

Review Desain *Thorium Molten Salt Reactor* 500 (TMSR-500)

Agus Waluyo¹ dan Azizul Khakim²

¹Direktorat Perizinan Instalasi dan Bahan Nuklir, BAPETEN, Jakarta

²Pusat Pengkajian Sistem dan Teknologi Pengawasan Instalasi dan Bahan Nuklir, BAPETEN, Jakarta

a.waluyo@bapeten.go.id

ABSTRAK

Saat ini banyak teknologi PLTN yang terbaru yang ditawarkan untuk dibangun di Indonesia, salah satu teknologi yang gencar untuk ditawarkan dibangun di Indonesia adalah PLTN jenis *Molten Salt Reactor* (MSR). Perusahaan yang menawarkan PLTN jenis MSR ini adalah PT ThorCon Indonesia. PT ThorCon sudah mempresentasikan desain mereka ke berbagai pihak seperti ke BAPETEN, ESDM dan instansi lainnya. PT ThorCon menamakan reaktor mereka dengan *Thorium Molten Salt Reactor* 500 (TMSR 500). Oleh karena itu perlu ada suatu kajian untuk mereview desain mereka terutama terkait dengan aspek keselamatan. Dari hasil penelaah terkait dengan desain TMSR 500, ada beberapa reviu terkait dengan desain TMSR 500 yang antara lain adalah: secara umum, dokumen yang menjelaskan desain TMSR 500 masih sangat umum dan belum detail, sehingga hasil reviu belum bisa dilakukan secara mendalam, untuk desain neutronik, munculnya *void* di dalam teras reaktor perlu untuk diperhatikan karena ketika *void* di dalam teras naik sampai dengan 65% akan menimbulkan reaktivitas positif $0,115(5dk/k)/(\%void)$, ThorCon MSR didesain untuk NBD 50 mSv/tahun. Hal ini tidak sesuai dengan aturan NBD di Indonesia

Kata Kunci: *Molten Salt Reactor*, ThorCon, TMSR 500, reviu pra perizinan.

Short Presentation

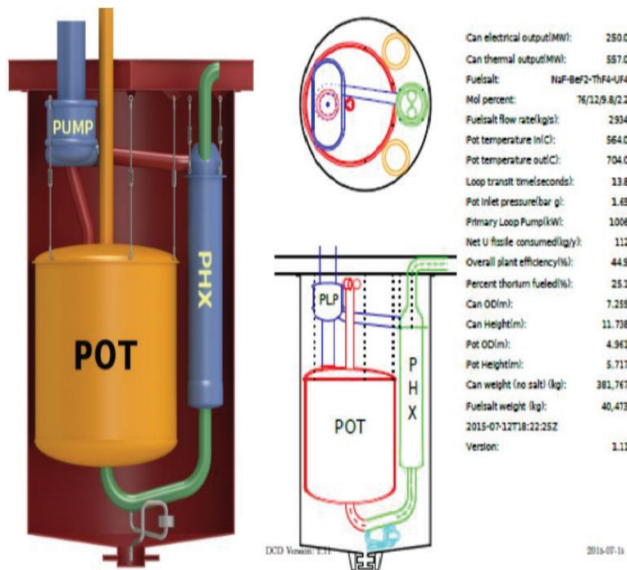
1 Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Saat ini banyak teknologi PLTN baru yang ditawarkan untuk dibangun di Indonesia, salah satu teknologi yang gencar ditawarkan untuk dibangun di Indonesia adalah PLTN jenis *Molten Salt Reactor* (MSR). Perusahaan yang menawarkan PLTN jenis MSR ini adalah PT ThorCon Indonesia. PT ThorCon sudah mempresentasikan desain mereka ke berbagai pihak seperti ke BAPETEN, ESDM dan instansi lainnya [1]. PT ThorCon memberikan nama reaktor mereka dengan nama *Thorium Molten Salt Reactor* 500 (TMSR 500).

