



Kajian pembentukan peraturan mengenai sistem pendingin reaktor dan sistem terkait untuk reaktor berpendingin gas

Catur Febriyanto Sutopo¹ dan Arifin M. Susanto²

¹Direktorat Pengaturan Pengawasan Instalasi dan Bahan Nuklir, BAPETEN, Jakarta

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

E-mail: c.febriyanto@bapeten.go.id

Artikel Tinjauan

Menyerahkan

28 September 2021

Diterima

16 November 2021

Terbit

15 Desember 2021

ABSTRAK

KAJIAN PEMBENTUKAN PERATURAN MENGENAI SISTEM PENDINGIN REAKTOR DAN SISTEM TERKAIT UNTUK REAKTOR BERPENDINGIN GAS. Pada tahun 2021, BAPETEN, selaku badan pengawas, sedang menyusun Peraturan BAPETEN mengenai sistem pendingin reaktor dan sistem terkait, yang hingga saat ini belum tersedia. Untuk mengisi kekosongan tersebut, maka perlu disusun Peraturan BAPETEN tersebut. Dari alasan tersebut, sebelum penyusunan Peraturan BAPETEN tersebut perlu dilakukan kajian yang diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif dan memberikan rekomendasi hal apa yang perlu diatur di dalam Peraturan BAPETEN tersebut, khususnya untuk reaktor berpendingin gas. Adapun metode yang digunakan dalam kajian ini adalah studi literatur dari berbagai acuan yang relevan. Hasil dari studi ini adalah perlu dipersyaratkan kapasitas pembuangan panas akhir yang mencakup pula kolam penyimpanan bahan bakar teriradiasi dan jangka waktu minimum kapasitas pembuangan panas akhir dalam analisis kecelakaan apabila panas peluruhan di kolam penyimpanan dan panas sisa di dalam teras reaktor terjadi kegagalan secara bersamaan. Di sisi lain, perlu juga dipersyaratkan margin ketidakpastian yang dapat digunakan untuk mengevaluasi situasi dan mengambil tindakan korektif. Begitu juga, perlu dipersyaratkan jalur yang independen dan redundant ke pembuangan panas akhir guna meningkatkan keandalan. Sedangkan untuk reaktor berpendingin gas perlu adanya penyesuaian terhadap istilah-istilah yang digunakan. Di samping itu, perlu ditentukan definisi yang sesuai karena beberapa istilah yang digunakan di dalam reaktor berpendingin air memiliki istilah yang sama dengan reaktor berpendingin gas, tetapi memiliki fungsi yang berbeda.

Kata Kunci: Kajian peraturan, sistem pendingin, sistem terkait, reaktor berpendingin gas

ABSTRACT

IN 2021, BAPETEN, AS THE REGULATORY BODY, IS ESTABLISHING A BAPETEN REGULATION REGARDING THE REACTOR COOLANT SYSTEM AND RELATED SYSTEMS, WHICH CURRENTLY ARE NOT YET AVAILABLE. Therefore, it is crucial to establish the BAPETEN Regulation. Based on the reasons, before setting the BAPETEN Regulation, it is necessary to conduct a study that is expected to provide a more comprehensive description and provide recommendations on what things need to be regulated in the BAPETEN Regulation, especially for gas-cooled reactors. The method used in this study is a literature study from various relevant references. The result of this study is that it is essential to require a capacity of the ultimate heat sink, including the spent nuclear fuel storage pool and a minimum period of the ability of the top heat sink in the accident analysis if the decay heat in the storage pool and the residual heat in the reactor core fail simultaneously. On the other hand, it is also necessary to require a margin of uncertainty to evaluate a situation and take corrective action. Likewise, independent and redundant access to the ultimate heat sink is needed to increase reliability. As for gas-cooled reactors, it is required to adapt the terms used. In addition, it

is necessary to determine the appropriate definition because some of the terms used in water-cooled reactors have the same terms as gas-cooled reactors but have different functions.

Keywords: Regulatory assessment, coolant system, related systems, gas-cooled reactors

1. PENDAHULUAN

Selama hampir empat dekade, energi nuklir sangat luas digunakan, sehingga beberapa sifat biaya, risiko dan pemanfaatannya menjadi lebih jelas [1]. Meskipun perkembangan energi nuklir begitu masif akhir-akhir ini, akan tetapi berbagai negara di seluruh dunia mengambil posisi yang berbeda terhadap perkembangan energi nuklir tersebut. Sebagai contoh negara Kerajaan Saudi Arabia (KSA), yang tertarik untuk mengembangkan kemampuannya dalam pembuatan *Small Modular Reactors* (SMRs), terutama *System-integrated Modular Advanced Reactor* (SMART). Dengan telah ditandatanganinya nota kesepahaman dengan Korea Selatan, KSA memiliki kesempatan dalam pertukaran pengalaman dan praktek di bidang pengawasan keselamatan, keamanan dan safeguard, serta riset yang relevan [2]. Komitmen pengembangan energi nuklir oleh KSA adalah pemanfaatan energi nuklir untuk tujuan damai, pembangkit listrik yang terjangkau, reaktor desalinasi, dan perlindungan lingkungan [3].

