



KEPALA BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR
REPUBLIK INDONESIA

PERATURAN BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR
REPUBLIK INDONESIA
NOMOR 1 TAHUN 2020
TENTANG
ASPEK PROTEKSI RADIASI DALAM DESAIN REAKTOR DAYA

DENGAN RAHMAT TUHAN YANG MAHA ESA

KEPALA BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR
REPUBLIK INDONESIA,

- Menimbang:
- a. bahwa untuk melaksanakan ketentuan Pasal 16 Peraturan Pemerintah Nomor 54 Tahun 2012 tentang Keselamatan dan Keamanan Instalasi Nuklir mengenai persyaratan dan penilaian desain reaktor daya, diperlukan pemenuhan persyaratan umum desain reaktor daya dari aspek proteksi radiasi yang diatur dalam Peraturan Badan tersendiri;
 - b. berdasarkan pertimbangan sebagaimana dimaksud dalam huruf a, perlu menetapkan Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir tentang Aspek Proteksi Radiasi dalam Desain Reaktor Daya;
- Mengingat:
1. Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 1997 Nomor 23, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 3676);

2. Peraturan Pemerintah Nomor 54 Tahun 2012 tentang Keselamatan dan Keamanan Instalasi Nuklir (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2012 Nomor 107, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 5313);
4. Keputusan Presiden Nomor 103 Tahun 2001 tentang Kedudukan, Tugas, Fungsi, Kewenangan, Susunan Organisasi, dan Tata Kerja Lembaga Pemerintah Non Kementerian sebagaimana telah beberapa kali diubah terakhir dengan Peraturan Presiden Nomor 145 Tahun 2015 tentang Perubahan Kedelapan atas Keputusan Presiden Nomor 103 tahun 2001 tentang Kedudukan, Tugas, Fungsi, Kewenangan, Susunan Organisasi, dan Tata Kerja Lembaga Pemerintah Non Kementerian (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2015 Nomor 323);
5. Keputusan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 01.Rev.2/K.OTK/V-04 Tahun 2004 sebagaimana telah beberapa kali diubah terakhir dengan Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 1 Tahun 2019 tentang Perubahan Kedua atas Keputusan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 01 Rev.2/K-Otk/V-04 Tahun 2004 tentang Organisasi dan Tata Kerja Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2019 Nomor 27);

MEMUTUSKAN:

Menetapkan : PERATURAN BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR TENTANG ASPEK PROTEKSI RADIASI DALAM DESAIN REAKTOR DAYA.

BAB I

KETENTUAN UMUM

Pasal 1

Dalam Peraturan Badan ini yang dimaksud dengan:

1. Badan adalah Badan Pengawas Tenaga Nuklir.

2. Reaktor Daya adalah reaktor nuklir yang memanfaatkan energi panas hasil pembelahan nuklir untuk pembangkitan daya.
3. Desain Reaktor Daya adalah gambaran lengkap dan rinci mengenai Reaktor Daya yang akan dibangun, memuat dimensi dan skala serta tata letak struktur, sistem, maupun komponen-komponen, yang menjadi dasar pelaksanaan konstruksi Reaktor Daya.
4. Fitur Desain adalah aspek, sifat, kualitas, atau ciri khas yang menonjol dari rancangan atau wujud Desain Reaktor Daya.
5. Proteksi Radiasi adalah tindakan yang dilakukan untuk mengurangi pengaruh radiasi yang merusak akibat paparan radiasi.
6. Konstruksi adalah kegiatan membangun instalasi nuklir di tapak yang sudah ditentukan, meliputi pekerjaan arsitektural, sipil, mekanikal, elektrikal, tata lingkungan, pemasangan, dan pengujian struktur, sistem, dan komponen instalasi nuklir tanpa bahan nuklir.
7. Komisioning adalah kegiatan pengujian untuk membuktikan bahwa struktur, sistem, dan komponen instalasi nuklir terpasang yang dioperasikan dengan bahan nuklir memenuhi persyaratan dan kriteria desain.
8. Operasi adalah semua pelaksanaan kegiatan yang bertujuan memanfaatkan energi panas hasil pembelahan nuklir untuk pembangkitan daya, termasuk kegiatan pemeliharaan, pengisian ulang bahan bakar nuklir, inspeksi layanan operasi (*in-service inspection*), dan kegiatan lain yang terkait.
9. Modifikasi adalah setiap upaya yang mengubah struktur, sistem, dan komponen yang penting untuk keselamatan, termasuk pengurangan dan/atau penambahan.
10. Dekomisioning adalah suatu kegiatan untuk menghentikan beroperasinya reaktor nuklir secara tetap, antara lain dilakukan pemindahan bahan bakar dari teras reaktor, pembongkaran komponen reaktor, dekontaminasi, dan pengamanan akhir.

11. Dosis Target Desain adalah dosis terbesar yang dapat diterima oleh pekerja radiasi dan anggota masyarakat dalam jangka waktu tertentu tanpa menimbulkan efek genetik dan somatik sebagai akibat penerimaan paparan radiasi pengion, yang ditetapkan berdasarkan hasil perhitungan desain instalasi Reaktor Daya dengan memperhitungkan nilai toleransi margin keselamatan yang memadai terhadap nilai pembatas dosis tahunan.
12. Kecelakaan Nuklir adalah setiap kejadian atau rangkaian kejadian yang menimbulkan kerugian nuklir.
13. Kecelakaan Dasar Desain adalah kecelakaan yang telah diantisipasi dalam desain instalasi nuklir.
14. Kecelakaan Parah adalah kecelakaan yang melampaui Kecelakaan Dasar Desain dan mengakibatkan lepasan radioaktif ke lingkungan hidup.

Pasal 2

- (1) Peraturan Badan ini bertujuan untuk memberikan ketentuan mengenai aspek Proteksi Radiasi yang wajib dilaksanakan oleh pemegang izin untuk mengajukan persetujuan dalam Desain Reaktor Daya.
- (2) Persetujuan dalam Desain Reaktor Daya sebagaimana dimaksud pada ayat (1) terdiri atas persetujuan:
 - a. desain;
 - b. perubahan desain;
 - c. Modifikasi pada tahap Komisioning; dan
 - d. Modifikasi pada tahap Operasi.
- (3) Persetujuan sebagaimana dimaksud pada ayat (2) disampaikan oleh pemegang izin kepada Kepala Badan.

Pasal 3

- (1) Aspek Proteksi Radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1) paling sedikit mencakup analisis mengenai:
 - a. pertimbangan umum aspek Proteksi Radiasi;
 - b. Proteksi Radiasi terhadap personel di dalam tapak Reaktor Daya;

- c. Proteksi Radiasi terhadap anggota masyarakat di sekitar tapak Reaktor Daya;
 - d. pemantauan radiasi dan kontaminasi; dan
 - e. fasilitas bantu.
- (2) Analisis sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus memperhatikan seluruh kebutuhan pertimbangan aspek Proteksi Radiasi pada setiap tahapan.
- (3) Tahapan sebagaimana dimaksud pada ayat (2) meliputi:
- a. Prakonstruksi;
 - b. Konstruksi;
 - c. Komisioning;
 - d. Operasi; dan
 - e. Dekomisioning.
- (4) Aspek Proteksi Radiasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) menjadi bagian tidak terpisahkan dari dokumen laporan analisis keselamatan.

BAB II

PERTIMBANGAN UMUM ASPEK PROTEKSI RADIASI

Bagian Kesatu

Umum

Pasal 4

Pertimbangan umum aspek Proteksi Radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 ayat (1) huruf a terdiri atas:

- a. tujuan keselamatan desain;
- b. sumber radiasi;
- c. penerapan prinsip limitasi dan optimisasi;
- d. pendekatan desain untuk tahap Operasi dan Dekomisioning; dan
- e. pendekatan desain untuk kondisi Kecelakaan Nuklir.

Bagian Kedua
Tujuan Keselamatan Desain

Pasal 5

- (1) Tujuan keselamatan desain sebagaimana dimaksud dalam Pasal 4 huruf a untuk memastikan bahwa:
 - a. dalam kondisi Operasi dan Dekomisioning, perkiraan penerimaan dosis radiasi di dalam maupun di luar instalasi Reaktor Daya tidak melampaui nilai pembatas dosis yang ditetapkan;
 - b. dalam kondisi Operasi dan Dekomisioning, pelepasan zat radioaktif yang terjadi dari dalam instalasi Reaktor Daya ke lingkungan hidup serendah mungkin yang dapat dicapai dan memenuhi persyaratan batas lepasan yang diizinkan; dan
 - c. dalam kondisi Kecelakaan Nuklir, penanggulangan dampak radiologi yang terjadi dapat diterapkan dengan baik.
- (2) Ketentuan mengenai penetapan nilai pembatas dosis sebagaimana dimaksud pada ayat (1) huruf a dan ketentuan mengenai nilai batas lepasan radioaktivitas ke lingkungan sebagaimana dimaksud pada ayat (1) huruf b diatur dalam Peraturan Badan tersendiri.

Bagian Ketiga
Sumber Radiasi

Paragraf 1
Umum

Pasal 6

- (1) Pertimbangan mengenai sumber radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 4 huruf b harus ditentukan pada saat melakukan Desain Reaktor Daya untuk kondisi:
 - a. Operasi;
 - b. selama proses Dekomisioning; dan
 - c. dalam hal terjadi Kecelakaan Nuklir.

- (2) Pertimbangan sebagaimana dimaksud pada ayat (1) bertujuan untuk memastikan setiap personel tidak menerima paparan radiasi secara langsung.
- (3) Pertimbangan sebagaimana dimaksud pada ayat (2) dapat dicapai dengan melakukan tindakan paling sedikit:
 - a. identifikasi sumber radiasi;
 - b. pengendalian penyebaran sumber radiasi;
 - c. penanganan sumber radiasi yang tidak dimungkinkan mempergunakan perisai radiasi;
 - d. pencegahan dan minimalisasi sumber radiasi yang berpotensi menimbulkan limbah radioaktif atau memberikan dosis secara dominan pada saat Dekomisioning;
 - e. penanganan sumber radiasi dengan sifat bahaya khusus; dan
 - f. penanganan sumber radiasi yang memberikan dosis secara dominan terhadap masyarakat umum.