Menimbang rencana pembangunan TMSR 500 yang akan dilakukan oleh PT ThorCon maka perlu ada suatu kajian untuk mereview desain mereka terutama terkait dengan aspek keselamatan yaitu dengan cara membandingkan desain TMSR 500 dengan peraturan dan perundang-undangan yang ada di Indonesia maupun standar yang ada di IAEA.

Saat ini banyak pedoman yang tersedia untuk melakukan review teknologi PLTN terkini, salah satunya adalah dokumen GD-385: *Pre-licencing Review of Vendor's Reactor* dari CNSC Kanada (*Canadian Nuclear Safety Commission*) [2]. Dokumen tersebut berisi mengenai pedoman untuk melakukan reviu terkait teknologi PLTN terkini sebelum masuk ke proses perizinan (Reviu Pra Perizinan). Review Pra Perizinan merupakan proses yang saat ini diterapkan oleh CNSC Kanada atas permintaan vendor atau pemasok PLTN untuk memberikan pandangan atas desain PLTN mereka. Reviu ini dapat diajukan oleh vendor PLTN sebelum pengajuan permohonan izin kepada Badan Pengawas. Reviu ini dapat memberikan identifikasi awal dan penyelesaian terhadap masalah yang timbul terkait dengan regulasi atau teknis dalam proses desain, terutama yang dapat mengakibatkan perubahan signifikan pada desain atau analisis keselamatan. Sehingga tujuan dari proses ini adalah untuk memastikan kesesuaian desain reaktor dengan regulasi dan ketentuan keselamatan dalam rangka melindungi masyarakat. Reviu Pra-Perizinan ini berbeda



Gambar 1. CAN dan Komponen Sistem Primer TMSR 500 [3]

dengan sertifikasi desain reaktor dan tidak ada kaitannya dengan penerbitan izin oleh badan pengawas.

Tujuan dari kajian ini adalah melakukan revidi terkait dengan desain reaktor TMSR 500 dengan mengacu pada dokumen GD-385 sehingga akan memberikan gambaran yang komprehensif terkait desain TMSR 500 dari aspek keselamatan.

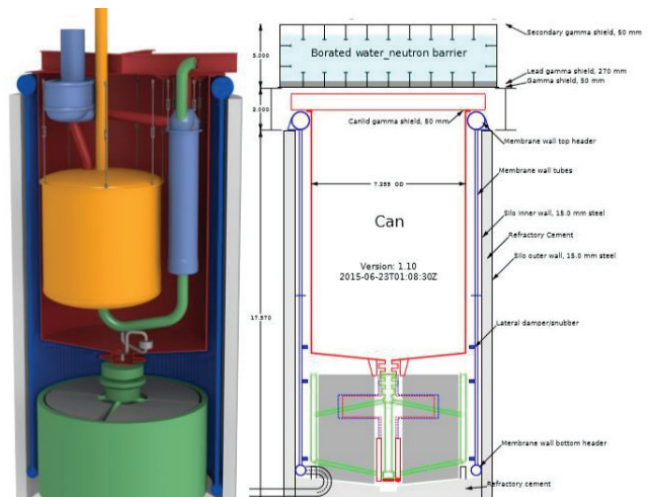
2 Landasan Teori/Pokok Bahasan

2.1 Desain TMSR 500

Penjelasan umum tentang reaktor TMSR 500 pada tulisan ini mengacu pada tulisan yang diterbitkan oleh Martingale Inc yang berjudul “*ThorCon TM the Do-able Molten Salt Reactor-Design Control Document*” versi tahun 2015 [3]. TMSR 500 merupakan reaktor nuklir jenis *molten salt reactor* (MSR) yang mempunyai 2 modul reaktor yang masing-masing berdaya 550 MWth. Kedua modul ini mensuplai kalor satu unit sistem turbin uap. Sistem turbin uap tersebut mampu membangkitkan daya listrik sebesar 500 MWe.