Indonesia melalui BATAN juga mengembangkan SMR jenis *High Temperature Gas-cooled Reactor* (HTGR) berbahan bakar pebble bed dengan daya 3 MW(e). Tujuan utama dari pengembangan SMR ini adalah untuk membangun kemampuan nasional guna menjadi pengembang teknologi reaktor nuklir melalui penguasaan desain, manajemen proyek konstruksi, komisioning, dan operasi pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) [4]. Di samping dikembangkan sebagai pembangkit listrik, SMR yang dikembangkan oleh BATAN ke depannya juga akan digunakan sebagai pembangkit kogenerasi dengan memanfaatkan panas lebih untuk aplikasi industri. Selain BATAN, ada juga institusi lain, yaitu ThorCon, memiliki ketertarikan dalam pengembangan energi nuklir di Indonesia. Reaktor yang dikembangkan oleh ThorCon adalah reaktor berbahan bakar garam cair (molten salt).

Namun setelah kejadian Fukushima yang terjadi pada tahun 2011, desain Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) mengalami perubahan yang sangat berarti. Kejadian tersebut menyebabkan lepasan zat radioaktif ke lingkungan dalam jumlah besar akibat

hilangnya integritas bahan bakar yang disebabkan oleh gagalnya pengambilan panas peluruhan hingga ke pembuangan panas akhir. Berdasarkan kejadian tersebut, IAEA, selaku badan tenaga atom internasional, telah merevisi dokumen NS-G-1.9 (*Design of the Reactor Coolant System and Associated Systems in Nuclear Power Plants*) untuk disesuaikan dengan perkembangan teknologi keselamatan PLTN.

Tahun 2021, BAPETEN sedang menyusun Peraturan BAPETEN (PerBa) terkait dengan sistem pendingin reaktor dan sistem terkait yang belum tersedia hingga saat ini. Peraturan ini merupakan peraturan teknis yang lebih rinci yang mencakup kriteria-kriteria yang harus dipenuhi dalam mendesain sistem pendingin reaktor dan sistem terkait. Saat ini, Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 3 Tahun 2011 tentang Ketentuan Keselamatan Desain Reaktor Daya telah mengatur secara umum persyaratan khusus yang harus dipenuhi dalam mendesain sistem pendingin reaktor dan sistem terkait, seperti sistem tersebut harus menyediakan sarana yang andal untuk memindahkan panas sehingga batasan desain tidak terlampaui, dan pendinginan teras untuk mempertahankan pendinginan bahan bakar nuklir dalam kondisi kecelakaan. Adapun persyaratan umum yang harus dipenuhi dari sistem tersebut harus mengacu pada ketentuan yang ada di Pasal 11 Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 54 Tahun 2012 tentang Keselamatan dan Keamanan Instalasi Nuklir.

Dari uraian di atas, penulis akan mencoba untuk mengidentifikasi hal-hal yang harus diatur di dalam pembentukan peraturan tersebut, baik dari cakupan pengaturannya hingga persyaratan khusus desain sistem pendingin reaktor dan sistem terkait, terutama SMR. Hasil dari identifikasi diharapkan dapat dijadikan dasar sebagai bahan masukan dalam pengembangan peraturan tersebut.

2. LANDASAN TEORI

Sebagaimana dijelaskan di pendahuluan, bahwa hingga saat ini belum tersedianya aturan terkait dengan sistem pendingin reaktor dan sistem terkait

yang lebih rinci cakupan pengaturannya. Uraian di dalam bagian ini akan diawali dengan PerBa yang terkait hingga acuan-acuan yang digunakan.

A. Peraturan yang terkait

Pasal 10 di dalam PP Nomor 54 Tahun 2012 menyatakan bahwa pemegang izin wajib menjamin terpenuhinya persyaratan desain sejak konstruksi sampai dengan dekomisioning, yang mencakup persyaratan umum dan persyaratan khusus desain. Selanjutnya, pada pasal 11 menjelaskan terkait persyaratan umum desain yang berlaku untuk semua struktur, sistem dan komponen, yang meliputi desain [5] :

1. keandalan struktur, sistem, dan komponen (SSK);
2. kemudahan operasi, inspeksi, perawatan, dan pengujian;
3. kesiapsiagaan dan penanggulangan kedaruratan nuklir;
4. kemudahan dekomisioning;
5. proteksi radiasi;
6. untuk faktor manusia; dan
7. untuk meminimalkan penuaan.