Paragraf 2

Identifikasi Sumber Radiasi

Pasal 7

- (1) Identifikasi sumber radiasi untuk kondisi Operasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 6 ayat (1) huruf a meliputi identifikasi sumber radiasi pada:
 - a. teras reaktor dan bejana tekan;
 - b. sistem pendingin dan fluida moderator;
 - c. sistem turbin dan uap;
 - d. sistem pengolahan limbah radioaktif;
 - e. perangkat bahan bakar nuklir bekas;
 - f. tempat penyimpanan bahan bakar baru; dan
 - g. fasilitas dekontaminasi.
- (2) Identifikasi sumber radiasi selama proses Dekomisioning sebagaimana dimaksud dalam Pasal 6 ayat (1) huruf b meliputi identifikasi terhadap:
 - a. produk fisi dan aktivasi pada komponen teras reaktor dan bahan di sekitarnya;

- b. kontaminan pada sistem pendingin utama maupun tambahan; dan
 - c. bahan aktif yang terakumulasi pada keseluruhan instalasi.
- (3) Ketentuan mengenai sumber radiasi yang harus diperhatikan dalam kondisi Operasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dan selama proses Dekomisioning sebagaimana dimaksud pada ayat (2) tercantum dalam Lampiran I yang merupakan bagian tidak terpisahkan dari Peraturan Badan ini.

Pasal 8

- (1) Identifikasi sumber radiasi dalam hal terjadi Kecelakaan Nuklir sebagaimana dimaksud dalam Pasal 6 ayat (1) huruf c harus mengutamakan sumber radioaktif yang merupakan produk fisi.
- (2) Besar, lokasi, mekanisme, dan rute perpindahan sumber radioaktif yang merupakan produk fisi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) yang berpotensi mengakibatkan paparan radiasi pada saat terjadi Kecelakaan Nuklir harus ditentukan pada tahapan Desain Reaktor Daya.
- (3) Ketentuan mengenai sumber radiasi yang harus diperhatikan apabila terjadi Kecelakaan Nuklir sebagaimana dimaksud pada ayat (1) tercantum dalam Lampiran II yang merupakan bagian tidak terpisahkan dari Peraturan Badan ini.

Paragraf 3

Pengendalian Penyebaran Sumber Radiasi

Pasal 9

- (1) Fitur Desain untuk pengendalian penyebaran sumber radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 6 ayat (3) huruf b harus memperhatikan aspek:
- a. teras reaktor dan instalasi sekitarnya;
 - b. struktur, sistem, dan komponen reaktor;
 - c. bahan pendingin teraktivasi atau terkontaminasi; dan

- d. penerapan pemisahan sumber radiasi menggunakan bahan struktur, sistem, dan komponen sebagai perisai radiasi.

Pasal 10

- (1) Pengendalian penyebaran sumber radiasi dari dalam teras reaktor dan instalasi sekitarnya sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 huruf a harus dilakukan berdasarkan analisis kekuatan sumber radiasi, mencakup paling sedikit:
 - a. laju fisi;
 - b. laju pancaran neutron dan radiasi gama; dan
 - c. distribusi fluks neutron di dalam teras.
- (2) Analisis kekuatan sumber sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dapat dilakukan menggunakan kode pemrograman komputer dengan mempertimbangkan:
 - a. kondisi neutronik reaktor;
 - b. geometri reaktor dan komposisi bahan bakar;
 - c. pola siklus Operasi;
 - d. distribusi material di dalam teras;
 - e. perubahan komposisi bahan bakar;
 - f. produksi aktinida dan racun berupa produk fisi; dan
 - g. perubahan racun kendali terhadap fraksi bakar.

Pasal 11

- (1) Pengendalian penyebaran sumber radiasi dari struktur, sistem, dan komponen reaktor sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 huruf b paling sedikit harus dilakukan terhadap:
 - a. bahan bakar nuklir bekas;
 - b. batang kendali;
 - c. sumber neutron;
 - d. alat instrumentasi di dalam teras reaktor; dan
 - e. peralatan lain di dalam reaktor.
- (2) Dasar desain untuk perisai radiasi terhadap sumber radiasi yang terdapat di dalam struktur, sistem, dan komponen reaktor sebagaimana dimaksud pada ayat (1)

harus didasarkan pada aktivitas maksimum yang dapat terjadi sepanjang masa Operasi Reaktor Daya.

Pasal 12

Pengendalian penyebaran sumber radiasi pada bahan pendingin teraktivasi atau terkontaminasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 huruf c harus dilakukan dengan mempertimbangkan:

- a. produk fisi;
- b. produk aktivasi atau kontaminasi; dan
- c. produk korosi aktif;

yang dilepaskan ke dalam, dipindahkan di dalam, dan mengendap pada sistem pendingin primer.

Pasal 13

- (1) Pengendalian penyebaran sumber radiasi dengan penerapan pemisahan sumber radiasi menggunakan bahan struktur, sistem, dan komponen sebagai perisai radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 huruf d harus dilakukan dengan memperhitungkan daya tembus radiasi gama dan neutron melalui, paling sedikit:
 - a. perisai sederhana dengan material tunggal;
 - b. beberapa lapis perisai dengan geometri kompleks dan bahan perisai dengan densitas rendah; dan
 - c. bahan dengan atenuasi rendah yang menyebabkan jalur paparan akibat adanya hamburan permukaan.
- (2) Perhitungan daya tembus radiasi gama dan neutron sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus didasarkan kepada pertimbangan penerapan prinsip optimisasi pada instalasi Reaktor Daya.
- (3) Dalam pengendalian penyebaran sumber radiasi dengan penerapan pemisahan sumber radiasi menggunakan bahan struktur, sistem, dan komponen sebagai perisai radiasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus dipastikan integritas bahan terhadap pengaruh paparan radiasi tetap terjaga.

Paragraf 4

Penanganan Sumber Radiasi yang Tidak Dimungkinkan
Mempergunakan Perisai Radiasi

Pasal 14

Fitur Desain untuk penanganan sumber radiasi yang tidak dimungkinkan mempergunakan perisai radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 6 ayat (3) huruf c harus memastikan bahwa:

- a. pekerjaan dapat dilakukan secepat mungkin; dan
- b. terdapat kemungkinan penggunaan peralatan yang dapat dioperasikan dari jarak jauh.

Paragraf 5

Pencegahan dan Minimalisasi Sumber Radiasi yang
Berpotensi Menimbulkan Limbah Radioaktif atau Memberikan
Dosis secara Dominan pada saat Dekomisioning

Pasal 15

Fitur Desain untuk pencegahan dan minimalisasi timbulnya sumber radiasi yang memberikan dosis secara dominan pada saat dekomisioning sebagaimana dimaksud dalam Pasal 6 ayat (3) huruf d harus dilakukan dengan cara paling sedikit:

- a. pengendalian bahan pengotor dalam bahan struktur, sistem, dan komponen instalasi;
- b. pemilihan dan penggunaan bahan struktur, sistem, dan komponen instalasi yang tidak mudah teraktivasi;
- c. pemilihan dan penggunaan bahan struktur, sistem, dan komponen yang tidak mudah terkontaminasi; dan
- d. pengendalian aktivasi dan kontaminasi pada fluida sistem pendingin.

Paragraf 6

Penanganan Sumber Radiasi dengan Sifat Bahaya Khusus

Pasal 16

- (1) Fitur Desain untuk penanganan sumber radiasi dengan sifat bahaya khusus sebagaimana dimaksud dalam Pasal 6 ayat (3) huruf e harus dapat mengendalikan keberadaan:
 - a. partikel logam yang ditimbulkan akibat adanya keausan dari komponen atau perangkat bahan bakar nuklir;
 - b. serpihan yang terdapat pada sistem pendingin utama atau sistem lain yang terhubung; dan
 - c. endapan tebal pada permukaan bahan bakar nuklir.
- (2) Sifat bahaya khusus sebagaimana dimaksud pada ayat (1) paling sedikit berupa:
 - a. sifat mudah meledak;
 - b. sifat mudah terbakar;
 - c. sifat racun; dan/atau
 - d. sifat mudah korosif.

Paragraf 7

Penanganan Sumber Radiasi yang Memberikan Dosis secara Dominan terhadap Masyarakat Umum

Pasal 17

- (1) Fitur Desain untuk penanganan sumber radiasi yang memberikan dosis secara dominan terhadap masyarakat umum sebagaimana dimaksud dalam Pasal 6 ayat (3) huruf f terdiri atas, paling sedikit:
 - a. sistem pengendalian sirkulasi udara di dalam instalasi;
 - b. sistem pemfilteran efluen di dalam instalasi dan titik lepasan;
 - c. sistem pengendalian lepasan efluen ke lingkungan hidup; dan
 - d. sistem pemantauan lingkungan hidup.

- (2) Sumber radiasi yang memberikan dosis secara dominan terhadap masyarakat umum sebagaimana dimaksud pada ayat (1) yang harus diperhatikan dan dikendalikan paling sedikit:
- a. gas mulia, meliputi argon-41 (Ar-41), kripton-85 (Kr-85), dan xenon-133 (Xe-133) karena bersifat lembam serta tidak berinteraksi dengan materi dan tidak dapat dipisahkan dalam sistem pemurnian sehingga berpotensi terlepas dalam volume besar;
 - b. hidrogen-3 (H-3), dan karbon-14 (C-14) karena inefisiensi pemisahan pada sistem pengolahan limbah radioaktif dan limbah radioaktif berumur paruh panjang; dan
 - c. yodium, sesium, dan produk korosi.

