beroperasi dan saat keadaan kecelakaan dasar desain.
6. Teras dan komponen terkait harus dirancang agar kompatibel terhadap pengaruh iradiasi dan proses kimia dan fisika.
7. Pergerakan tak terkendali dari piranti kendali reaktivitas harus dicegah.

Pertimbangan Aspek Klasifikasi keselamatan Desain Teras

Dalam IAEA Safety Guide NS-G-1.12 [40] pertimbangan klasifikasi keselamatan desain teras reaktor meliputi beberapa aspek, yaitu:

1. Seluruh komponen dan struktur teras reaktor harus diklasifikasikan secara tepat sesuai kepentingannya terhadap keselamatan.[41]
2. Klasifikasi keselamatan yang tepat, analisis konsekuensi yang memadai, penilaian dan verifikasi, harus dilakukan untuk memastikan integritas teras dan mempertahankan kinerja fungsi keselamatan, kendali reaktivitas dan pendinginan teras.
3. Konsekuensi kegagalan setiap sistem dan komponen, termasuk konsekuensi yang mungkin pada sistem dan komponen lain, harus dianalisis secara hati-hati untuk menentukan klasifikasi yang tepat.

Code dan standar yang IAEA terbitkan merupakan pedoman untuk tipe atau jenis reaktor berpendingin air ringan (LWR) sedangkan untuk reaktor berjenis lain umumnya diterbitkan IAEA dalam bentuk pedoman khusus.

II.2 Kajian Teknis Aspek-Aspek Pertimbangan Keselamatan Umum Desain Teras Reaktor Jenis HTGR dan MSR

Menurut IAEA Safety Guide NS-G-1.12 [40] pertimbangan tujuan dan konsep keselamatan meliputi tiga aspek, yaitu:

1. Tujuan keselamatan nuklir umum
2. Tujuan proteksi radiasi
3. Tujuan keselamatan teknis

Tujuan keselamatan nuklir umum adalah melindungi individu, masyarakat dan lingkungan

dari kerusakan atau akibat buruk lainnya dengan menyiapkan dan menjaga sistem pertahanan yang efektif di dalam instalasi nuklir terhadap bahaya radiologis.

Tujuan proteksi radiasi adalah menjamin bahwa pada semua keadaan operasi, semua paparan radiasi di dalam instalasi atau akibat pelepasan material radioaktif dari instalasi yang telah direncanakan tetap dijaga di bawah batas yang telah ditetapkan dan serendah mungkin yang dapat dicapai secara masuk akal, dan untuk menjamin mitigasi konsekuensi radiologis akibat kecelakaan apa pun.

Tujuan keselamatan teknis adalah mampu mengambil semua tindakan praktis dan terukur untuk:

1. mencegah kecelakaan di dalam instalasi nuklir,
2. memitigasi konsekuensi seandainya kecelakaan terjadi
3. menjamin dengan tingkat keyakinan tinggi bahwa untuk semua kemungkinan kecelakaan yang diperhitungkan dalam desain instalasi, termasuk kecelakaan yang berkemungkinan sangat kecil, menimbulkan konsekuensi radiologis yang kecil dan di bawah batas yang ditetapkan
4. menjamin bahwa kemungkinan terjadinya kecelakaan dengan konsekuensi radiologis serius sangat rendah.

Semua tujuan keselamatan tersebut mensyaratkan bahwa instalasi nuklir dirancang dan dioperasikan sedemikian rupa sehingga semua sumber paparan radiasi tetap berada di bawah kendali teknis dan administrasi yang ketat. Namun, tujuan proteksi radiasi tidak menutup kemungkinan adanya paparan terbatas ke masyarakat atau pelepasan sejumlah bahan radioaktif dari instalasi ke lingkungan yang diizinkan sesuai aturan selama kondisi operasi normal. Paparan dan pelepasan seperti itu harus dikendalikan secara ketat dan harus sesuai dengan batas operasional dan standar proteksi radiasi.