Persyaratan khusus desain untuk reaktor nuklir terdiri dari sepuluh desain yang harus dipenuhi, salah satunya adalah sistem pemindahan panas. Meskipun di dalam beberapa pasal tidak ada ketentuan lebih lanjut untuk menyusun peraturan teknis yang merupakan peraturan turunan dari PP Nomor 5 Tahun 2012 tersebut, akan tetapi penyusunan peraturan teknis tersebut sangat diperlukan guna memberikan ketentuan kepada pemegang izin dalam hal mendesain reaktor nuklir. Dengan kata lain, di dalam bagian menimbang di dalam PerBa tersebut dapat digunakan landasan filosofis, yang secara umum dengan memenuhi ketentuan-ketentuan di dalam peraturan tersebut diharapkan reaktor nuklir dapat beroperasi dengan aman dan selamat.

Bagian selanjutnya pada paragraf keempat pasal 81 di dalam PerBa Nomor 3 Tahun 2011 tentang Ketentuan Keselamatan Desain Reaktor Daya menguraikan secara umum ketentuan yang harus dipenuhi dalam mendesain sistem pendingin reaktor dan sistem terkait yang mencakup pertimbangan [6] :

1. margin yang memadai untuk memastikan batas desain tidak terlampaui dalam kondisi operasi;
2. sistem isolasi yang memadai untuk membatasi hilangnya pendingin;
3. desain dan konstruksi SSK sesuai dengan kelas mutu;

4. peminimalan kerapuhan dan kegagalan pada SSK; dan
5. margin terhadap degradasi selama operasi.

Sistem pendingin reaktor sesuai pasal 83 juga harus didesain mampu [6] :

1. melindungi tekanan berlebih tanpa menyebabkan lepasan zat radioaktif yang tidak terkendali ke lingkungan;
2. mengendalikan inventori, temperatur dan tekanan untuk menjamin batas desain tidak terlampaui;
3. membersihkan pendingin reaktor dari zat radioaktif dan zat nonradioaktif, termasuk produk korosi teraktivasi dan produk fisi yang bocor dari bahan bakar.

Selanjutnya, pasal 86 menguraikan implementasi terhadap ketentuan dari pasal sebelumnya dalam desain yang mencakup penentuan [6]:

1. batasan parameter terhadap integritas bahan bakar, agar tidak terlampaui untuk kecelakaan dasar desain;
2. batasan tingkatan reaksi kimia;
3. degradasi maksimal yang dapat mengurangi efektivitas dari pendingin teras darurat; dan
4. jangka waktu untuk menyediakan pendinginan teras yang memadai.

Bagian akhir dari paragraf keempat pada pasal 87 memuat ketentuan yang harus dipenuhi dalam desain sistem pendingin reaktor dan sistem terkait untuk pembuangan panas akhir (ultimate heat sink). Ketentuan desain untuk pembuangan panas akhir hanya satu pasal 81 tersebut dan ketentuannya pun masih sangatlah umum.

B. Publikasi Dokumen IAEA

Pada tahun 2016, IAEA menerbitkan dokumen Safety of Nuclear Power Plants: Design (SSR-2/1 (Rev. 1)) yang memberikan persyaratan-persyaratan desain untuk SSK. Cakupan dari publikasi ini adalah untuk PLTN berpendingin air yang berada di daratan dan yang digunakan untuk pembangkit listrik maupun untuk aplikasi panas lainnya. Persyaratan-persyaratan desain di dalam publikasi ini juga dapat diterapkan untuk reaktor jenis lainnya melalui penilaian teknis.