Bagian Keempat

Penerapan Prinsip Limitasi dan Optimisasi

Pasal 18

- (1) Penerapan prinsip limitasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 4 huruf c harus dilaksanakan melalui perencanaan Fitur Desain untuk memastikan:
- a. nilai batas dosis untuk pekerja radiasi tidak melampaui dosis efektif rata-rata sebesar 20 mSv (dua puluh milisievert) per tahun dalam periode 5 (lima) tahun; dan
 - b. nilai batas dosis untuk anggota masyarakat tidak melampaui dosis efektif sebesar 1 mSv (satu milisievert) per tahun.
- (2) Nilai batas dosis untuk pekerja radiasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) huruf a harus memperhitungkan dosis individual maupun dosis kolektif.
- (3) Nilai batas dosis untuk anggota masyarakat sebagaimana dimaksud pada ayat (1) huruf b harus diperhitungkan dari besarnya penerimaan dosis oleh anggota kelompok masyarakat kritis.

- (4) Penentuan kelompok masyarakat kritis sebagaimana dimaksud pada ayat (3) harus dilakukan melalui kajian yang dilengkapi dengan jalur kritis penerimaan dosis.
- (5) Ketentuan mengenai nilai batas dosis sebagaimana dimaksud pada ayat (1) diatur dalam Peraturan Badan tersendiri.

Pasal 19

- (1) Penerapan prinsip optimisasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 4 huruf c harus dilaksanakan melalui penetapan nilai pembatas dosis tahunan untuk keseluruhan instalasi Reaktor Daya dalam satu kawasan tapak.
- (2) Penetapan nilai pembatas dosis tahunan sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus mempertimbangkan konsep serendah mungkin yang dapat dicapai.

Pasal 20

- (1) Berdasarkan identifikasi sumber radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 6 ayat (3) huruf a, nilai batas dosis sebagaimana dimaksud dalam Pasal 18 ayat (1) huruf a dan huruf b, dan nilai pembatas dosis tahunan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 19 ayat (1), harus ditetapkan nilai Dosis Target Desain.
- (2) Penetapan nilai Dosis Target Desain sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus memperhitungkan toleransi margin keselamatan yang memadai terhadap nilai pembatas dosis tahunan.
- (3) Nilai Dosis Target Desain sebagaimana dimaksud pada ayat (2) menjadi dasar perancangan Fitur Desain instalasi Reaktor Daya secara keseluruhan.

Bagian Kelima

Pendekatan Desain untuk Tahap Operasi dan Dekomisioning

Pasal 21

Pendekatan desain untuk tahap Operasi dan Dekomisioning sebagaimana dimaksud dalam Pasal 4 huruf d harus mempertimbangkan:

- a. sumber daya manusia;
- b. pengorganisasian desain dan Operasi; dan
- c. strategi desain.

Pasal 22

- (1) Sumber daya manusia sebagaimana dimaksud dalam Pasal 21 huruf a harus memiliki keahlian yang memadai untuk mendukung perencanaan dan pembuatan Desain Reaktor Daya.
- (2) Keahlian yang memadai sebagaimana dimaksud pada ayat (1) meliputi bidang:
 - a. Proteksi Radiasi;
 - b. reaktor nuklir, yang terdiri atas bidang:
 1. neutronik;
 2. termohidrolik;
 3. keselamatan reaktor;
 4. instrumentasi reaktor nuklir; dan
 5. manajemen kecelakaan nuklir;
 - c. radiokimia;
 - d. material;
 - e. konstruksi bangunan sipil; dan
 - f. operator berpengalaman.
- (3) Dalam pembuatan Desain Reaktor Daya, ahli Proteksi Radiasi sebagaimana dimaksud pada ayat (2) huruf a memberikan pertimbangan utama berkaitan dengan:
 - a. keahlian pada semua bidang yang berkaitan dengan timbulnya produk fisi, bahan terkontaminasi atau teraktivasi, dan perpindahan zat radioaktif di dalam instalasi maupun ke lingkungan sekitar;

- b. evaluasi terhadap sumber radiasi yang ada di dalam instalasi beserta potensi dosis radiasi yang ditimbulkannya;
 - c. penerapan metode analisis terhadap data dan informasi operasional yang tersedia;
 - d. kepatuhan terhadap peraturan perundang-undangan yang berlaku;
 - e. pengalaman kerja yang memadai; dan
 - f. pengalaman keterlibatan menangani kegiatan yang berkontribusi memberikan dosis kerja secara signifikan, seperti pada saat perawatan, perbaikan, dan inspeksi layanan operasi.
- (4) Dalam pembuatan Desain Reaktor Daya, ahli radiokimia sebagaimana dimaksud pada ayat (2) huruf c memberikan pertimbangan utama dalam hal pengaruh parameter kimia terhadap penyebaran dan pengendalian sumber radiasi di dalam instalasi.
- (5) Dalam pembuatan Desain Reaktor Daya, ahli material sebagaimana dimaksud pada ayat (2) huruf d memberikan pertimbangan utama dalam hal pemilihan material untuk menahan radiasi, mendukung kekuatan struktur bangunan, dan pengendalian penyebaran sumber radiasi.

Pasal 23

- (1) Pengorganisasian desain sebagaimana dimaksud dalam Pasal 21 huruf b harus direncanakan dengan cermat berdasarkan saran pertimbangan dari seluruh sumber daya manusia dengan keahlian yang memadai sebagaimana dimaksud dalam Pasal 22 ayat (2).
- (2) Perencanaan sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dilaksanakan berdasarkan:
- a. peraturan perundang-undangan atau standar mengenai desain dan tata letak instalasi;
 - b. kebijakan tertulis yang terkait dengan Proteksi Radiasi;
 - c. pengalaman praktis dari berbagai instalasi Reaktor Daya yang telah terbangun dan/atau beroperasi;

- d. basis data kimia dan radiologi yang relevan;
 - e. kajian potensi penerimaan dosis individu dan kolektif;
 - f. tinjauan optimisasi desain;
 - g. analisis biaya-manfaat; dan
 - h. berbagai referensi pendukung lain.
- (3) Dalam setiap tahapan perencanaan dan pembuatan desain, harus diterapkan program jaminan mutu yang terstruktur dan sistematis.

Pasal 24

Strategi desain sebagaimana dimaksud dalam Pasal 21 huruf c harus ditetapkan, mencakup:

- a. pendekatan umum;
- b. desain Proteksi Radiasi untuk pekerja; dan
- c. desain Proteksi Radiasi untuk anggota masyarakat umum.

Pasal 25

- (1) Pendekatan umum dalam strategi desain sebagaimana dimaksud dalam Pasal 24 huruf a harus dimulai dengan penetapan nilai Dosis Target Desain pada awal proses desain.
- (2) Nilai Dosis Target Desain sebagaimana dimaksud pada ayat (1) mencakup:
- a. nilai target dosis kolektif dan perorangan untuk pekerja radiasi selama 1 tahun; dan
 - b. nilai target dosis perorangan untuk anggota masyarakat selama 1 tahun.

Pasal 26

Strategi desain Proteksi Radiasi untuk pekerja radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 24 huruf b harus dilaksanakan dengan penerapan pertimbangan Fitur Desain untuk:

- a. pengendalian paparan radiasi semenjak awal desain secara logis;
- b. minimalisasi produksi dan penambahan radionuklida;

- c. pembagian tata letak instalasi menjadi beberapa zona berdasarkan perkiraan laju dosis dan tingkat kontaminasi radioaktif, kebutuhan akses, dan kebutuhan khusus lainnya;
- d. pelaksanaan program perawatan dan perbaikan;
- e. pengaturan personel pada setiap zona daerah kerja;
- f. pelaksanaan evaluasi dosis individu maupun kolektif untuk setiap pekerja;
- g. perencanaan awal program Dekomisioning; dan
- h. pelaksanaan evaluasi dan tindakan perbaikan pada setiap perkembangan tahapan desain untuk penyesuaian terhadap target desain yang ingin dicapai.

Pasal 27

- (1) Pengendalian paparan radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 26 huruf a harus dapat memastikan penerimaan dosis radiasi terhadap pekerja radiasi, baik secara individu maupun kolektif, dalam batas aman yang ditentukan.
- (2) Pengendalian paparan radiasi terhadap pekerja radiasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dapat dilakukan dengan cara:
 - a. pengurangan laju dosis di daerah kerja; dan
 - b. pengurangan waktu kerja selama berada di daerah kerja.
- (3) Pengurangan laju dosis di daerah kerja sebagaimana dimaksud pada ayat (2) huruf a dapat diterapkan melalui paling sedikit:
 - a. pengurangan sumber radiasi, dengan cara:
 - 1. pemilihan bahan dan material yang tepat;
 - 2. penerapan metode dekontaminasi yang tepat; dan
 - 3. kendali korosi, kimia air, filtrasi, serta purifikasi yang tepat;
 - b. peningkatan kualitas perisai radiasi; dan
 - c. penambahan jarak antara pekerja dan sumber radiasi.

- (4) Pengurangan waktu kerja selama berada di daerah kerja sebagaimana dimaksud pada ayat (2) huruf b dapat diterapkan melalui paling sedikit:
- a. penggunaan peralatan berstandar tinggi untuk menjamin keandalan alat;
 - b. menjamin kemudahan perawatan, perbaikan, dan/atau pembuangan peralatan;
 - c. minimalisasi tugas operasional; dan
 - d. tindakan untuk menjamin kemudahan jalan masuk dan penerangan daerah kerja yang baik.

Pasal 28

- (1) Khusus untuk desain Reaktor Daya berpendingin air berat bertekanan (*pressurized heavy water reactor/PHWR*), selain mempertimbangkan ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 26 dan Pasal 27, Fitur Desain yang berkaitan dengan tata letak harus dirancang dalam pembagian zona kerja berdasarkan tingkat kontaminasi radionuklida tritium-3 (H-3) di udara.
- (2) Penanganan dan pengendalian radionuklida tritium-3 (H-3) harus memperhatikan Fitur Desain sebagaimana dimaksud pada ayat (1).