Secara umum untuk semua desain reaktor nuklir, dari sisi penyebabnya, kecelakaan reaktor nuklir dikelompokkan menjadi dua macam, yaitu :

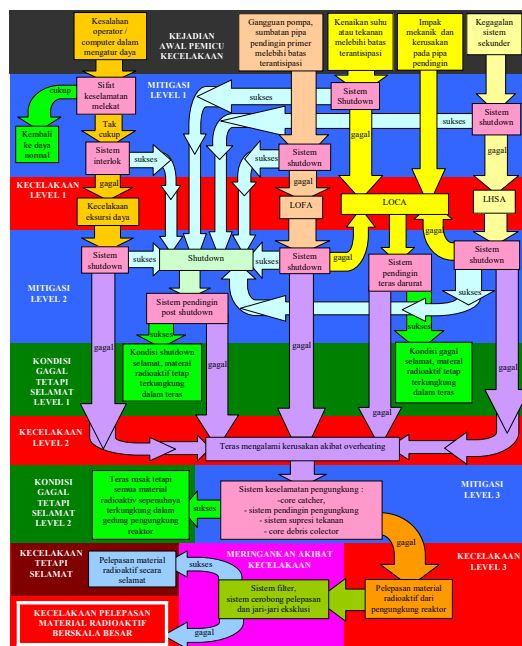
1. Kecelakaan kenaikan daya tak terkendali (*Power Excursion Accident*)
2. Kecelakaan kehilangan kemampuan pengambilan kalor

Kecelakaan kehilangan kemampuan pengambilan kalor dibedakan menjadi :

1. Kecelakaan kehilangan aliran pendingin (*Loss of Flow Accident / LOFA*)
2. Kecelakaan kehilangan pendingin (*Loss of Coolant Accident / LOCA*)
3. Kecelakaan kehilangan pelepas kalor (*Loss of Heat Sink Accident / LHSA*)

Kecelakaan kenaikan daya tak terkendali (*power excursion*) adalah kecelakaan kriticalitas tak dikehendaki yang terjadi dalam reaktor nuklir. Kecelakaan ini membuat reaktor menjadi super

kritis dan mengalami kenaikan daya tanpa dikehendaki.



Gambar 1. Skema Diagram Propagasi Kecelakaan pada Desain Reaktor Nuklir dan Langkah Mitigasi

Pertimbangan Desain HTGR

HTGR (*High Temperature Gas Cooled Reactor*) adalah reaktor yang menggunakan moderator grafit dan pendingin helium. Bahan bakar HTGR adalah berupa *fuel kernel* yaitu berupa oksida, karbida atau nitrida dari uranium, plutonium atau torium yang dibuat berbentuk bola kecil dengan diameter sekitar 1 mm.

Terdapat dua desain HTGR yaitu adalah HTGR *pebble bed* yang menggunakan elemen bahan bakar berbentuk bola dan HTGR prismatik yang menggunakan perangkat bahan bakar berbentuk blok prisma segi enam.

Kecelakaan yang mungkin terjadi pada HTGR adalah:

1. Kecelakaan reaktivitas yang disebabkan oleh penyisipan reaktivitas positif melebihi batas yang diizinkan.
2. Kecelakaan pendingin, yaitu:
 - a) Kecelakaan kehilangan aliran pendingin (*Loss of Flow Accident = LOFA*) yang disebabkan oleh kegagalan pompa pendingin atau sumbatan pada saluran pendingin.
 - b) Kecelakaan kehilangan tekanan pendingin (*Coolant Depressurization Accident*) yang disebabkan oleh lepasnya pendingin dari sistem primer akibat pecahnya pipa saluran pendingin.
 - c) Kecelakaan kehilangan pelepas kalor (*Loss of Heat Sink Accident = LHSA*)

Desain teras reaktor HTGR pada umumnya juga memiliki sifat umpan balik daya negatif, yaitu jika daya reaktor mengalami kenaikan (sehingga

suhu reaktor meningkat) maka akan menimbulkan reaktivitas negatif sehingga mengurangi reaktivitas reaktor semula. Sifat umpan balik daya negatif pada HTGR terutama disebabkan oleh efek doppler, yaitu peningkatan serapan resonansi neutron akibat kenaikan suhu bahan bakar.

Pada desain HTGR, jika terjadi kecelakaan DBA maka sistem *shutdown* harus mampu *shutdown* reaktor. Jika setelah kecelakaan DBA sistem pendingin pasca *shutdown* tidak bekerja, maka suhu teras reaktor akan naik. Sifat *inherent safety* pada HTGR juga akan menimbulkan reaktivitas negatif akibat kenaikan suhu pasca kecelakaan DBA.