Adapun uraian singkat dari persyaratan-persyaratan desain untuk sistem pendingin reaktor secara umum adalah sebagai berikut [7]:

1. Persyaratan 47: desain sistem pendingin reaktor

Tabel 1: Penyesuaian substansi pertimbangan khusus dalam desain sistem pendingin reaktor untuk HTGR

Topik	Penjelasan	Penyesuaian
Isolasi batas tekan pendingin reaktor (Paragraf 5.46 – 5.53)	Fungsi isolasi pada reaktor berpendingin air adalah untuk mencegah hilangnya pendingin setelah kecelakaan penurunan tekanan (<i>depressurization</i>).	Fungsi isolasi pada reaktor berpendingin gas adalah untuk membatasi <i>air ingress</i> masuk ke dalam teras reaktor setelah kecelakaan penurunan tekanan. Isolasi tersebut menghentikan sirkulasi pendingin primer pada kondisi tertentu dan tidak akan menjalankan kembali sirkulasi selama kejadian operasi terantisipasi dan kondisi kecelakaan. Tindakan ini dilakukan untuk [12]: <ul style="list-style-type: none"> - melindungi batas tekan sistem pendingin reaktor dari panas berlebih; - meminimalkan <i>water ingress</i> ke teras karena penguapan air akibat pemanasan; - mencegah insersi reaktivitas akibat pendinginan berlebih teras.
Kejadian awal terpostulasi (Paragraf 5.54)		Analisis kecelakaan dilakukan berdasarkan kejadian awal terpostulasi, yang mencakup [13]: <ul style="list-style-type: none"> - <i>long-term pressurized loss of forced coolant/ LOFC (P-LOFC)</i>; - <i>depressurized loss of forced coolant/D-LOFC</i>; - transien terantisipasi tanpa <i>scrams</i>; - <i>long-term air ingress following D-LOFC</i>; - <i>water/steam ingress</i>; - transien reaktivitas; - hilangnya pembuangan panas utama; dan - <i>turbine trip/station blackout</i>.
Bahaya internal (Paragraf 5.55 – 5.56)	Karena sifatnya yang modular dan beberapa SSK digunakan secara bersamaan, SMR memiliki keunggulan dapat menambah daya dengan menambah modul reaktor, sehingga perlu dipertimbangkan juga apabila salah satu modul mengalami kegagalan dan berdampak pada modul lainnya dalam satu unit.	Untuk unit yang memiliki banyak modul, desain harus mempertimbangkan potensi bahaya tertentu yang akan menimbulkan dampak pada beberapa atau bahkan semua modul secara bersamaan dan potensi bahaya yang diawali dari satu modul yang berdampak pada modul lainnya dalam satu unit [12].

Sistem pendingin reaktor didesain dan dikonstruksi dengan meminimalkan kegagalan akibat kualitas bahan, standar desain, inspeksi yang tidak mencukupi atau kualitas fabrikasi;

2. Persyaratan 48: proteksi terhadap tekanan berlebih untuk pembatas bertekanan (*pressure boundary*) dari pendingin reaktor

Proteksi pembatas bertekanan pendingin reaktor didesain untuk mencegah tekanan berlebih dan lepasan zat radioaktif ke lingkungan;

3. Persyaratan 49: inventori pendingin reaktor

Pengendalian inventori, temperatur dan tekanan pendingin reaktor untuk menjamin batas

desain tidak terlampaui pada kondisi operasi, dengan mempertimbangkan perubahan volume dan kebocoran;

4. Persyaratan 50: pembersih pendingin reaktor

Pengambilan zat non-radioaktif dan zat radioaktif, termasuk produk korosi teraktivasi dan produk fisi, di dalam pendingin reaktor;

5. Persyaratan 51: pengambilan panas sisa dari teras reaktor

Pengambilan panas sisa dari teras reaktor pada kondisi padam, sehingga batas desain tidak terlampaui;

6. Persyaratan 52: pendingin teras darurat

Tabel 2: Penyesuaian substansi pertimbangan khusus dalam desain sistem terkait untuk HTGR

Topik	Penjelasan	Penyesuaian
Sistem untuk pengambilan panas pada kondisi operasi dan kondisi kecelakaan	Karena teras reaktor memiliki karakteristik keselamatan yang melekat, yaitu bahan bakar memiliki densitas daya yang rendah dan kapasitas panas yang besar, maka kecelakaan transien dan terpostulasi tertentu yang diharapkan sangat rendah. Di samping itu pula, pengambilan panas peluruhan dilakukan melalui radiasi, konduksi dan konveksi alamiah ke lingkungan, tanpa melebihi batas temperatur bahan bakar.	Setelah pemadaman reaktor, pengambilan panas peluruhan dilakukan melalui sistem pasif, seperti diterapkannya <i>reactor cavity cooling system</i> (RCCS). Transfer panas peluruhan di dalam reaktor bergantung pada sifat termal bahan dalam kasus seperti kehilangan pendingin atau kehilangan aliran. Tidak diperlukan tindakan pendinginan aktif dan daya listrik dari luar tapak [13].
Sistem pembersih pendingin reaktor		Sistem purifikasi helium didesain untuk mengendalikan tingkat pengotor kimia, termasuk debu grafit. Di samping itu pula, sistem purifikasi ini juga dapat digunakan untuk mengurangi jumlah zat radioaktif di sistem primer [12].
Sistem air umpan	Pada umumnya, sistem sekunder memiliki tekanan lebih besar dibanding sistem primer. Apabila terdapat kegagalan pada antarmuka kedua sistem primer dan sistem sekunder, maka kemungkinan adanya aliran air atau uap air ke sistem primer.	Di samping, sistem isolasi batas tekan pendingin reaktor guna mencegah <i>water ingress</i> akibat retaknya pipa penukar panas dan/atau pembangkit uap, sistem lain yang digunakan adalah sistem pembuangan air yang cepat dari penukar panas dan/atau pembangkit uap [12].