TMSR-500 memiliki 4 untai sistem sirkulasi fluida, yaitu sistem sirkulasi fluida bahan bakar (sistem primer), sistem sirkulasi fluida *intermediet*, sistem sirkulasi fluida pendingin sekunder dan sistem fluida kerja konversi energi.

Sistem primer reaktor TMSR 500 terdiri dari bejana reaktor yang disebut POT, pompa sirkulasi bahan bakar, alat penukar kalor primer (PHX/Primary Heat Exchanger), pipa aliran bahan bakar dari POT (bejana reaktor) ke pompa sirkulasi bahan bakar, pipa aliran bahan bakar dari pompa sirkulasi bahan bakar ke IHX dan pipa sirkulasi bahan bakar dari PHX kembali ke POT (bejana reaktor). Semua komponen sistem primer reaktor TMSR 500 ditempatkan dalam sebuah wadah yang disebut sebagai CAN. **Gambar 1** menunjukkan CAN dan komponen sistem primer reaktor TMSR 500 yang ada di dalamnya.



Gambar 2. Posisi CAN dan FDT dalam Silo [3].

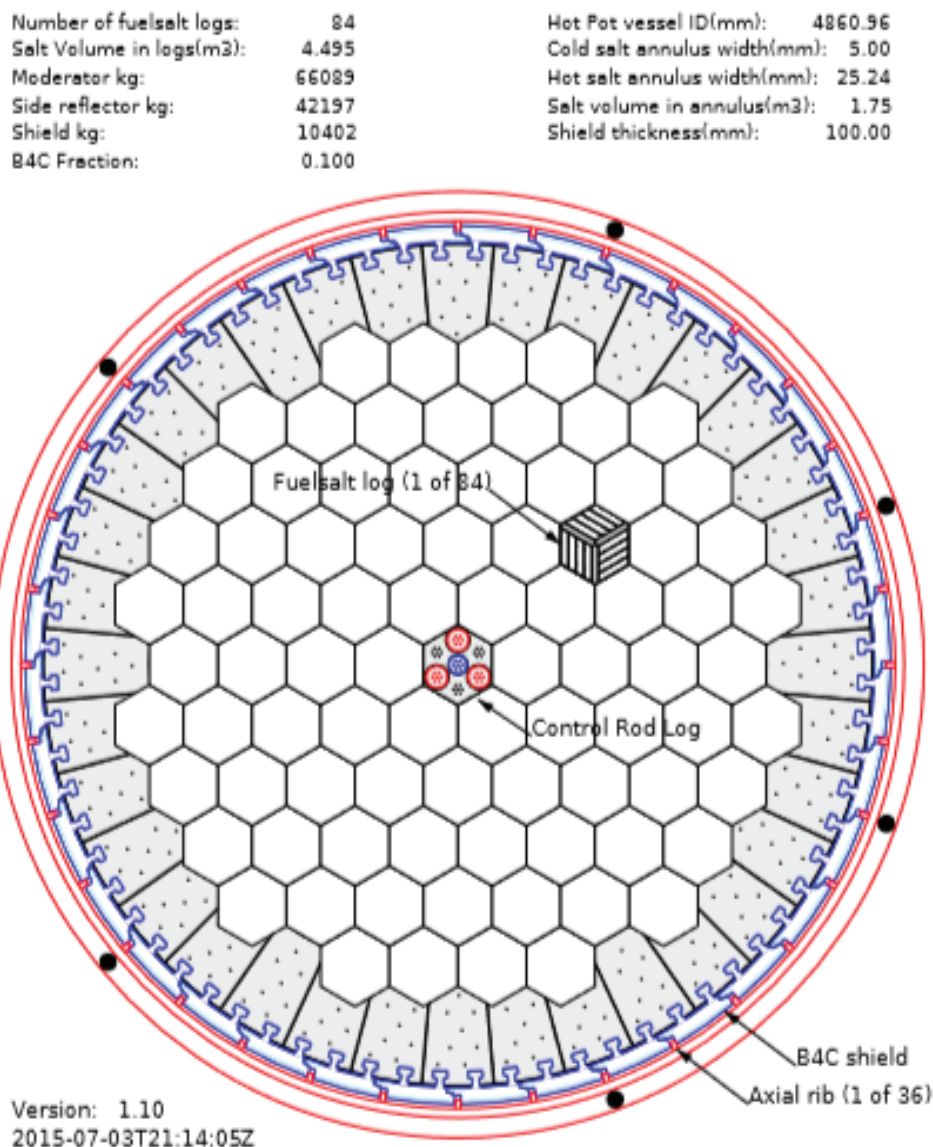
Di bawah CAN diletakkan tangki pengurasan bahan bakar (*Fuel Drain Tank /FDT*) yang difungsikan untuk menampung bahan bakar pada saat reaktor padam. CAN dan tangki pengurasan bahan bakar diletakkan dalam sebuah Silo. Sisi dalam dinding Silo dilengkapi dengan membran Silo yang terdiri dari pipa-pipa baja yang berisi air. Boron yang terdapat pada asam borat tersebut berfungsi untuk menyerap neutron. Dengan demikian, tangki asam borat penutup Silo tersebut berfungsi sebagai perisai neutron. **Gambar 2** berikut ini menunjukkan posisi CAN dan FDT dalam Silo.