Pertimbangan Desain MSR

Molten Salt Reactor (MSR) merupakan salah satu dari 6 jenis desain reaktor yang oleh GIF (*Generation Four International Forum*) dimasukkan dalam kategori reaktor maju (*Advanced Reactor*) atau reaktor generasi 4. *Molten Salt Reactor* adalah reaktor yang menggunakan bahan bakar berbentuk garam cair. Jenis garam yang digunakan pada umumnya adalah garam fluorida. MSR dioptimalkan untuk menggunakan torium sebagai bahan bakar fertil. Torium setelah menyerap neutron akan terkonversi menjadi ^{233}U . Karena ^{233}U tidak terdapat di alam, maka MSR generasi pertama memerlukan material fisil selain ^{235}U .

MSR memiliki sifat keselamatan yang sangat bagus. Karakteristik MSR yang berkaitan dengan keselamatan adalah:

1. Reaktivitas lebih reaktor sangat rendah
2. Koefisien umpan balik daya negatif
3. Frekuensi kerusakan parah teras (*core damage frequency*) sangat rendah
4. Mampu menerapkan sistem keselamatan yang secara total bersifat pasif, yang terdiri dari:
 - a) Sistem *shutdown* pasif
 - b) Sistem pendingin pasca *shutdown* pasif
 - c) Sistem pendingin pasif untuk sistem penanganan limbah radioaktif.

Penggunaan bahan bakar cair memungkinkan MSR mengaplikasikan metode on power refueling dan sekaligus on power fuel reprocessing. Dengan aplikasi kedua metode ini, reaktivitas lebih bahan bakar aktual pada saat reaktor beroperasi dapat dibuat sangat kecil tanpa menggunakan racun dapat bakar.

Dalam kondisi teras setimbang, MSR memiliki koefisien reaktivitas suhu yang bernilai negatif. Efek doppler pada bahan bakar akan memberikan koefisien reaktivitas suhu yang negatif.

Moderator grafit dapat memberikan efek reaktivitas umpan-balik daya positif akibat pergeseran spektrum neutron akibat suhu. MSR harus didesain supaya koefisien umpan-balik daya negatif akibat efek doppler lebih dominan dibandingkan dengan koefisien umpan-balik daya positif moderator grafit. Dengan demikian secara

keseluruhan desain MSR memiliki koefisien reaktivitas umpan-balik daya yang negatif.

Hal ini menunjukkan bahwa MSR memiliki sifat keselamatan melekat (*inherent safety*), yaitu koefisien umpan balik daya yang bernilai negatif. Ditambah dengan reaktivitas lebih bahan bakar aktual yang sangat kecil, maka kecelakaan ekskursi daya tidak mungkin terjadi.

Tabel 1. Koefisien Umpan Balik pada Tipe Reaktor

Parameter	Koefisien Reaktivitas Umpan-Balik					
	PWR	BWR	HWR		HTGR	MSR
			Menggunakan <i>pressure tube</i>	Menggunakan bejana reaktor		
Suhu pendingin	-	-	+	+	-0	Tidak ada pendingin
Densitas pendingin	+	+	-	-	-0	Tidak ada pendingin
Suhu moderator	-	-	-0	-	+	+
Densitas moderator	Moderator sekaligus pendingin		Nilai tidak signifikan	Nilai tidak signifikan	-	-
Suhu bahan bakar	-	-	-	-	-	-
Densitas bahan bakar	Nilai tidak signifikan	Nilai tidak signifikan	Nilai tidak signifikan	Nilai tidak signifikan	Nilai tidak signifikan	- (untuk pengurangan densitas kecil), + (untuk pengurangan densitas besar)
Daya	-	-	-0	-0	-	-

Keterangan:

Tanda + berarti jika nilai parameter meningkat, reaktivitas reaktor akan bertambah

Tanda - berarti jika nilai parameter meningkat, reaktivitas reaktor akan berkurang

II.3 Dosis Radiasi Pekerja dan ALARA

Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 4 Tahun 2013 Tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir Pasal 15 huruf a menyebutkan bahwa batas dosis keselamatan untuk pekerja radiasi adalah 20 mSv per tahun yang setara dengan 0,4 mSv per minggu. Pasal 23 huruf a pada Perka BAPETEN No.4 tahun 2013 menyebutkan bahwa batas dosis keselamatan untuk masyarakat umum adalah 1 mSv per tahun yang setara dengan 0,02 mSv per minggu.