Sarana memulihkan dan menjaga pendinginan bahan bakar pada kondisi kecelakaan, apabila integritas batas tekan sistem pendingin primer gagal dipertahankan;

7. Persyaratan 53: pembuangan panas akhir

Kemampuan untuk memindahkan panas ke pembuangan panas akhir tetap dilakukan untuk semua kondisi instalasi.

Sedangkan tahun 2020, IAEA menerbitkan dokumen, sebagai turunan dari SSR-2/1 (Rev. 1), yang memberikan pedoman yang lebih rinci dalam mendesain sistem pendingin reaktor dan sistem terkait untuk PLTN, yaitu Design of the Reactor Coolant System and Associated Systems for Nuclear Power Plants (SSG-56). Cakupan dari publikasi ini adalah untuk PLTN berpendingin air yang berada di daratan dan yang digunakan untuk pembangkit listrik maupun untuk aplikasi panas lainnya. Persyaratan-persyaratan desain di dalam publikasi

ini juga dapat diterapkan untuk reaktor jenis lainnya melalui penilaian teknis.

Adapun sistematika dan uraian dari publikasi dokumen tersebut adalah sebagai berikut [8]:

1. Bab 2, jangkauan sistem pendingin reaktor dan sistem terkait, dari sistem pendingin reaktor hingga sistem pembuangan panas akhir dan pemindahan panas sisa pada semua kondisi instalasi;
2. Bab 3, rekomendasi desain umum untuk sistem pendingin reaktor dan sistem terkait yang berlaku untuk PWR, BWR, dan PHWR;
3. Bab 4, rekomendasi desain untuk rangkaian pemindahan panas (heat transfer chain) yang berbeda, dan pertimbangan umum untuk pembuangan panas akhir;
4. Bab 5, rekomendasi desain tambahan yang dikhususkan untuk sistem pendingin reaktor untuk reaktor jenis PWR, BWR, dan PHWR;

- Bab 6 – 8, rekomendasi desain tambahan yang dikhususkan untuk sistem terkait untuk reaktor jenis PWR, BWR, dan PHWR.

3. PEMBAHASAN

Berkaca dari kejadian Fukushima, sebagaimana direkomendasikan di dalam publikasi IAEA bahwa keandalan fungsi perpindahan panas perlu ditingkatkan, seperti penggunaan pembuangan panas akhir yang berbeda atau penggunaan akses yang berbeda ke pembuangan panas akhir [7]. Di samping itu pula, apabila di dalam satu tapak terdiri dari beberapa unit harus dipertimbangkan antarmuka ke pembuangan panas akhir untuk tiap unit mandiri dari antarmuka unit lainnya [8].

Tidak hanya keandalan yang dipertimbangkan di dalam desain pembuangan panas akhir, tapi juga kapasitas pembuangan panas akhir. Kapasitas pembuangan panas akhir ini harus mampu menyerap semua panas yang dibangkitkan, baik dari teras reaktor maupun dari kolam penyimpanan bahan bakar teriradiasi. Perhitungan kapasitas total pembuangan panas akhir ini berdasarkan asumsi bahwa semua unit di dalam tapak mengalami kecelakaan secara bersamaan. Oleh karena itu, guna melaksanakan implementasi ketentuan Pasal 87 di dalam PerBa Nomor 3 Tahun 2011 perlu dipertimbangkan pula kapasitas pembuangan panas akhir di dalam penyusunan PerBa ini, sehingga integritas bahan bakar pada semua kondisi instalasi dapat dipertahankan.