Bejana reaktor ThorCon-MSR yang disebut POT terbuat dari logam tahan karat SUS316H berbentuk silinder dengan penutup atas dan penutup bawah berbentuk oval. Pada bagian dalam bejana terdapat perangkat bahan bakar (*fuel assembly*) berbentuk heksagonal yang disebut sebagai LOG. TMSR 500 memiliki 84 LOG perangkat bahan bakar. Pada bagian tengah silinder reaktor terdapat 1 perangkat (LOG) kendali. Susunan 84 LOG perangkat bahan bakar dan 1 LOG kendali membentuk teras reaktor. Di sekeliling teras terdapat reflektor radial yang terbuat dari grafit. Pada bagian atas dan bawah teras reaktor terdapat reflektor aksial yang terbuat dari grafit. Pada **Gambar 3**, ditunjukkan posisi LOG kendali di bagian tengah (sumbu pusat) dari POT dan dikelilingi oleh LOG-LOG perangkat bahan bakar yang berjumlah 84. Teras reaktor dikelilingi oleh reflektor radial yang tersusun dari blok-blok grafit.

Di antara permukaan luar reflektor radial dan bejana terdapat perisai radiasi neutron yang terbuat dari bahan boron karbida (B_4C). Perisai radiasi neutron ini berfungsi untuk melindungi bejana reaktor supaya tidak terkena radiasi neutron secara berlebihan. Terdapat 36 rib aksial yang pada permukaan dalam dinding bejana reaktor yang berfungsi untuk menahan dan mengunci struktur reflektor radial dan perisai radiasi neutron.

2.2 Revidi Desain Mengacu pada Dokumen GD-385: Pre-licencing Review of Vendor's Reactor

Ada sembilan belas (19) area fokus yang ditinjau selama revidi desain dan mencakup topik terkait dengan keselamatan



Gambar 3. Penampang Melintang dari Susunan Perangkat Bahan Bakar (LOG) dalam Bejana Reaktor (POT secara detail) [3]

yang signifikan untuk desain sehingga masalah apa pun yang teridentifikasi dapat ditangani oleh vendor di awal proses desain. Sembilan belas (19) area fokus tersebut adalah [2]:

1. Deskripsi umum instalasi, pertahanan berlapis (*defend in depth*), tujuan dan sasaran keselamatan, kriteria penerimaan dosis.
2. Klasifikasi struktur, sistem dan komponen (SSK).
3. Desain teras reaktor nuklir
4. Desain dan kualifikasi bahan bakar.
5. Sistem dan fasilitas kendali:
 - a. Sistem kendali utama
 - b. Kendali dan instrumentasi
 - c. Fasilitas kendali
 - d. Sistem catu daya darurat.
6. Peralatan untuk pemadaman reaktor
7. Sistem pendingin teras darurat dan pembuangan panas darurat
8. *Containmen/confinement* dan struktur sipil yang penting untuk keselamatan
9. Kecelakaan di luar dasar desain (BDBA) dan kecelakaan parah
10. Analisis keselamatan, meliputi:
 - a. Analisis keselamatan deterministik
 - b. Analisis keselamatan probabilistik
 - c. Bahaya internal dan eksternal
11. Desain batas tekan
12. Proteksi kebakaran
13. Proteksi radiasi
14. Kritikalitas di luar teras.
15. *Seifgard* dan keamanan
16. Program penelitian dan pengembangan vendor
17. Sistem manajemen proses desain dan jaminan kualitas dalam analisis desain dan keselamatan
18. Faktor manusia (*human engineering*)
19. Penggabungan dekomisioning dalam pertimbangan desain.

Dalam makalah ini tidak akan melakukan revidi terhadap 19 aspek, hanya beberapa aspek saja yang akan dilakukan revidi karena keterbatasan referensi dokumen desain yang tersedia di internet maupun di jurnal-jurnal ilmiah. Aspek-aspek yang akan dilakukan revidi dalam makalah ini, adalah:

1. Deskripsi umum instalasi, pertahanan berlapis (*defend in depth*), tujuan dan sasaran keselamatan, kriteria penerimaan dosis. Tujuan dari revidi ini adalah:
 - a. Untuk memahami keseluruhan tata letak instalasi dan operasi dari sistem kunci yang penting untuk keselamatan.
 - b. Untuk menentukan dengan keyakinan yang wajar, apakah ketentuan yang dibuat dalam desain memenuhi harapan badan pengawas dan persyaratan peraturan yang ada terkait dengan pertahanan berlapis, tujuan dan sasaran keselamatan, dan kriteria penerimaan dosis.
2. Klasifikasi struktur, sistem dan komponen (SSK). Tujuan dari revidi ini adalah untuk mengetahui apakah desain memenuhi harapan dari badan pengawas dan persyaratan peraturan terkait dengan klasifikasi keselamatan SSK dan persyaratan untuk klasifikasi lainnya (misalnya, kualifikasi seismik dan lingkungan).
3. Desain teras reaktor nuklir. Tujuan dari revidi ini adalah:
 - a. Memastikan bahwa vendor telah memahami persyaratan peraturan yang terkait dengan desain teras reaktor nuklir.
 - b. Memastikan bahwa vendor telah menerapkan prinsip keselamatan, seperti fitur keselamatan yang melekat, kriteria kegagalan tunggal dan pertahanan berlapis dalam desain teras.
4. Proteksi radiasi. Tujuan revidi dari aspek ini adalah mengetahui apakah vendor telah memenuhi persyaratan peraturan yang terkait dengan desain proteksi radiasi.

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Aspek: Deskripsi Umum Instalasi, Pertahanan Berlapis, Tujuan dan Sasaran Keselamatan, Kriteria, Penerimaan Dosis

Dari dokumen "*ThorCon the Do-able Molten Salt reactor*" [3] dapat diketahui bahwa ThorCon sudah menjelaskan *lay out* dan sistem kunci yang penting untuk keselamatan pada desain TMSR 500. Sistem-sistem yang telah dijelaskan antara lain:

- a. CAN
- b. Silo
- c. Power Module
- d. Membrane wall dan *passive decay heat cooling*
- e. *Passive shutdown*
- f. Pembangkitan uap.
- g. POT
- h. Offgas system

Namun demikian, masih banyak informasi yang belum didapat dalam dokumen tersebut yang antara lain adalah sebagai berikut:

Tabel 1: SSK Penyusun TMSR 500

No	SSK	Class (tidak diketahui)
1	PHX (<i>Primary heat exchanger</i>), SHX	
2	Pump (<i>Primary loop pump</i> /PLP), SLP	
3	Fuel Salt Drain Tank (FDT)	
4	Can	
5	Silo-Cooling Wall	
6	Holding Tank	
7	FHF (<i>Fuel Handling Facility</i>)	
8	Turbine generator	
9	POT	
10	Fuel Salt Transfers Cask	
11	Secondary Salt Drain Tank	
12	Off gas Cooling Tank	

1. Dalam dokumen tersebut, ThorCon belum menjelaskan tujuan keselamatan dalam desain, dan juga berapa target dosis radiasi yang nanti nya akan diterima oleh masyarakat di sekitar tapak apabila reaktor tersebut dioperasikan.
2. ThorCon juga belum secara detail menjelaskan penerapan pertahanan berlapis di dalam desain TMSR 500.
3. Dalam dokumen tersebut juga belum dijelaskan penerapan konsep *multiple barrier* yang biasa diterapkan di LWR. Konsep *multiple barrier* pada LWR memang tidak bisa diterapkan secara sama pada desain TMSR 500, karena bahan bakar di reaktor TMSR 500 berupa cairan berbeda dengan bahan bakar di LWR yang berbentuk padat. Namun demikian, tentu ada kesetaraan prinsip yang harus diterapkan di reaktor TMSR 500 yang perlu dijelaskan.

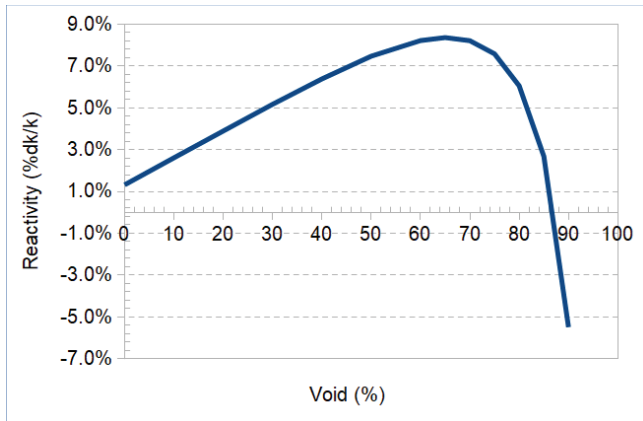
3.2 Aspek: Klasifikasi Struktur, Sistem dan Komponen (SSK)

Dalam melakukan revidi terkait dengan aspek klasifikasi struktur, sistem dan komponen merujuk pada beberapa dokumen yang antar lain:

- IAEA SSG 30, *Safety Classification of Structures, System and Componen in Nuclaer Power Plants* [4]
- IAEA TECDOC 1787, *Aplication of the Safety Classification of Structures, System and Components in Nuclaer Power Palnts* [5]
- STUK Guide YVL B.2, *Classification of System, Structures and Componen of Nuclear Facility*. [6]
- NS-G1.6 *Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plant* [7]
- INL/EXT-10-19509, *Next Generation Nuclear Plant Structures, Systems, and Components Safety Classification White Paper, September 2010*; [8]

TMSR 500 memiliki beberapa sistem, struktur dan komponen (SSK) yang telah dijelaskan dalam dokumen *ThorCon The Do-Able Molten Salt Reactor*. Dari dokumen tersebut SSK penyusun reaktor dirangkum sebagaimana pada **Tabel 1**.

Dari dokumen teknis yang ada, berikut ini daftar item (sebagian dalam bentuk pertanyaan) yang perlu diklarifikasi dalam rangka melakukan revidi terkait dengan klasifikasi SSK:



Gambar 4. Umpan balik dari reaktivitas void [3]

1. Bagaimana proses klasifikasi dilakukan, apakah sudah ada analisis keselamatan yang mana hasil analisis keselamatan tersebut akan dipakai dalam proses klasifikasi?
2. Dalam dokumen teknis yang ada ThorCon belum menjelaskan klasifikasi SSK berdasarkan kelas keselamatan. Klasifikasi SSK berdasarkan kelas keselamatan harus dilakukan berdasarkan analisis keselamatan dengan mempertimbangkan:
 - a. Fungsi keselamatan yang akan dilakukan oleh SSK; dan
 - b. Konsekuensi kegagalan untuk melakukan fungsi keselamatan.
3. ThorCon memiliki dua desain, untuk *land based* dan *floating reactor*. Klasifikasi seismik perlu diperhatikan bila ditempatkan di darat. Klasifikasi untuk kelas seismik harus berdasarkan fungsi SSK selama dan sesudah gempa.