Pertimbangan Desain HTGR

Barrier pelepasan zat radioaktif ke lingkungan pada desain HTGR secara berurutan adalah:

1. Kernel bahan bakar dengan lapisan TRISO
2. Matriks grafit pada elemen atau perangkat bahan bakar
3. Dinding sistem primer
4. *Reactor cavity* atau gedung reaktor (*containment*)
5. Jari-jari eksklusi

Pertimbangan Desain MSR

Barrier pelepasan zat radioaktif ke lingkungan pada desain MSR secara berurutan adalah:

1. Dinding sistem primer reaktor yang meliputi bejana reaktor, pipa bahan bakar, pompa bahan bakar, alat penukar kalor primer
2. *Reactor cavity*
3. Gedung reaktor (*containment*)
4. Jari-jari eksklusi

III. KAJIAN PERTIMBANGAN KESELAMATAN KHUSUS DESAIN TERAS REAKTOR

Berdasarkan IAEA Safety Guide NS-G-1.12 [40] pertimbangan keselamatan umum desain teras reaktor meliputi beberapa aspek, yaitu:

1. Elemen dan perangkat bahan bakar
2. Pendingin
3. Moderator
4. Karakteristik reaktivitas teras dan cara pengendaliannya
5. Sistem *shutdown*
6. Teras reaktor dan struktur terkait
7. Manajemen teras
8. Sistem pemantauan teras
9. Analisis keselamatan teras

Berdasarkan IAEA Safety Guide NS-G-1.12 [40] aspek-aspek yang perlu dipertimbangkan pada desain elemen dan perangkat bahan bakar meliputi:

1. Ketentuan umum
2. Desain dan perangkat elemen bahan bakar
3. Pengaruh termal dan derajat bakar
4. Pengaruh iradiasi
5. Pengaruh variasi level daya
6. Efek mekanis pada elemen bahan bakar
7. Pengaruh racun dapat bakar pada bahan bakar
8. Korosi dan hidridisasi elemen bahan bakar
9. Pertimbangan keselamatan mekanik dalam desain

Berdasarkan IAEA Safety Guide NS-G-1.12 [40] aspek-aspek yang perlu dipertimbangkan pada desain pendingin meliputi kestabilan sifat-sifat pendingin yang berkaitan dengan kemampuan untuk memindahkan kalor.

Berdasarkan IAEA Safety Guide NS-G-1.12 [40] aspek-aspek yang perlu dipertimbangkan pada desain moderator meliputi:

1. Kemampuan moderasi yang sesuai
2. Kestabilan material moderator terhadap pengaruh iradiasi
3. Kompatibilitas moderator terhadap material yang lainnya (pendingin atau bahan bakar)

Berdasarkan IAEA Safety Guide NS-G-1.12 [40] aspek-aspek yang perlu dipertimbangkan pada karakteristik reaktivitas teras dan cara pengendaliannya meliputi:

1. Karakteristik reaktivitas teras
2. Jenis dan efisiensi dari sarana pengendalian reaktivitas

3. Nilai maksimum reaktivitas dan laju penyisipan reaktivitas
4. Kendali daya global dan lokal
5. Pengaruh racun dapat bakar
6. Pengaruh iradiasi

Berdasarkan IAEA Safety Guide NS-G-1.12 [40] aspek-aspek yang perlu dipertimbangkan pada sistem *shutdown* meliputi:

1. Berbagai cara *shutdown*
2. Keandalan
3. Efektivitas *shutdown* dan *reactivity holddown*
4. Laju *shutdown*

Berdasarkan IAEA Safety Guide NS-G-1.12 [40] aspek-aspek yang perlu dipertimbangkan pada struktur teras reaktor dan struktur terkait meliputi:

1. Batas sistem primer
2. Struktur pendukung teras reaktor
3. Struktur pendukung perangkat bahan bakar
4. Struktur pendukung untuk *shutdown* dan kendali reaktivitas
5. Struktur pendukung untuk instrumentasi dalam teras
6. Struktur internal bejana reaktor lainnya, misalnya *sparger* air umpan, pemisah uap, penering uap, *baffle* teras, reflektor dan perisai termal.