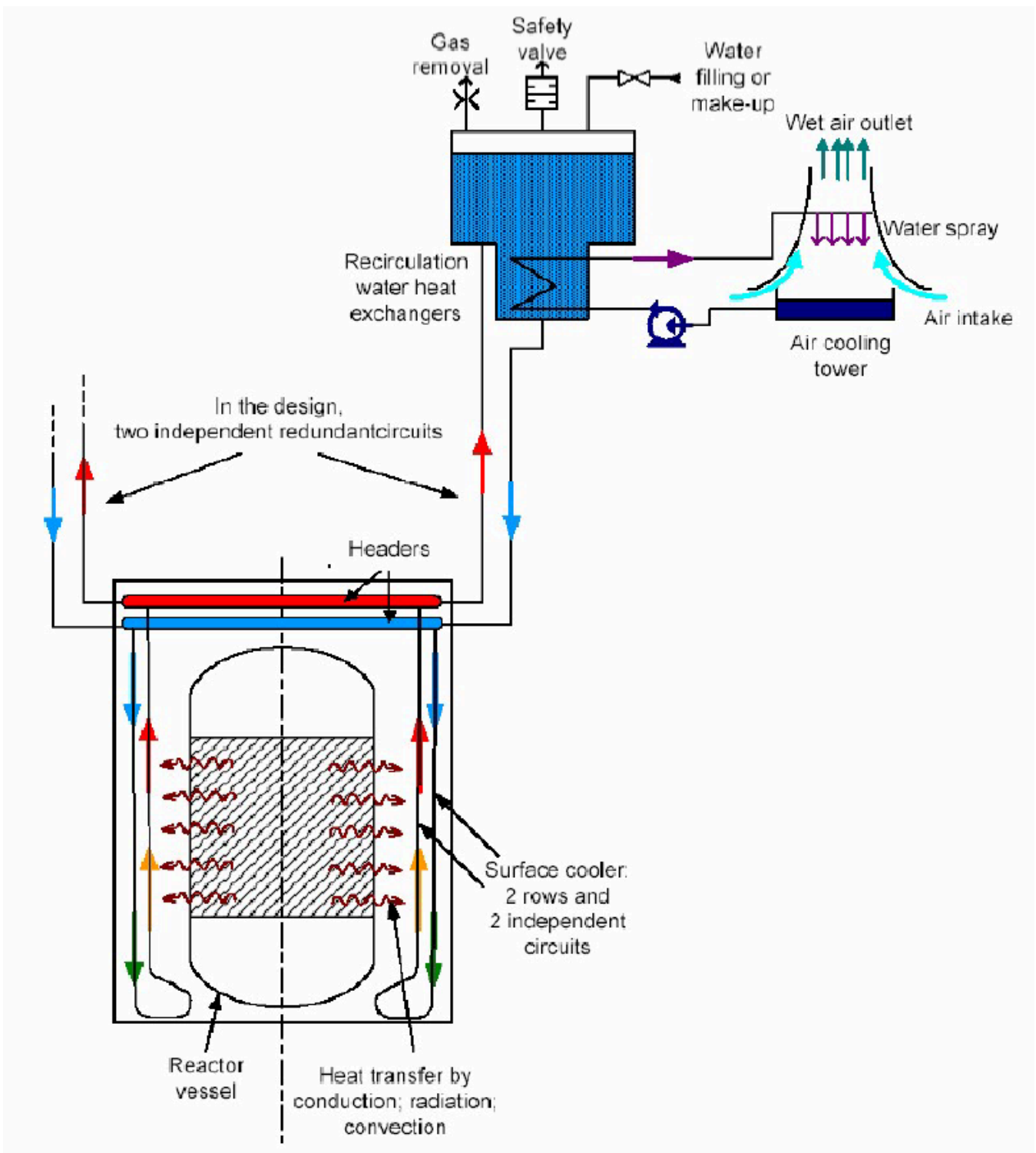
Masih berdasarkan kejadian Fukushima. Tanpa adanya air pendingin di dalam teras reaktor dan di dalam kolam penyimpanan bahan bakar nuklir teriradiasi mengakibatkan beberapa bahan bakar nuklir teriradiasi mengalami panas berlebih hingga mengalami pelelehan selama tiga hari pertama setelah kejadian. Kerusakan bahan bakar masih berlanjut antara sembilan hingga empat belas hari akibat station blackout, karena rusaknya infrastruktur pasokan listrik ke beberapa unit di dalam tapak akibat kejadian tsunami [9]. Oleh karena itu, di dalam dokumen SSG-56 tersebut direkomendasikan pula jangka waktu minimum kapasitas pembuangan panas akhir, termasuk margin ketidakpastian, untuk tetap mampu membuang panas ke lingkungan.