Pasal 29

- (1) Strategi desain Proteksi Radiasi untuk anggota masyarakat umum sebagaimana dimaksud dalam Pasal 24 huruf c harus dilaksanakan dengan penerapan pertimbangan Fitur Desain untuk:
 - a. penetapan awal target desain penerimaan dosis individu anggota masyarakat tahunan;
 - b. menjamin kontaminasi pada bahan atau material yang terlepas dari instalasi dapat dipantau dengan baik; dan
 - c. mengantisipasi perbaikan Fitur Desain berkaitan dengan perkembangan area di sekitar instalasi dan perubahan distribusi populasi penduduk.

- (2) Target desain penerimaan dosis individu anggota masyarakat tahunan sebagaimana dimaksud pada ayat (1) huruf a dapat dicapai dengan beberapa cara paling sedikit:
- a. identifikasi seawal mungkin terhadap fitur khusus yang berkaitan dengan penerimaan dosis oleh anggota masyarakat pada tahap awal proses perancangan, mencakup:
 1. identifikasi kelompok masyarakat kritis; dan
 2. identifikasi jalur paparan kritis;
 - b. identifikasi radionuklida lepasan berdasarkan pengalaman instalasi Reaktor Daya yang telah beroperasi;
 - c. penggunaan desain peralatan yang sekaligus berfungsi sebagai sistem pengolahan limbah radioaktif; dan
 - d. evaluasi terhadap pilihan pendekatan desain yang lain.

Bagian Keenam

Pendekatan Desain untuk Kondisi Kecelakaan Nuklir

Pasal 30

Pendekatan desain untuk kondisi Kecelakaan Nuklir sebagaimana dimaksud dalam Pasal 4 huruf e harus diterapkan pada Fitur Desain untuk tujuan:

- a. mengurangi potensi dan mencegah terjadinya Kecelakaan Nuklir;
- b. mengurangi timbulnya suku sumber;
- c. meminimalisasi terjadinya pelepasan suku sumber dalam kondisi kecelakaan yang sesungguhnya;
- d. menekan risiko penerimaan paparan langsung dari lepasan radionuklida pada saat Kecelakaan Nuklir oleh pekerja serendah mungkin; dan
- e. menekan risiko penerimaan paparan secara langsung maupun tidak langsung dari lepasan radionuklida pada

saat Kecelakaan Nuklir oleh anggota masyarakat serendah mungkin.

Pasal 31

- (1) Tujuan desain sebagaimana dimaksud dalam Pasal 30 dapat dicapai dengan penggunaan desain berstandar tinggi yang berdasarkan hasil analisis keselamatan.
- (2) Analisis keselamatan sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus mencakup:
 - a. analisis keselamatan deterministik; dan
 - b. analisis keselamatan probabilistik.
- (3) Analisis keselamatan sebagaimana dimaksud pada ayat (2) harus berlandaskan kepada:
 - a. asumsi konservatif pada analisis Kecelakaan Dasar Desain; dan
 - b. asumsi realistis atau perkiraan terbaik pada analisis Kecelakaan Parah.

Pasal 32

- (1) Fitur Desain untuk tujuan Proteksi Radiasi selama kondisi Kecelakaan Nuklir harus ditetapkan setelah berkonsultasi dengan para pakar yang kompeten.
- (2) Pakar yang kompeten sebagaimana dimaksud pada ayat (1), meliputi:
 - a. pakar Proteksi Radiasi;
 - b. pakar Operasi Reaktor Daya;
 - c. pakar desain dan analisis Kecelakaan Nuklir; dan
 - d. pakar peraturan perundang-undangan ketenaganukliran.

BAB III
PROTEKSI RADIASI TERHADAP PERSONEL DI DALAM
TAPAK REAKTOR DAYA

Bagian Kesatu
Umum

Pasal 33

- (1) Proteksi radiasi terhadap personel di dalam tapak Reaktor Daya sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 ayat (1) huruf b meliputi proteksi untuk:
 - a. personel pekerja radiasi; dan
 - b. personel non-pekerja radiasi.
- (2) Personel pekerja radiasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) huruf a meliputi:
 - a. operator reaktor;
 - b. supervisor reaktor;
 - c. teknisi perawatan;
 - d. supervisor perawatan;
 - e. petugas proteksi radiasi;
 - f. pengurus inventori bahan nuklir; dan
 - g. pengawas inventori bahan nuklir.
- (3) Personel non-pekerja radiasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) huruf b merupakan personel pekerja yang memiliki potensi penerimaan dosis radiasi kurang dari 1 mSv (satu milisievert) dalam satu tahun.

Pasal 34

- (1) Proteksi Radiasi terhadap personel sebagaimana dimaksud dalam Pasal 33 harus diterapkan untuk kondisi:
 - a. Operasi;
 - b. selama proses Dekomisioning; dan
 - c. apabila terjadi Kecelakaan Nuklir.
- (2) Kondisi Operasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) huruf a meliputi:
 - a. kondisi Operasi normal; dan

- b. kondisi Operasi abnormal.

Bagian Kedua

Proteksi Radiasi terhadap Personel untuk Kondisi Operasi dan selama Proses Dekomisioning

Paragraf 1

Umum

Pasal 35

Proteksi Radiasi terhadap personel untuk kondisi Operasi dan selama proses Dekomisioning sebagaimana dimaksud dalam Pasal 34 ayat (1) huruf a dan huruf b harus mencakup penerapan Fitur Desain untuk tindakan perancangan:

- a. pengendalian sumber radiasi;
- b. tata letak instalasi;
- c. desain struktur, sistem, dan komponen;
- d. penerapan teknik jarak jauh;
- e. fasilitas dekontaminasi;
- f. penerapan perisai radiasi;
- g. penerapan sistem ventilasi; dan
- h. pengelolaan limbah radioaktif.

Paragraf 2

Pengendalian Sumber Radiasi

Pasal 36

Fitur Desain untuk tindakan perancangan pengendalian sumber radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 35 huruf a harus diterapkan terhadap:

- a. sumber radioaktif yang merupakan produk fisi;
- b. produk korosi teraktivasi; dan
- c. aktivitas air sediaan.

Pasal 37

- (1) Pengendalian sumber radiasi berupa sumber radioaktif yang merupakan produk fisi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 36 huruf a harus dilakukan untuk mengantisipasi kemungkinan keberadaan cacat kelongsong bahan bakar yang menyebabkan pelepasan produk fisi ke bahan pendingin.
- (2) Pengendalian sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dilakukan dengan cara pemisahan dan pengisolasian bahan bakar cacat.

Pasal 38

- (1) Terbentuknya produk korosi teraktivasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 36 huruf b harus dicegah dengan pemilihan dan penggunaan material bahan yang tidak mudah terkorosi dan teraktivasi.
- (2) Dalam hal upaya pencegahan sebagaimana dimaksud pada ayat (1) telah diterapkan, produk korosi teraktivasi tetap harus diminimalisasi dengan penerapan Fitur Desain untuk:
 - a. pengurangan laju korosi dan erosi bahan pada sirkulasi sistem pendingin dengan pemilihan bahan yang tepat, serta pengendalian bahan kimia pendingin;
 - b. penggunaan filter partikulat dan resin penukar ion sebagai sistem pembersihan fluida pendingin; dan
 - c. minimalisasi kandungan konsentrasi nuklida yang dapat teraktivasi pada air umpan di dalam teras reaktor.
- (3) Penggunaan filter partikulat dan resin penukar ion sebagaimana dimaksud pada ayat (2) huruf b harus mempertimbangkan kapasitas yang memadai untuk mengatasi terjadinya pelepasan produk korosi berlebihan (*crud bursts*) dan produk fisi (*spiking*) yang terjadi selama fase penyalaan (*start up*) dan pendinginan Reaktor Daya.

Pasal 39

- (1) Desain sistem pengendalian aktivitas air sediaan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 36 huruf c harus dilengkapi sistem pembersihan menggunakan filter partikel dan resin penukar ion.
- (2) Sistem pengendalian aktivitas air sediaan sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus diterapkan untuk pendinginan di teras reaktor maupun di kolam pendinginan bahan bakar nuklir bekas.

Paragraf 3

Tata Letak Instalasi

Pasal 40

- (1) Fitur Desain untuk tindakan perancangan tata letak instalasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 35 huruf b harus diterapkan berdasarkan hasil kajian terhadap kebutuhan akses untuk pelaksanaan Operasi, inspeksi, perawatan, pemeliharaan, perbaikan, penggantian, hingga Dekomisioning.
- (2) Perancangan tata letak instalasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) bertujuan untuk membatasi penerimaan paparan radiasi terhadap pekerja.
- (3) Rancangan tata letak instalasi harus mencerminkan adanya penerapan:
 - a. klasifikasi dan zonasi daerah kerja; dan
 - b. pengendalian akses dan hunian.

Pasal 41

- (1) Penerapan klasifikasi dan zonasi daerah kerja sebagaimana dimaksud dalam Pasal 40 ayat (3) huruf a harus memperhatikan kebutuhan adanya daerah supervisi dan daerah pengendalian.
- (2) Penentuan daerah supervisi dan daerah pengendalian sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus didasarkan kepada:
 - a. tingkat paparan radiasi; dan/atau

- b. tingkat kontaminasi radionuklida pada permukaan maupun dalam udara di dalam instalasi.
- (3) Fitur Desain juga harus dirancang untuk mengantisipasi adanya kebutuhan evaluasi dan penentuan ulang klasifikasi dan zonasi daerah kerja.
- (4) Ketentuan mengenai daerah supervisi dan daerah pengendalian sebagaimana dimaksud pada ayat (1) diatur dalam Peraturan Badan tersendiri.