Berdasarkan IAEA Safety Guide NS-G-1.12 [40] aspek-aspek yang perlu dipertimbangkan pada manajemen teras antara lain:

1. batas desain;
2. informasi desain untuk operasi reaktor;
3. perhitungan teras reaktor; dan
4. pengisian ulang bahan bakar nuklir

Berdasarkan IAEA Safety Guide NS-G-1.12 [40] aspek-aspek yang perlu dipertimbangkan pada sistem pemantauan teras meliputi:

1. parameter yang mengindikasikan kondisi teras, serta untuk menilai status teras dan fitur terkait pada kondisi kecelakaan
2. memiliki akurasi, kecepatan respons, rentang dan keandalan yang memadai untuk menjalankan fungsi pemantauan; dan
3. memudahkan dilakukan pengujian kontinyu atau periodik

Berdasarkan IAEA Safety Guide NS-G-1.12 [40] aspek-aspek yang perlu dipertimbangkan pada Analisis Keselamatan meliputi kejadian awal terpostulasi dan metode analisis keselamatan yang digunakan.

IV. KUALIFIKASI, PENGUJIAN DAN PERAWATAN

Berdasarkan IAEA Safety Guide NS-G-1.12 [40], kualifikasi, pengujian dan perawatan pada teras reaktor meliputi:

1. Kualifikasi peralatan, yakni Perlu ditetapkan kualifikasi yang mengonfirmasikan kemampuan peralatan teras reaktor dalam melakukan fungsi keselamatannya, untuk periode waktu yang

relevan, dengan mempertimbangkan kondisi lingkungan yang diberikan (seperti tekanan, suhu, tingkat radiasi, beban mekanis dan getaran).

2. Ketentuan untuk pengujian dan perawatan, yaitu

Ketentuan pengujian untuk memastikan bahwa teras dan struktur terkait serta kendali reaktivitas dan sistem *shutdown* akan melakukan fungsi mereka sepanjang umur hidup. Ketentuan juga harus dibuat untuk menjamin pemeriksaan setiap perangkat bahan bakar sebelum dan setelah iradiasi guna mendeteksi kerusakan yang mungkin.

V. JAMINAN KUALITAS DALAM DESAIN

Berdasarkan IAEA Safety Guide NS-G-1.12 [40], Desain dan fabrikasi dengan mutu tinggi harus dipastikan untuk bahan bakar dan komponen teras dengan cara penetapan dan penerapan yang memenuhi prosedur jaminan mutu. Tingkat jaminan mutu tinggi harus diterapkan dalam pengembangan dan penilaian program komputer dan metode analisis keselamatan terkait. Mengingat sangat vitalnya fungsi struktur, sistem, dan komponen teras reaktor, maka teras reaktor daya wajib menggunakan komponen dengan standar keselamatan tertinggi yang mana hal ini juga telah diterapkan pada reaktor serba guna GA-Siwabessy. Ketentuan mengenai klasifikasi keselamatan struktur, sistem, dan komponen instalasi nuklir sedang dibahas oleh unit pengaturan instalasi dan bahan nuklir untuk dijadikan peraturan kepala BAPETEN. Akan tetapi hal yang tidak kalah penting adalah bahwa harus ada kesesuaian standar yang diberlakukan untuk komponen-komponen teras ini, misalnya jika standar Jerman menggunakan DIN, maka harus ada kesesuaian dengan standar yang berlaku di Jepang (JIS) atau Amerika (ASME) atau negara lainnya, bila akan menggunakan standar dari negara yang berbeda. Begitu pula dengan standar yang diberlakukan untuk sistem instrumentasi dan kendali harus mengikuti standar IEEE.

VI. KESIMPULAN

Dalam mendesain teras reaktor, pemegang izin harus melaksanakan persyaratan keselamatan umum dan persyaratan keselamatan khusus desain teras, mempertimbangkan pengujian dan perawatan teras, serta memberlakukan jaminan kualitas yang ketat.

Kajian desain teras reaktor daya perlu dilakukan dengan menyeluruh dan komprehensif mengingat sumber bahaya utama reaktor berasal dari teras.