3.3 Aspek: Desain Teras Reaktor Nuklir

a. Neutronik

Dalam melakukan review terkait dengan desain teras reaktor nuklir untuk reaktor jenis *molten salt* belum ada peraturan atau standar yang mengatur khusus aspek neutronik pada *molten salt*. Dari dokumen teknis yang ada, berikut ini daftar item (sebagian dalam bentuk pertanyaan) yang perlu diklarifikasi dalam rangka melakukan review terkait dengan desain neutronik TMSR 500, yang antara lain adalah:

- ✓ Bagaimana efek munculnya gelembung pada bahan bakar reaktor TMSR 500 terkait dengan kenaikan reaktivitas di dalam reaktor? Dan apakah itu membahayakan atau tidak? Kalau membahayakan bagaimana cara mencegah terjadinya gelembung di dalam teras.
- ✓ Bagaimana cara menghitung *burn up* bahan bakar dan bagaimana menghitung komposisi produk fisi pada akhir operasi terkait dengan *seifgard*?
- ✓ Terkait dengan pengendalian reaktivitas di dalam reaktor TMSR 500 yang dilakukan dengan menggunakan batang kendali dan juga pompa, apakah sudah ada nilai reaktivitas kecepatan pompa? Dan bagaimana cara menghitungnya.

ThorCon belum menyediakan perhitungan neutronik yang bisa direview, namun demikian sebagai gambaran perilaku

neutronik tim kajian P2STPIBN-BAPETEN telah melakukan simulasi menggunakan MCNP 6 [9]. Dari hasil perhitungan tersebut didapatkan hasil sebagai berikut:

- Pada reaktor TMSR 500 ketika void di dalam teras naik sampai dengan 65% akan menimbulkan reaktivitas positif sekitar 0,115 (%dk/k)/(void). Dan ketika void di atas 65% reaktivitas akan turun secara tajam. Hubungan antara jumlah void dengan kenaikan reaktivitas ditunjukkan pada **Gambar 4**
- Bahan bakar garam akan menghasilkan void ketika temperatur mencapai suhu 1400 °C, diatas temperatur operasinya yaitu 700 °C. Tetapi sebelum bahan bakar mencapai 1400 °C reaktivitas di dalam teras akan turun disebabkan karena adanya reaktivitas umpan balik temperatur negatif dari bahan bakar, moderator dan juga reflektor.

b. Material

Dari dokumen teknis yang ada, berikut ini daftar item (sebagian dalam bentuk pertanyaan) yang perlu diklarifikasi dalam rangka melakukan review terkait dengan material pada desain TMSR 500, yang antara lain adalah:

- ✓ Bagaimana dengan integritas struktur bejana POT, standar apa yang digunakan, metode apa yang digunakan untuk menghitungnya?
- ✓ Dari desain, dapat dilihat bahwa POT ditopang dengan cara menggantung POT dengan sling/baja. Apakah desain telah memperhitungkan kekuatan dari sling/baja tersebut beserta koneksinya dengan POT?
- ✓ Apakah desain material POT telah mempertimbangkan:
 - Pengaruh radiasi
 - Pengaruh suhu dan tekanan
 - Pengaruh korosi
 - Fatik
 - Kejadian internal dan eksternal yang mungkin terjadi (sebagai contoh; gempa bumi, ledakan dll.)
 - Umur pemakaian.