Pasal 42

- (1) Penerapan pengendalian akses dan hunian sebagaimana dimaksud dalam Pasal 40 ayat (3) huruf b bertujuan untuk memastikan kesesuaian batas penerimaan dosis tahunan untuk setiap individu pekerja radiasi.
- (2) Pengendalian akses dan hunian sebagaimana dimaksud pada ayat (1) diterapkan antara lain dengan cara:
 - a. penentuan jalur akses, jumlah minimum jalur akses, dan jalan keluar untuk setiap daerah kerja;
 - b. pemasangan pintu akses yang dapat dikunci dan/atau dilengkapi sistem saling kunci (*interlock*);
 - c. pengaturan atau pembatasan rute dan waktu akses perlintasan di daerah kerja;
 - d. pembatasan waktu hunian di daerah kerja untuk tujuan pemeliharaan, perawatan, pengujian, dan/atau perbaikan; dan
 - e. minimalisasi potensi penyebaran kontaminasi antar daerah kerja.

Paragraf 4

Desain Struktur, Sistem, dan Komponen

Pasal 43

Fitur Desain untuk tindakan perancangan struktur, sistem, dan komponen sebagaimana dimaksud dalam Pasal 35 huruf c harus diterapkan berdasarkan umpan balik dari pengalaman yang diperoleh dalam pengurangan penerimaan paparan radiasi pada instalasi Reaktor Daya yang beroperasi.

Pasal 44

Langkah pengurangan penerimaan paparan radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 43 yang dapat diadopsi dalam desain sistem paling sedikit berupa:

- a. perlindungan ruang kerja pada zona tingkat radiasi tinggi di sekitar komponen yang memerlukan perawatan rutin dari radiasi yang berasal dari sistem lain;
- b. pemasangan komponen non-radioaktif yang tidak berdekatan dengan komponen aktif di luar daerah radiasi tingkat tinggi;
- c. penyediaan metode pengambilan sampel cairan radioaktif dengan paparan minimal; dan
- d. penyediaan metode untuk penanggulangan atau penanganan sedimen lumpur radioaktif di dalam pipa dan kontainer.

Pasal 45

Untuk sistem perpipaan, pendekatan Fitur Desain instalasi yang dapat diterapkan dalam perancangan paling sedikit berupa:

- a. pengaturan jarak yang memadai dalam pemasangan atau penempatan antara pipa yang berisi cairan radioaktif dan pipa non-radioaktif, maupun antara pipa yang berisi cairan radioaktif dan sistem lain yang memerlukan pemeliharaan rutin;
- b. ruang yang memadai untuk melakukan inspeksi, perbaikan, maupun Modifikasi di sela antara pipa dan dinding;
- c. pemipaan menggunakan material dengan permukaan yang halus dan rata untuk menyesuaikan dengan aliran fluida dan pengendalian sifat kimia agar penumpukan tak terkendali partikel radioaktif dapat dicegah;
- d. jalur bukaan dan drainase yang tidak terlalu banyak;
- e. minimalisasi keberadaan sambungan pengelasan yang memerlukan inspeksi rutin; dan

- f. penghindaran keberadaan sistem perpipaan yang menyebabkan terjadinya stagnasi cairan dan timbulnya pengendapan atau pengumpulan produk korosi teraktivasi.

Pasal 46

Langkah pengurangan penerimaan paparan radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 43 yang dapat diadopsi dalam desain komponen paling sedikit berupa:

- a. pemilihan dan penggunaan komponen dengan keandalan tinggi tetapi hanya memerlukan pengawasan, perawatan, pemeliharaan, pengujian, dan/atau kalibrasi yang minimum;
- b. penggunaan komponen yang mudah dilepas untuk sistem yang terpasang di daerah tingkat radiasi tinggi;
- c. penggunaan komponen yang memiliki permukaan rata dan halus untuk menghindari penumpukan atau pengendapan radionuklida;
- d. penggunaan komponen dengan material yang mudah didekontaminasi, baik secara kimia maupun mekanis; dan
- e. pemisahan komponen yang mengakibatkan paparan radiasi tinggi dari komponen lain dalam pemeliharaan dan perbaikan.

Paragraf 5

Penerapan Teknik Jarak Jauh

Pasal 47

- (1) Fitur Desain untuk tindakan perancangan penerapan teknik jarak jauh sebagaimana dimaksud dalam Pasal 35 huruf d harus diterapkan untuk meminimalisasi penerimaan paparan radiasi oleh pekerja radiasi, baik untuk kondisi Operasi maupun selama pelaksanaan Dekomisioning.
- (2) Penerapan teknik jarak jauh sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus mempertimbangkan kebutuhan pemindahan, pemasangan, dan pengoperasian peralatan dari jarak jauh.

Pasal 48

Untuk kebutuhan pengamatan atau pemeriksaan visual jarak jauh, harus dipertimbangkan penggunaan kamera televisi dan jendela yang terlindung dengan kaca timbal dengan ketebalan yang memadai.

Pasal 49

Fitur Desain dalam perancangan penerapan teknik jarak jauh harus mempertimbangkan dinamika dan perubahan kebutuhan di dalam instalasi Reaktor Daya.

Paragraf 6

Fasilitas Dekontaminasi

Pasal 50

- (1) Fitur Desain untuk tindakan perancangan fasilitas dekontaminasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 35 huruf e harus mempertimbangkan adanya potensi kontaminasi zat radioaktif terhadap:
 - a. peralatan dan/atau perlengkapan kerja;
 - b. ruangan kerja; dan
 - c. personel.
- (2) Rancangan fasilitas dekontaminasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus menerapkan ketentuan:
 - a. penggunaan lapisan khusus yang mudah didekontaminasi pada permukaan lantai dan dinding;
 - b. penanggulan dan pemiringan permukaan lantai yang memadai; dan
 - c. penyediaan sistem pengurasan, pengumpulan, dan penampungan cairan hasil dekontaminasi secara cepat dan tepat.

Pasal 51

- (1) Perhatian khusus harus diterapkan pada ruangan kerja yang memiliki potensi adanya kebocoran atau tumpahan cairan radioaktif.

- (2) Ruang kerja sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus memenuhi ketentuan rancangan fasilitas dekontaminasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 50 ayat (2).

Pasal 52

Selain pelaksanaan dekontaminasi pada fasilitas dekontaminasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 50 dan pada ruang kerja sebagaimana dimaksud dalam Pasal 51 ayat (1), Fitur Desain juga harus mempertimbangkan kebutuhan dekontaminasi atau pemurnian pada beberapa sistem atau fasilitas:

- a. kolam penyimpanan bahan bakar nuklir dan bahan bakar nuklir bekas; dan
- b. sistem pendingin utama aktif.

Paragraf 7

Penerapan Perisai Radiasi

Pasal 53

- (1) Fitur Desain untuk tindakan perancangan penerapan perisai radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 35 huruf f harus memperhitungkan penumpukan radionuklida selama usia hidup Reaktor Daya.
- (2) Penerapan perisai radiasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus diperhitungkan berdasarkan kajian secara iteratif yang mempertimbangkan kondisi perisai tanpa penetrasi maupun adanya penetrasi.

Pasal 54

- (1) Pemilihan bahan untuk perisai radiasi harus mempertimbangkan:
 - a. sifat radiasi, meliputi:
 1. keberadaan radiasi beta dan radiasi pengereman (*bremsstrahlung*);
 2. neutron dan sinar gama; dan/atau
 3. sinar gama saja.

- b. sifat bahan, meliputi:
 - 1. derajat penghamburan atau penyerapan;
 - 2. potensi produksi radiasi sekunder; dan/atau
 - 3. peluang teraktivasi.
 - c. sifat mekanik bahan, meliputi:
 - 1. stabilitas;
 - 2. kompatibilitas dengan bahan lain; dan/atau
 - 3. karakteristik struktural.
 - d. keterbatasan ruang dan massa.
- (2) Kemungkinan degradasi kemampuan bahan harus diantisipasi sejak perancangan, akibat adanya paling sedikit:
- a. potensi aktivasi pada bahan yang memiliki tampang serap neutron tinggi;
 - b. radiolisis dan penggetasan;
 - c. erosi dan korosi oleh fluida pendingin;
 - d. pengaruh temperatur yang menyebabkan pelepasan gas maupun uap air; dan
 - e. pengaruh gaya eksternal, seperti getaran dan seismik.
- (3) Kombinasi bahan harus dipertimbangkan untuk mendapatkan desain perisai radiasi radiasi yang optimal.

Pasal 55

Radiasi sekunder yang timbul akibat proses serapan neutron harus dapat diserap oleh bahan perisai radiasi.

Pasal 56

Dalam hal perisai radiasi tambahan sementara diperlukan pada kondisi Operasi Reaktor Daya, pertimbangan massa dan volume perisai radiasi tambahan beserta kelengkapan pendukung untuk mengangkut, mengangkat, atau membongkar-pasang harus diperhitungkan dalam desain.

Pasal 57

Fitur Desain perisai radiasi harus mampu mengantisipasi, mengurangi, atau mengendalikan peningkatan penerimaan

paparan radiasi akibat adanya penetrasi struktur, sistem, dan komponen pada perisai radiasi dengan cara paling sedikit:

- a. meminimalisasi daerah dan jumlah jalur lurus yang mengandung bahan berdensitas sangat rendah;
- b. memberikan sambungan perisai (*shielding plug*);
- c. menerapkan jalur penetrasi secara berkelok atau melengkung; dan/atau
- d. mengisi kekosongan ruang antara dengan bahan pengisi (*grouting*) atau bahan perisai pengganti lain.