Sasaran yang ingin dicapai dalam kajian ini adalah tersedianya ketentuan keselamatan yang akan berguna dalam penyusunan peraturan Kepala BAPETEN tentang ketentuan keselamatan desain teras reaktor daya. Ketentuan keselamatan yang berhasil diidentifikasi diharapkan dapat

diimplementasikan terhadap desain teras reaktor dengan tipe Light Water Reactor (LWR), High Temperature Gas Cooled Reactor (HTGR) tipe pebble bed, dan Molten Salt Reactor (MSR).

ACKNOWLEDGEMENT

Kajian ini merupakan kegiatan kajian kerjasama swakelola antara P2STPIBN BAPETEN dan Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika UGM tahun 2017. Makalah hanya mengangkat sebagian topik dari kajian. Penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak terkait atas kerjasama yang terjalin begitu juga kerja keras dan efektif hingga terselesaikannya kajian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Steve Hucik. *ABWR and ESBWR: Safety and Reliability in Construction and Operation*. Dokumen teknis, GE-Hitachi Nuclear Energy International, Wilmington, 2011.
- [2] W. E. Cummins, M. M. Corleti, T. L. Schulz. *Westinghouse AP-1000 Advance Passive Plant*. Dokumen teknis, Westinghouse Electric Company LLC, Cranberry Township, 2003.
- [3] *Status Report – APWR (Mitsubishi, Japan)*. Dokumen teknis, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2012.
- [4] Kim, Han Gon. *Gen III/Gen III+ : Korean Perspective APR 1400 Advanced Power Reactor 1400*. Dokumen teknis, Korea Hydro and Nuclear Power Co.
- [5] *The EPR Reactor: from Paper to Concrete, The Path to Greatest Certainty*. Dokumen teknis, Areva, Paris, 2008.
- [6] Jacopo Buongiorno. "PWR Description". Kuliah *Engineering of Nuclear Systems*. Center for Advanced Nuclear Energi System MIT, Cambridge, 22 Juni 2010.
- [7] Khurram Mehboob, Mohammad S. Aljohani. "Modelling and Simulation of Radio-iodine Released Inside the Containment as Result of an Accident". *Progress in Nuclear Energy*, 88:75-87, 2016.
- [8] Andang Widi Harto. *PWR (Pressurized Water Reactor) dan Perkembangannya: Deskripsi Umum*. Diklat, Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2013.
- [9] World Nuclear Association. *Nuclear Fuel Fabrication*. Diakses dari <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/fuel-fabrication.aspx>, 26 April 2017.
- [10] Committee on the Safety and Security of Commercial Spent Nuclear Fuel Storage. *Safety and Security of Commercial Spent Nuclear Fuel Storage: Public Report*. Laporan Penelitian, The National Academies, Washington, D.C., 2006.
- [11] *Boiling Water Reactor (BWR) Systems*. Dokumen teknis, USNRC Technical Training Center, Rockville, 2003.