U.S. NRC mensyaratkan kapasitas pembuangan panas akhir untuk jangka waktu selama tiga puluh hari dengan pertimbangan jangka waktu tersebut dapat digunakan untuk mengevaluasi situasi dan mengambil tindakan korektif. Di samping itu, U.S. NRC juga mensyaratkan untuk menyediakan prosedur untuk menjamin kemampuan pembuangan panas akhir di luar tiga puluh hari tersebut [10]. Namun, hingga saat ini BAPETEN belum mengatur terkait dengan jangka waktu kapasitas pembuangan panas akhir. Dalam pembentukan PerBa ini perlu dipertimbangkan untuk mengakomodir jangka waktu berdasarkan kondisi meteorologi dan hidrologi di sekitar tapak atau berdasarkan nilai konservatif yang ditetapkan, sebagaimana yang dilakukan oleh U.S. NRC.

Sedangkan sistematika di dalam pembentukan PerBa ini dapat mengikuti sistematika sebagaimana dimaksud di dalam SSG-56. Namun perlu dilakukan beberapa penyesuaian terhadap substansi pengaturannya, yang mana kajian ini fokus pada reaktor berpendingin gas temperatur tinggi (HTGR).

HTGR adalah reaktor generasi ke-IV yang merupakan perkembangan evolusi dari PLTN yang telah ada dengan memanfaatkan perkembangan teknologi untuk meminimalkan penggunaan SSK besar (pompa, turbin, bejana, pressurizer, dll.), dan sistem pasif. Penyederhanaan dan integrasi SSK dilakukan dalam rangka mencapai persyaratan keselamatan yang semakin tinggi, tanpa menguarngi efisiensi pembangkitan daya [11]. Secara definisi, HTGR adalah reaktor bermoderator grafit dengan gas helium yang digunakan di sistem pendingin. Aliran pendingin gas helium ini digerakkan oleh blower yang ditempatkan di pembangkit uap, yang terintegrasi di dalam bejana tekan.

Peraturan perundangan yang telah terbit, sebagian besar merujuk ke PLTN berbasis pendingin air, sehingga untuk menyikapi dan menaungi kebutuhan akan potensi pengajuan izin atas reaktor berpendingin gas, perlu dilakukan beberapa penyesuaian. Adapun beberapa penyesuaian tersebut, khususnya untuk BAB V terkait dengan pertimbangan khusus dalam desain sistem pendingin reaktor, yang diuraikan di dalam Tabel 1. Sedangkan, penambahan bab baru di dalam PerBa yang sedang disusun terkait dengan pertimbangan khusus desain sistem terkait untuk HTGR, sebagaimana diuraikan di dalam Tabel 2.



Gambar 1: Skema perpindahan panas peluruhan ke pembuangan panas akhir [14].

Seperti diketahui bahwa SMR juga dapat digunakan sebagai pembangkit kogenerasi untuk beberapa tujuan, seperti desalinasi air laut. Dengan aplikasi kogenerasi ini diperlukan beberapa pertimbangan kriteria desain, yaitu fasilitas tersebut dipertimbangkan sebagai bahaya eksternal dan secara fisik terpisah untuk mencegah gangguan yang membahayakan apabila terjadi keadaan abnormal. Sebagai tambahan, dampak kebocoran kimia melalui jalur perpindahan panas juga

harus dipertimbangkan dalam desain. Gambar 1 mengilustrasikan perpindahan panas peluruhan dari bahan bakar hingga ke pembuangan panas akhir pada HTGR yang terjadi secara konduksi, radiasi dan konveksi. Dalam kasus hilangnya pendingin utama, perpindahan panas yang terjadi melalui tiga proses tersebut tetap efektif.

Guna meningkatkan keandalan sistem pembuangan panas, maka desain HTGR dilengkapi dengan RCCS yang menggunakan air sebagai media

pengambilan panas, dan yang didesain memiliki 2 loop yang independen dan *redundant*. Dengan meningkatnya keandalan tersebut, integritas bahan bakar dan struktur dapat dipertahankan di bawah batas desain, baik untuk kondisi normal maupun kondisi kecelakaan. Pada kondisi normal, dengan sirkulasi paksa air di dalam RCCS tersebut tetap dalam satu fasa. Sedangkan pada kondisi kecelakaan, air di dalam RCCS berubah menjadi dua fasa dan beroperasi secara pasif selama 72 jam untuk membuang panas ke lingkungan secara evaporasi. Sedangkan air dalam tangki penyimpanan didesain dengan kapasitas minimum selama 7 hari untuk pendinginan selama kecelakaan saat sistem aktif tidak tersedia [4]. Dengan desain tersebut, kejadian Fukushima diharapkan dapat dihindari sebagaimana direkomendasikan di dalam publikasi IAEA bahwa perlu adanya keandalan untuk meningkatkan fungsi perpindahan panas, seperti penggunaan pembuangan panas akhir yang berbeda atau penggunaan akses yang berbeda ke pembuangan panas akhir.