Paragraf 8

Penerapan Sistem Ventilasi

Pasal 58

- (1) Fitur Desain untuk penerapan sistem ventilasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 35 huruf g harus diperhitungkan untuk tujuan:
 - a. menjaga kondisi bersih di dalam ruangan kerja secara memadai sesuai tujuan keselamatan radiasi dan keselamatan kerja;
 - b. mengurangi kebutuhan pemakaian perlengkapan pelindung pernafasan;
 - c. mengendalikan kontaminasi radionuklida di udara lingkungan kerja sesuai dengan baku tingkat radioaktivitas di lingkungan yang ditetapkan dan disetujui oleh Kepala Badan; dan
 - d. mencegah atau membatasi jumlah pelepasan radionuklida ke lingkungan hidup sesuai dengan nilai batas lepasan radioaktivitas ke lingkungan yang ditetapkan dan disetujui oleh Kepala Badan.
- (2) Rancangan sistem ventilasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus mempertimbangkan:
 - a. mekanisme pencampuran secara termal dan mekanik;
 - b. efektivitas pengenceran dalam mengurangi pencemaran udara;
 - c. pembuangan udara dari ruangan atau daerah kontaminasi;

- d. jarak aman antara titik pelepasan udara dengan titik asupan sistem ventilasi;
- e. kemampuan menghisap radionuklida udara di ruangan kerja;
- f. kemampuan filter corong penghisap (*exhaust*) dalam menyerap radionuklida udara; dan
- g. kemampuan sistem ventilasi pada kondisi anomali atau kecelakaan dalam upaya pembersihan radionuklida udara di dalam gedung.

Pasal 59

- (1) Fitur Desain aliran udara sistem ventilasi harus dirancang sedemikian rupa sehingga aliran udara mengalir dari daerah dengan tingkat kontaminasi zat radioaktif rendah menuju daerah dengan tingkat kontaminasi tinggi dengan memperhatikan:
 - a. Beda tekanan antara daerah/zona kontaminasi; dan
 - b. Kecepatan aliran udara.
- (2) Aliran udara sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus diciptakan untuk meminimalisasi potensi terjadinya pencampuran kontaminan.

Pasal 60

- (1) Fitur Desain harus dapat mengantisipasi adanya kebutuhan sistem ventilasi nonpermanen untuk diterapkan pada daerah di mana kontaminasi udara timbul selama kegiatan perawatan dengan luasan ruang yang memadai.
- (2) Sistem ventilasi nonpermanen sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dapat berupa kipas angin, filter, dan corong penghisap.

Paragraf 9
Pengelolaan Limbah Radioaktif

Pasal 61

- (1) Fitur Desain untuk perancangan tindakan pengelolaan limbah radioaktif sebagaimana dimaksud dalam Pasal 35 huruf h harus mencakup tahapan:
 - a. pengumpulan dan pengelompokan;
 - b. pengolahan;
 - c. pengondisian;
 - d. penyimpanan sementara; dan/atau
 - e. pengangkutan.
- (2) Pengelolaan limbah radioaktif sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus dilaksanakan selama masa hidup Reaktor Daya dan mencakup limbah radioaktif berbentuk padat, cair, maupun gas yang timbul.

Pasal 62

- (1) Fitur Desain untuk fasilitas penyimpanan sementara limbah radioaktif sebagaimana dimaksud dalam Pasal 61 ayat (1) huruf d harus menerapkan fungsi:
 - a. mempertahankan pengisolasian terhadap limbah yang dikelola;
 - b. mempertahankan kondisi subkritisitas pada fasilitas penyimpanan sementara bahan bakar nuklir bekas;
 - c. memberikan proteksi terhadap paparan radiasi;
 - d. menyediakan sistem pembuangan panas yang timbul dari proses peluruhan produk fisi pada bahan bakar nuklir bekas;
 - e. memberikan ventilasi udara yang diperlukan; dan
 - f. memungkinkan pengambilan kembali limbah untuk dipindahkan ke tempat lain.
- (2) Untuk mencapai terwujudnya fungsi sebagaimana dimaksud pada ayat (1), harus dipertimbangkan:
 - a. stabilitas kimia terhadap korosi yang disebabkan oleh faktor internal maupun eksternal limbah;

- b. perlindungan terhadap kerusakan radiasi, terutama akibat degradasi bahan organik, dan terhadap kerusakan perangkat elektronik;
- c. ketahanan terhadap dampak beban operasional, insiden, maupun kecelakaan;
- d. ketahanan terhadap efek termal;
- e. potensi pembangkitan gas akibat efek kimia dan radiolisis;
- f. potensi timbulnya bahan mudah terbakar atau korosif; dan
- g. potensi percepatan korosi logam.

Pasal 63

Fitur Desain untuk fasilitas penyimpanan sementara limbah radioaktif sebagaimana dimaksud dalam Pasal 62 harus mengantisipasi kemungkinan terjadinya insiden dan kecelakaan.

Pasal 64

Untuk kebutuhan sistem keamanan atau proteksi fisik, Fitur Desain fasilitas pengelolaan limbah radioaktif harus dirancang dengan pengamanan kunci dan/atau pengamanan saling kunci yang memadai.

Pasal 65

- (1) Fitur Desain fasilitas pengelolaan limbah radioaktif harus mengakomodasi kebutuhan penggunaan perangkat peralatan kendali jarak jauh.
- (2) Perangkat peralatan kendali jarak jauh sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus dirancang dengan kelengkapan sarana untuk pemeliharaan dan perbaikan.

Bagian Ketiga
Proteksi Radiasi terhadap Personel
untuk Kondisi Kecelakaan Nuklir

Pasal 66

- (1) Proteksi Radiasi terhadap personel untuk kondisi apabila terjadi Kecelakaan Nuklir sebagaimana dimaksud dalam Pasal 34 ayat (1) huruf c harus dirancang berdasarkan hasil kajian yang mencakup:
 - a. potensi risiko kecelakaan yang mungkin timbul;
 - b. titik lokasi yang rawan;
 - c. mekanisme perpindahan lepasan radionuklida; dan
 - d. jalur paparan radiasi dari sumber radiasi yang menyebar.
- (2) Kajian sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus mencakup semua skenario kejadian kecelakaan yang mungkin terjadi, termasuk kondisi Kecelakaan Parah.

Pasal 67

- (1) Fitur Desain Proteksi Radiasi terhadap personel untuk kondisi apabila terjadi Kecelakaan Nuklir sebagaimana dimaksud dalam Pasal 66 harus dapat menjamin keselamatan semua personel di dalam instalasi Reaktor Daya jika terjadi Kecelakaan Nuklir atau kejadian kedaruratan radiologi.
- (2) Fitur Desain sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus mencakup perancangan untuk:
 - a. akses penyelamatan dan titik kumpul;
 - b. area-dapat-huni (*habitability*) di dalam instalasi Reaktor Daya untuk keperluan kesiapsiagaan dan pengendalian Kecelakaan Nuklir;
 - c. identifikasi kondisi bahaya terantisipasi;
 - d. penerapan perisai radiasi;
 - e. minimalisasi penyebaran kontaminasi radionuklida ke udara;
 - f. antisipasi paparan radiasi setelah kecelakaan; dan

g. pengambilan sampel gas dan cairan setelah kecelakaan.

Pasal 68

- (1) Akses penyelamatan dan titik kumpul sebagaimana dimaksud dalam Pasal 67 ayat (2) huruf a harus dirancang untuk memastikan setiap personel memahami tanda, arahan, atau petunjuk mengikuti akses penyelamatan menuju titik kumpul.
- (2) Akses penyelamatan sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus bebas dari semua halangan yang menghambat pergerakan personel sehingga mengurangi durasi waktu paparan radiasi selama dalam pergerakan menuju titik kumpul.
- (3) Titik kumpul sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus memberikan Proteksi Radiasi yang memadai untuk setiap personel yang tidak terlibat sebagai petugas penanggulangan selama kegiatan penanggulangan dilaksanakan.

Pasal 69

- (1) Area-dapat-huni di dalam instalasi Reaktor Daya untuk keperluan kesiapsiagaan dan pengendalian kecelakaan nuklir sebagaimana dimaksud di dalam Pasal 67 ayat (2) huruf b paling sedikit meliputi:
 - a. ruang kendali reaktor;
 - b. ruang perlengkapan sistem kedaruratan;
 - c. ruang pusat kendali kedaruratan;
 - d. fasilitas pengambilan sampel pada pengungkung atau cerobong;
 - e. laboratorium analisis; dan
 - f. ruang teknis pendukung.
- (2) Area-dapat-huni sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus dirancang sedemikian rupa sehingga paparan radiasi tetap rendah selama masa terjadinya Kecelakaan Nuklir dan selama pelaksanaan penanggulangan kedaruratan.

Pasal 70

- (1) Identifikasi kondisi bahaya terantisipasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 67 ayat (2) huruf c harus diprioritaskan untuk melindungi petugas kedaruratan yang melakukan respons dan tindakan penanggulangan Kecelakaan Nuklir, baik di dalam maupun luar instalasi.
- (2) Prosedur atau instruksi kerja khusus harus dapat diterapkan untuk semua tindakan yang dilakukan guna memberikan perlindungan kepada petugas kedaruratan sebagaimana dimaksud pada ayat (1).
- (3) Prosedur atau instruksi kerja khusus sebagaimana dimaksud pada ayat (2) meliputi prosedur untuk:
 - a. mengukur dan mencatat dosis yang diterima secara kontinu;
 - b. menjamin dosis atau kontaminasi yang diterima tetap terkendali sesuai panduan yang ditetapkan;
 - c. penyediaan peralatan pelindung khusus; dan
 - d. pelatihan yang sesuai untuk pelaksanaan tindakan penanggulangan Kecelakaan Nuklir.

Pasal 71

- (1) Penerapan perisai radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 67 ayat (2) huruf d harus dapat menjamin personel maupun petugas penanggulangan kedaruratan dapat mengakses dan menempati ruang kendali reaktor atau ruang kendali tambahan untuk mengoperasikan dan menjaga peralatan-peralatan penting tanpa melampaui nilai batas dosis yang ditetapkan.
- (2) Penerapan perisai radiasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus memastikan kemudahan akses terhadap peralatan yang perlu dilakukan perawatan dan perbaikan setelah kejadian Kecelakaan Nuklir.
- (3) Penerapan perisai radiasi sebagaimana dimaksud pada ayat (2) harus diatur sedemikian rupa untuk mengurangi intervensi secara langsung oleh personel.