- [12] *The ESBWR Plant General Description*. Dokumen teknis, General Electric, Boston, 2007.
- [13] *The ABWR Plant General Description*. Dokumen teknis, General Electric, Boston, 2006.
- [14] *General Electric Systems Technology Manual Chapter 2.1: Reactor Vessel System*. Dokumen teknis, General Electric, Boston, 2011.
- [15] *US-ABWR and EU-ABWR Design, Safety Technology, Operability Features and Their Current Deployment*. Dokumen teknis, Toshiba Corporation, Tokyo, 2011.
- [16] Nuclear Street. *BWR Reactor Vessel Assembly*. Diakses dari https://nuclearstreet.com/nuclear-power-plants/w/nuclear_power_plants/bwr-reactor-vessel-assembly, 26 April 2017.
- [17] LE Fennern. "ABWR Seminar". *Kuliah Reactor, Core, & Neutronics*. GE Energy/Nuclear, Boston, April 2007.
- [18] John David Lambert dan Robert Strain. *Materials Science and Technology*. John Wiley and Sons, Inc, Hoboken, 2006.
- [19] Prof. Kostadin Ivanov. *NUCE 512 - Nuclear Reactor Statics and Fuel Management*. Dokumen teknis, College of Engineering Penn State University, State Collage, 2005.
- [20] Andang Widi Harto. *BWR (Boiling Water Reactor) dan Pengembangannya: Deskripsi Umum*. Diktat, Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2013.
- [21] Frederik Reitsma. *Pebble-bed Reactor Core Neutronics Design and Fuel Cycle*. Dokumen teknis, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2012.
- [22] Andrew C. Kadak, Ph.D.. "High Temperature Gas Reactors". *Kuliah Briefing to Digital Power Capital*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2004.
- [23] Yuliang Sun. "HTR-PM Project Status and Test Program". *Kuliah IAEA TWG-GCR-22, INET/Tsinghua University, internateijing Shi*, 2011.
- [24] Xioming Fu, Masashi Takahashi, Shouhei Ueta, Kazuhiro Sawa. *Comparison of HTGR Fuel Design, Manufacture and Quality Control Methods Between Japan and China*. Dokumen teknis, JAERI-Tech 2002-049, Japan Atomic Energy Research Institute, Naka, 2002.
- [25] *Status report 96 – High Temperature Gas Cooled Reactor – Pebble-Bed Module (HTR-PM)*. Dokumen teknis, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2011.
- [26] "System Research Plant for Very High Temperature Reactor". *Generation IV International Forum*, 2006.
- [27] Malcom P. LaBar. "The Gas Turbine – Modular Helium Reactor: A Promising Option for Near Term Deployment". *GA-A23952*, 2002.
- [28] L. J. Lommers, F. Shahrokhi, J. A. Mayer III, F. H. Southworth. "AREVA HTR Concept for Near-Term Deployment". *Proceedings of HTR 2010*, Praha, 18-20 Oktober 2010.
- [29] Grimes, W. R.. "Molten Salt Reactor Chemistry". *Nuclear Applications and Technology*, 8:137-155, 1970.
- [30] Andang Widi Harto. "Penggunaan Thorium Untuk Pembangkitan Listrik". Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2016.
- [31] M. W. Rosenthal, P. R. Kasten, R. B. Briggs. "Molten-Salt Reactors – History, Status, and Potential". *Nuclear Applications and Technology*, 8:107-117, 1970.
- [32] *Safety and Regulatory Issues of the Thorium Fuel Cycle*. Dokumen teknis, NUREG/CR-7176 ORNL/TM/2013/543, U.S.NRC, Washington, 2014.
- [33] L. Mathieu et al. "Possible Configurations for the TMSR and Advantages of the Fast-Non-Moderated Version". *Nuclear Science and Engineering*, 161:78-79, 2009.
- [34] D. E. Holcomb et al. "Fast Spectrum Molten Salt Reactor Options". Dokumen teknis, ORNL/TM-2011/105, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, 2011.
- [35] Robert Hill, C. G. Hodge, T. Gibbs. "The Potential of the Molten Salt Reactor for Warship Propulsion". Dokumen teknis, BMT Defence Services Ltd, Bath, 2012
- [36] Eduardo D. Greaves. "Thorium as Nuclear Fuel in the Molten Salt Reactor". *Attaining Freedom Through Necessity, the Last Chance for Humanity: Energy Security for the 21st Century*, Frankfurt. 13-14 April 2013.
- [37] David LeBlanc. "Molten Salt Reactors and the Oil Sands: Odd Couple or Key to North American Energy Independence?". Presentasi kepada *Canadian Nuclear Society*, Toronto, 12 Juni 2012.
- [38] Ralph W. Moir dan Edward Teller. "Thorium-Fueled Underground Power Plant Based on Molten Salt Technology". *Fission Reactor Technical Note*, 151, 2004.
- [39] A.W. Harto, Sustainable criticality analysis of PCMSR fuel using thorium as sustainable fuel and low enriched uranium as starting fuel, *Int. J. Nuclear Energy Science and Technology, Vol. 9, No. 3, 2015*
- [40] *Design of the Reactor Core for Nuclear Power Plants*. Dokumen teknis, Safety Guide No. NS-G-1.12, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2005.
- [41] *Safety of Nuclear Power Plants: Design*. Dokumen teknis, Specific Safety Requirements No. SSR-2/1, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2012.
- [42] Andang Widi Harto. *Teknologi Reaktor Maju*. Diktat, Departemen Teknik Nuklir dan Teknik