c. Aspek Proteksi Radiasi

Hasil review untuk aspek proteksi radiasi untuk desain TMSR 500 adalah sebagai berikut:

- ✓ Dokumen analisis suku sumber reaktor ThorCon baik yang ada di teras maupun untuk suku sumber yang terlepas ke lingkungan jika terjadi kecelakaan terparah masih belum tersedia.
- ✓ ThorCon MSR didesain untuk NBD 50 mSv/tahun. Hal ini tidak sesuai dengan aturan NBD di Indonesia. Informasi lain terkait proteksi radiasi dalam desain ThorCon MSR juga belum diberikan.
- ✓ Dalam hal teknik desain proteksi radiasi, ThorCon MSR agar merujuk pada Peraturan BAPETEN No. 1 Tahun 2020 [10] tentang Aspek Proteksi radiasi dalam Desain reaktor daya, dan/atau standar IAEA No. NSG-G1.13: "Radiation Protection Aspect of Design for Nuclear Power Plants" [11].

4 Kesimpulan

Dari hasil penelaah terkait dengan desain TMSR 500, ada beberapa revidi terkait dengan desain TMSR 500 yang antara lain adalah:

1. Secara umum, dokumen yang menjelaskan desain TMSR 500 masih sangat umum dan belum detail, sehingga hasil revidi belum bisa dilakukan secara mendalam.
2. Dari dokumen teknis yang diacu, desain TMSR 500 belum menjelaskan tujuan keselamatan dalam desain, dan juga berapa target dosis yang nantinya akan diterima oleh masyarakat di sekitar tapak apabila reaktor tersebut akan dibangun.
3. ThorCon belum menjelaskan klasifikasi SSK berdasarkan kelas keselamatan, kelas seismik dan kelas mutu.
4. Untuk desain neutronik, timbulnya *void* di dalam teras reaktor perlu untuk diperhatikan karena ketika *void* di dalam teras naik sampai dengan 65% akan menimbulkan reaktivitas positif $0,115(5dk/k)/(\%void)$.
5. ThorCon MSR didesain untuk NBD 50 mSv/tahun. Hal ini tidak sesuai dengan aturan NBD di Indonesia.

Daftar Pustaka

- [1] antara.com. [Internet]. 2019 [cited 2020 Aug 1]. Available from: <https://www.antaraneews.com/berita/1069424/thorcon-dan-kementerian-esdm-kaji-pembangunan-pembangkit-thorium>.
- [2] <https://www.antaraneews.com/berita/1069424/thorcon-dan-kementerian-esdm-kaji-pembangunan-pembangkit-thorium>.
- [3] Canadian Nuclear Safety Commission. Pre-licensing Review of a Vendor's Reactor Design. Ottawa: Canadian Nuclear Safety Commission; 2014.
- [4] Devanney J. ThorCon the Do-able Molten Salt Reactor. 2015.
- [5] IAEA. Safety Classification of Structures, System and Componen in Nuclear Power Plant. Vienna: IAEA; 2014.
- [6] IAEA. Application of the Safety Classification of Structures, Systems and Componens in Nuclear Power Plant. Vienna: IAEA; 2016.
- [7] STUK. Classification of System, Structures and Components of Nuclear Facility. STUK.
- [8] IAEA. Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants. Vienna. Vienna: IAEA.
- [9] Idaho National Laboratory. Next Generation Nuclear Plant Structures, Systems, and Componennts Safety Classification White paper. Idaho: INL; 2010. INL/EXT- 10-19509.
- [10] Khakim DA. Evaluasi Desain Neutronik Thorium Molten Salt Reactor 500 (TMSR -500). Jakarta: BAPETEN; 2020.
- [11] [Anonymous]. Peraturan Bapeten No 1 Tahun 2020 Tentang Aspek Radiasi dalam Desain Reaktor Daya. Jakarta: BAPETEN; 2020.
- [12] IAEA. Radiation Protection Aspect of Design for Nuclear Power Plants. VIENA: IAEA; 2005.