- (4) Tindakan pengurangan intervensi secara langsung sebagaimana dimaksud pada ayat (3) dapat dilakukan paling sedikit dengan pemasangan peralatan kendali otomatis atau kendali jarak jauh.

Pasal 72

- (1) Minimalisasi penyebaran kontaminasi radionuklida ke udara sebagaimana dimaksud dalam Pasal 67 ayat (2) huruf e harus diterapkan paling sedikit pada:
 - a. bangunan reaktor;
 - b. tempat penyimpanan bahan bakar;
 - c. ruang kendali reaktor; dan
 - d. ruang kendali tambahan.
- (2) Tindakan minimalisasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dapat dicapai paling sedikit dengan:
 - a. penutupan jalur masuk dan keluar udara;
 - b. penerapan sistem resirkulasi pendinginan udara yang dilengkapi dengan perlengkapan filter yang memadai;
 - c. penggunaan pengungkuh sekunder; dan/atau
 - d. pemberian jalur pembuangan ke atmosfer melalui cerobong udara yang dilengkapi dengan filter yang memadai.

Pasal 73

Antisipasi paparan radiasi setelah kecelakaan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 67 ayat (2) huruf f harus diterapkan terhadap:

- a. perpindahan material radionuklida;
- b. berkurang atau hilangnya efektivitas atau efisiensi perisai radiasi; dan
- c. pengaruh radiasi hambur.

Pasal 74

Pengambilan sampel gas dan cairan setelah kecelakaan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 67 ayat (2) huruf g harus mempertimbangkan prosedur dan instruksi kerja untuk

memastikan petugas sampling mengambil dan memeriksa sampel tanpa mengakibatkan paparan radiasi berlebih.

BAB IV
PROTEKSI RADIASI TERHADAP ANGGOTA MASYARAKAT DI
SEKITAR TAPAK REAKTOR DAYA

Bagian Kesatu
Umum

Pasal 75

- (1) Proteksi Radiasi terhadap anggota masyarakat di sekitar tapak Reaktor Daya sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 ayat (1) huruf c harus diterapkan untuk kondisi:
 - a. Operasi;
 - b. selama proses Dekomisioning; dan
 - c. apabila terjadi Kecelakaan Nuklir.
- (2) Kondisi Operasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) huruf a, meliputi:
 - a. kondisi operasi normal; dan
 - b. kondisi operasi abnormal.

Bagian Kedua

Proteksi Radiasi terhadap Anggota Masyarakat di Sekitar
Tapak Reaktor Daya untuk Kondisi Operasi dan Selama
Proses Dekomisioning

Pasal 76

Proteksi Radiasi terhadap anggota masyarakat di sekitar tapak Reaktor Daya untuk kondisi Operasi dan selama proses Dekomisioning sebagaimana dimaksud dalam Pasal 75 ayat (1) huruf a dan huruf b harus mencakup penerapan Fitur Desain untuk tindakan perancangan:

- a. penerapan perisai radiasi.
- b. pelepasan radionuklida; dan
- c. minimalisasi lepasan limbah radioaktif.

Pasal 77

- (1) Fitur Desain untuk perancangan penerapan perisai radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 76 huruf a harus mampu melindungi anggota masyarakat akibat paparan langsung maupun hamburan dari instalasi Reaktor Daya.
- (2) Untuk memastikan perlindungan kepada anggota masyarakat sebagaimana dimaksud pada ayat (1), instalasi maupun tapak Reaktor Daya harus dilengkapi dengan pagar pembatas yang memadai untuk mencegah pihak yang tidak berkepentingan memasuki kawasan tapak.
- (3) Tindakan pemagaran sebagaimana dimaksud pada ayat (2) harus dilengkapi dengan pemasangan papan peringatan, paling sedikit berisi:
 - a. tanda bahaya radiasi; dan
 - b. informasi pendukung yang memadai.

Pasal 78

- (1) Fitur Desain untuk perancangan pelepasan radionuklida sebagaimana dimaksud dalam Pasal 76 huruf b harus menjamin diterapkannya prinsip optimisasi untuk memastikan Dosis Target Desain untuk anggota masyarakat tidak terlampaui.
- (2) Perancangan pelepasan radionuklida sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus didasarkan pada kajian keselamatan radiasi dan lingkungan hidup yang paling sedikit mencakup:
 - a. identifikasi suku sumber lepasan;
 - b. data dan informasi yang memadai mengenai:
 1. kondisi topografi;
 2. kondisi meteorologi dan klimatologi;
 3. kondisi demografi; dan
 4. tata guna lahan dan ruang;
 - c. identifikasi jalur paparan dan kelompok masyarakat kritis.

- (3) Kajian keselamatan radiasi sebagaimana dimaksud pada ayat (2) harus dilengkapi dengan simulasi pemodelan pelepasan radionuklida menggunakan perangkat lunak berbasis komputer dan mempertimbangkan pengalaman operasi Reaktor Daya serupa.
- (4) Hasil kajian keselamatan radiasi sebagaimana dimaksud pada ayat (2) dan pemodelan pelepasan radionuklida sebagaimana dimaksud pada ayat (3) harus dipastikan tidak melampaui nilai batas lepasan radioaktivitas ke lingkungan dan baku tingkat radioaktivitas di lingkungan yang telah ditetapkan.
- (5) Ketentuan mengenai nilai batas lepasan radioaktivitas ke lingkungan dan baku tingkat radioaktivitas di lingkungan sebagaimana dimaksud pada ayat (4) diatur dalam Peraturan Badan tersendiri.

Pasal 79

- (1) Fitur Desain untuk perancangan minimalisasi lepasan limbah radioaktif sebagaimana dimaksud dalam Pasal 76 huruf c harus mengutamakan penanganan dan pengolahan limbah cair dan gas sebelum dilepas ke lingkungan hidup.
- (2) Minimalisasi lepasan limbah radioaktif ke lingkungan hidup sebagaimana dimaksud pada ayat (1) diterapkan dengan perancangan:
 - a. sistem pengolahan limbah cair; dan
 - b. sistem penampungan dan pengolahan gas.

Pasal 80

- (1) Rancangan sistem pengolahan limbah cair sebagaimana dimaksud dalam Pasal 79 ayat (2) huruf a harus diterapkan terhadap sumber utama air terkontaminasi, meliputi:
 - a. air bekas pendingin primer maupun sekunder;
 - b. air bocoran dari sistem pendingin primer maupun sekunder;
 - c. air tampungan dari fasilitas dekontaminasi;

- d. air bekas untuk pembersihan filter dan penukar ion;
 - e. air tampungan dari fasilitas cucian dan kamar ganti; dan
 - f. air tampungan dari laboratorium kimia.
- (2) Sumber utama air terkontaminasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus diminimalisasi dengan cara paling sedikit:
- a. mendesain saluran yang berisi cairan radioaktif secara cermat untuk menghindari kebocoran; dan
 - b. meminimalisasi potensi terjadinya kontaminasi.
- (3) Sistem pengolahan limbah cair dalam rangka mereduksi kontaminasi radioaktif sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dapat menerapkan metode paling sedikit:
- a. filtrasi mekanik;
 - b. penukaran ion;
 - c. sentrifugasi; dan/atau
 - d. distilasi dan pengendapan kimia.

Pasal 81

- (1) Rancangan sistem penampungan dan pengolahan gas sebagaimana dimaksud dalam Pasal 79 ayat (2) huruf b harus mempertimbangkan keberadaan:
- a. gas mulia yang mengandung radionuklida waktu paruh pendek;
 - b. gas mulia yang mengandung radionuklida waktu paruh panjang;
 - c. isotop yodium; dan
 - d. partikulat.
- (2) Gas mulia yang mengandung radionuklida waktu paruh pendek sebagaimana dimaksud pada ayat (1) huruf a harus ditampung pada tangki atau pipa khusus berisi tumpukan karbon untuk penundaan sebelum pelepasan.
- (3) Gas mulia yang mengandung radionuklida waktu paruh panjang sebagaimana dimaksud pada ayat (1) huruf b dapat dihilangkan dengan menggunakan peralatan kriogenik dengan pemilihan dan desain yang sesuai.

- (4) Keberadaan isotop yodium sebagaimana dimaksud pada ayat (1) huruf c harus dihilangkan dengan menggunakan filter karbon aktif yang dirancang tetap memiliki efisiensi tinggi sepanjang umur instalasi Reaktor Daya.

Pasal 82

- (1) Aliran dan konsentrasi aktivitas limbah cair dan gas harus senantiasa dipantau dan dikendalikan untuk memastikan nilai batas lepasan ke lingkungan hidup dan baku tingkat radioaktivitas di lingkungan, atau tingkat klierens tidak terlampaui.
- (2) Ketentuan mengenai tingkat klierens sebagaimana dimaksud pada ayat (1) diatur dalam Peraturan Badan tersendiri.

Bagian Ketiga

Proteksi Radiasi terhadap Anggota Masyarakat di Sekitar Tapak Reaktor Daya untuk Kondisi Kecelakaan Nuklir

Pasal 83

Proteksi Radiasi terhadap anggota masyarakat di sekitar tapak Reaktor Daya untuk kondisi apabila terjadi Kecelakaan Nuklir sebagaimana dimaksud dalam Pasal 75 ayat (1) huruf c harus mencakup penerapan Fitur Desain untuk tindakan antisipasi terhadap:

- a. Kecelakaan Dasar Desain; dan
- b. Kecelakaan Parah.

Pasal 84

- (1) Tindakan antisipasi terhadap Kecelakaan Dasar Desain sebagaimana dimaksud dalam Pasal 83 huruf a harus berkesesuaian dengan target desain yang didasarkan pada hasil analisis keselamatan.
- (2) Dalam hal hasil analisis keselamatan sebagaimana dimaksud pada ayat (1) tidak memenuhi target desain yang ditetapkan, Fitur Desain keselamatan khusus harus ditambahkan ke dalam desain awal.