4. SIMPULAN

Penyusunan PerBa untuk sistem pendingin reaktor dan sistem terkait perlu memperhatikan ketentuan yang perlu dipersyaratkan untuk kapasitas pembuangan panas akhir yang mencakup pula untuk kolam penyimpanan bahan bakar teriradiasi dalam analisis kecelakaan. Hal ini karena selama penyimpanan bahan bakar teriradiasi, akumulasi panas juga harus dihindari guna mempertahankan integritas bahan bakar teriradiasi. Kapasitas pembuangan panas akhir tidak hanya mempertimbangkan beban panas keseluruhan yang dihasilkan, baik dari panas peluruhan di kolam penyimpanan maupun panas sisa di teras reaktor, tapi juga mempertimbangkan jangka waktu minimum kapasitas pembuangan panas akhir, termasuk margin ketidakpastian, untuk tetap mampu membuang panas ke lingkungan. Margin ketidakpastian ini ditentukan berdasarkan kondisi *site specific* terhadap ketersediaan pembuangan panas akhir pada kondisi tertentu sesuai dengan hasil evaluasi tapak. Di samping itu, untuk meningkatkan keandalan perlu dipersyaratkan jalur yang independen dan *redundant* ke pembuangan panas akhir.

Di samping itu pula, apabila dipertimbangkan reaktor nuklir jenis SMR perlu adanya penyesuaian untuk beberapa istilah yang digunakan maupun kriteria-kriteria yang harus dipenuhi dalam desain SMR, khususnya reaktor berpendingin gas. Sebagai tambahan, perlu juga dipahami beberapa istilah yang sama pada reaktor SMR jenis lain, tetapi memiliki fungsi yang berbeda. Sebagai penutup, perlu dilakukan kajian yang serupa untuk SMR jenis lain, sehingga diperoleh gambaran dan pengaturan yang lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sekretariat Jenderal Perserikatan Bangsa-Bangsa, Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future, Annex of Development and International Economic Co-Operation: Environment, New York, 1987.
- [2] World Nuclear News, <https://www.world-nuclear-news.org/NP-Saudi-Arabia-and-South-Korea-to-cooperate-in-nuclear-regulation-2811165.html>, 2016 (diakses 14 Mei 2021).
- [3] Sarah B., et. al., Saudi Arabia's Nuclear Ambitions and Proliferation Risks, Institute for Science and International Security, Washington D.C., 2017.
- [4] IAEA, Advance in Small Modular Reactor Technology Developments – A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), Vienna, 2020, hal. 191 – 194.
- [5] BAPETEN, Peraturan Pemerintah Nomor 5 Tahun 2012 tentang Keselamatan dan Keamanan Instalasi Nuklir, Jakarta, 2012.
- [6] BAPETEN, Peraturan BAPETEN Nomor 3 Tahun 2011 tentang Ketentuan Keselamatan Desain Reaktor Daya, Jakarta, 2011.
- [7] IAEA, Safety of Nuclear Power Plants: Design, SSR-2/1 (Rev. 1), Vienna, 2016.
- [8] IAEA, Design of the Reactor Coolant System and Associated Systems for Nuclear Power Plants (SSG-56), Vienna, 2020.
- [9] NEA-OECD, Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, Ten Years On: Progress, Lessons and Challenges, Paris, 2021.

- [10] U.S. NRC, Ultimate Heat Sink for Nuclear Power Plants, Regulatory Guide 1.27, Washington DC., 2015.
- [11] Susanto, A. M., et. al., Assessment of Safety Provision on Design of the Reactor Cooling System and Associated Systems (RCSAS) in Nuclear Power Plants: Focused on Design General Requirement, Annual Safety Nuclear Seminar Proceeding, Jakarta, 2020.
- [12] IAEA, Applicability of Design Safety Requirements to Small Modular Reactor Technologies Intended for Near Term Deployment, IAEA-TECDOC-1936, Vienna, 2020.
- [13] S. J. Ball, Overview Of Modular HTGR Safety Characterization And Postulated Accident Behavior Licensing Strategy, ORNL/TM-2014/187, Tennessee, 2014.
- [14] H. Wu, Heat Transfer Simulation of Reactor Cavity Cooling System Experimental Facility Using RELAP5-3D and Generation of View Factors Using MCNP, Master Thesis, Texas A&M University, 2013.