- Fisika Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2015.
- [43] *Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 3 Tahun 2011 tentang Keselamatan Desain Reaktor Daya*. Dokumen teknis, Badan Pengawas Tenaga Nuklir, Jakarta, 2011.
- [44] *The Operating Organization for Nuclear Power Plants*. Dokumen Teknis, Safety Guide No. NS-G-2.4, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2001.
- [45] *Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants*. Dokumen Teknis, 75-INSAG-3, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1988.
- [46] *Defence in Depth in Nuclear Safety*. Dokumen Teknis, INSAG-10, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1996.
- [47] *Design of Fuel Handling and Storage Systems for Nuclear Power Plants*. Dokumen teknis, Safety Guide No. NS-G-1.4, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2003.
- [48] *Design of the Reactor Coolant System and Associated Systems in Nuclear Power Plants*. Dokumen teknis, Safety Guide No. NS-G-1.9, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2004.
- [49] *Instrumentation and Control Systems Important to Safety in Nuclear Power Plants*. Dokumen teknis, Safety Guide No. NS-G-1.3, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2002.
- [50] Manohar S. Sohal, Matthias A. Ebner, Piyush Sabharwall, Phil Sharpe. *Engineering Database of Liquid Salt Thermophysical and Thermochemical Properties*. Dokumen teknis, INL/EXT-10-18297, Idaho National Laboratory, Idaho Falls, 2010.
- [51] *Westinghouse Technology Manual*. Dokumen teknis, United States Nuclear Regulatory Commission Technical Training Center.
- [52] Dan Gabriel Cacuci. *Handbook of Nuclear Engineering*. Springer Science+Business Media, New York, 2010.
- [53] Robert Katz, Gilbert B. Melese. *Thermal and Flow Design of Helium-Cooled Reactors*. Dokumen teknis, American Nuclear Society, La Grange Park, 1984.
- [54] *Core Management and Fuel Handling for Nuclear Power Plants*. Dokumen teknis, Safety Standards Series No. NS-G-2.5, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2002.
- [55] Andang Widi Harto. "Study on the Ability of PCMSR to Produce Valuable Isotopes as by Produce of Energy Generation". *Proceeding of 2nd International Symposium on BNCT, the Application of Nuclear Technology to Support National Sustainable Development, Health, Agriculture, Energy and Environment*, Surakarta, 10–11 Agustus 2016.
- [56] *Safety Assessment and Verification for Nuclear Power Plants*. Dokumen teknis, Safety Standards Series No. NS-G-1.2, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2001.
- [57] *Design of Reactor Containment Systems for Nuclear Power Plants*. Dokumen teknis, Safety Standards Series No. NS-G-1.10, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2004.
- [58] *Maintenance, Surveillance and In-Service Inspection in Nuclear Power Plants*. Dokumen teknis, Safety Standards Series No. NS-G-2.6, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2002.
- [59] *Leadership and Management for Safety*. Dokumen teknis, General Safety Requirements No. GSR Part 2, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2016.
- [60] *Application of the Management System for Facilities and Activities*. Dokumen teknis, Safety Guide No. GS-G-3.1, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2006.
- [61] *The Management System for Nuclear Installations*. Dokumen teknis, Safety Guide No. GS-G-3.5, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2009.

Nama Penanya : Sihana
Instansi : UGM
Nama Penyaji : MA Susanto
Judul Makalah : **KAJIAN IDENTIFIKASI KETENTUAN KESELAMATAN DALAM DESAIN TERAS REAKTOR DAYA**
Kode Makalah : OB03

Pertanyaan/Masukan/Saran/Komentar

Pada ketentuan integritas teras apakah berlaku untuk HTGR dan MSR, apakah dapat diberlakukan untuk kedua jenis reaktor.

Apakah makalah ini menyatukan berbagai macam tipe reaktor dalam pembuatan ketentuan keselamatan RD?

Jawaban/Komentar dari Penyaji

Kajian telah mengidentifikasi untuk berbagai macam tipe reaktor, karena masing-masing tipe memiliki karakteristik yang berbeda.

Namun telah dilakukan metode kajian untuk mengidentifikasi sesuai lingkup, yang dimulai dari desain umum dan desain khusus. Untuk desain khusus telah mengakomodir berbagai macam tipe reaktor.