Pasal 85

- (1) Analisis keselamatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 84 harus memperhitungkan potensi pelepasan material radioaktif ke atmosfer dan badan air.
- (2) Perhitungan potensi pelepasan material radioaktif ke atmosfer sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus mengambil asumsi situasi cuaca yang tidak menguntungkan di sekitar tapak, baik selama maupun sesudah Kecelakaan Nuklir terjadi.
- (3) Situasi cuaca yang tidak menguntungkan sebagaimana dimaksud pada ayat (2) paling sedikit meliputi:
 - a. kondisi kecepatan angin ekstrem; dan
 - b. kondisi curah hujan ekstrem.
- (4) Asumsi situasi cuaca sebagaimana dimaksud pada ayat (2) dan ayat (3) harus berkesesuaian dengan kondisi cuaca dan lingkungan di sekitar tapak selama kurun waktu paling sedikit 1 (satu) tahun dan mendapat persetujuan dari Kepala Badan.

Pasal 86

- (1) Berdasarkan perhitungan potensi pelepasan material radioaktif ke atmosfer sebagaimana dimaksud dalam Pasal 85, harus dikembangkan metodologi untuk perhitungan perkiraan penerimaan dosis oleh kelompok masyarakat kritis.
- (2) Perkiraan penerimaan dosis oleh kelompok masyarakat kritis sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus didasarkan kepada asumsi konservatif yang berkaitan dengan durasi paparan, kondisi cuaca, perisai radiasi, dan posisi keberadaan kelompok masyarakat kritis pada saat Kecelakaan Nuklir.
- (3) Hasil perkiraan penerimaan dosis oleh kelompok masyarakat kritis sebagaimana dimaksud pada ayat (2) harus menunjukkan kesesuaian dengan Dosis Target Desain yang ditetapkan.

Pasal 87

Untuk menentukan atau memodifikasi tindakan perlindungan yang mendesak terhadap dampak adanya lepasan zat radioaktif, harus dilakukan pengukuran tingkat kontaminasi, pelepasan zat radioaktif, dan perkiraan penerimaan dosis oleh kelompok masyarakat kritis di luar tapak, meliputi:

- a. zona tindakan pencegahan; dan
- b. zona perencanaan tindakan perlindungan mendesak.

Pasal 88

- (1) Tindakan antisipasi terhadap Kecelakaan Parah sebagaimana dimaksud dalam Pasal 83 huruf b harus berkesesuaian dengan target desain yang didasarkan pada hasil analisis keselamatan spesifik.
- (2) Analisis keselamatan spesifik sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus diperhitungkan berdasarkan metode estimasi terbaik, baik untuk konsekuensi jangka pendek maupun jangka panjang.
- (3) Dalam perhitungan keselamatan spesifik sebagaimana dimaksud pada ayat (2), simulasi pemrograman dispersi secara probabilistik dapat digunakan untuk mengevaluasi dampak risiko terhadap kelompok masyarakat kritis.

Pasal 89

Fitur Desain yang dapat diterapkan untuk mencapai pengurangan dampak radiologi terhadap anggota masyarakat di sekitar tapak instalasi Reaktor Daya akibat pelepasan zat radioaktif meliputi :

- a. pencegahan kebocoran dan isolasi pengungkung;
- b. penyaringan udara buang untuk pengurangan lepasan radioaktif udara;
- c. penerapan filter dengan faktor dekontaminasi tinggi berdasarkan pengalaman desain, pemilihan bahan, dan ukuran yang terbaik;
- d. menggunakan sistem semprot (*spray*) di dalam pengungkung untuk mengurangi tekanan, temperatur, dan produk fisi yang lepas keluar pengungkung;

- e. pemasangan perisai radiasi pada posisi di mana zat radioaktif terlepas ke pengungkung atau ke bangunan yang menyebabkan paparan radiasi melebihi batas yang ditetapkan;
- f. pemasangan lapisan selimut bangunan pengungkung, atau pengurangan laju aliran buangan udara untuk memungkinkan terjadinya peluruhan di dalam bangunan;
- g. penerapan penurunan laju atau pengaturan katup aliran lepasan;
- h. memastikan efektivitas sistem penyemprotan cairan kimia yang sesuai untuk memerangkap yodium atau dengan penambahan bahan kimia tertentu ke dalam teras; dan/atau
- i. mendefinisikan zona eksklusif pada tahap desain untuk pencegahan akses anggota masyarakat yang tidak berkepentingan.

Pasal 90

Fitur Desain yang berkaitan dengan keselamatan berdasarkan analisis keselamatan probabilistik harus dipertimbangkan pada desain, yaitu paling sedikit:

- a. pengembangan atau peningkatan sistem keselamatan, proteksi, dan instrumentasi untuk menekan kegagalan fungsi dan kesalahan operator yang berpotensi menyebabkan timbulnya Kecelakaan Parah; dan
- b. kepastian ketersediaan daya untuk perlengkapan, instrumentasi, peralatan kesehatan, dan sistem proteksi yang penting.

Pasal 91

- (1) Pemegang izin wajib merekam dan menyimpan informasi yang relevan selama dan sesudah Kecelakaan Nuklir.
- (2) Informasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus dapat digunakan:
 - a. selama keadaan darurat;
 - b. untuk evaluasi setelah kedaruratan;
 - c. untuk pemantauan kesehatan jangka panjang; dan

- d. untuk tindak lanjut evaluasi petugas kedaruratan dan anggota masyarakat yang berpotensi terkena dampak.

BAB V

PEMANTAUAN RADIASI DAN KONTAMINASI

Bagian Kesatu

Umum

Pasal 92

- (1) Pemantauan radiasi dan kontaminasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 ayat (1) huruf d harus dipastikan dengan penerapan Fitur Desain untuk tindakan perancangan pemantauan radiasi dan kontaminasi:
 - a. untuk kondisi Operasi;
 - b. selama proses Dekomisioning; dan
 - c. untuk kondisi apabila terjadi Kecelakaan Nuklir.
- (2) Kondisi Operasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) huruf a meliputi:
 - a. kondisi operasi normal; dan
 - b. kondisi operasi abnormal.

Bagian Kedua

Pemantauan Radiasi dan Kontaminasi untuk Kondisi Operasi dan selama Proses Dekomisioning

Paragraf 1

Umum

Pasal 93

- Pemantauan radiasi dan kontaminasi untuk kondisi Operasi dan selama proses Dekomisioning sebagaimana dimaksud dalam Pasal 92 ayat (1) huruf a dan huruf b meliputi:
- a. pemantauan personel;
 - b. pemantauan daerah kerja; dan
 - c. pemantauan lingkungan hidup.

Paragraf 2
Pemantauan Personel

Pasal 94

- (1) Pemantauan personel sebagaimana dimaksud dalam Pasal 93 huruf a harus dilakukan dengan peralatan untuk memantau dosis individu setiap pekerja radiasi, mencakup sarana dan prasarana yang diperlukan untuk mengukur, mengevaluasi, dan mencatat dosis yang diterima.
- (2) Peralatan pemantau dosis individu sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus telah terkalibrasi di laboratorium dosimetri yang telah terakreditasi dan dapat berupa:
 - a. *thermoluminisense dosimeter (TLD) badge*;
 - b. *film badge*;
 - c. *radiophotoluminisense dosimeter badge*;
 - d. dosimeter pembacaan langsung; atau
 - e. peralatan pemantau dosis individu lain yang terkalibrasi di laboratorium dosimetri terakreditasi.
- (3) Penggunaan peralatan pemantau dosis individu sebagaimana dimaksud pada ayat (2) harus mempertimbangkan beberapa faktor, paling sedikit:
 - a. kualifikasi personel;
 - b. zonasi daerah kerja; dan
 - c. kebutuhan pekerjaan.

Paragraf 3
Pemantauan Daerah Kerja

Pasal 95

- (1) Pemantauan daerah kerja sebagaimana dimaksud dalam Pasal 93 huruf b harus dilakukan melalui pengukuran terhadap:
 - a. laju paparan radiasi;
 - b. tingkat kontaminasi permukaan; dan
 - c. tingkat kontaminasi udara.

- (2) Peralatan pengukuran sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dapat berupa peralatan ukur terpasang tetap maupun portabel.

Pasal 96

Untuk daerah pengendalian, peralatan pemantau daerah kerja sebagaimana dimaksud dalam Pasal 95 harus dapat dioperasikan secara terus-menerus, serta dilengkapi dengan penampil hasil pembacaan yang dapat dibaca dengan mudah dan alarm peringatan yang sesuai.

Pasal 97

Untuk daerah kerja dengan laju paparan radiasi tinggi dan fluktuatif, selain peralatan pengukuran terpasang tetap, harus ditambahkan peralatan pengukuran portabel tambahan yang dilengkapi alarm peringatan yang sesuai.

Pasal 98

- (1) Untuk Reaktor Daya berpendingin air ringan (*light water reactor/LWR*), Fitur Desain sistem pemantauan paparan radiasi eksternal harus dipasang paling sedikit pada:
- a. pengungkung reaktor;
 - b. ruangan pengisian bahan bakar nuklir;
 - c. fasilitas penyimpanan bahan bakar nuklir bekas;
 - d. fasilitas pengolahan dan penyimpanan limbah radioaktif;
 - e. fasilitas dekontaminasi; dan
 - f. jalur pemindahan bahan bakar dan limbah radioaktif.
- (2) Untuk Reaktor Daya jenis reaktor air didih (*boiling water reactor/BWR*), selain dipasang pada lokasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1), Fitur Desain sistem pemantauan paparan radiasi eksternal juga harus dipasang pada turbin.
- (3) Untuk Reaktor Daya jenis lain, Fitur Desain sistem pemantau paparan radiasi eksternal yang serupa sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus dipasang pada lokasi yang sesuai.

Pasal 99

- (1) Alat pemantau terpasang permanen untuk mendeteksi tingkat kontaminasi udara sebagaimana dimaksud dalam Pasal 95 ayat (1) huruf c harus dipasang pada lokasi yang sesuai di dalam instalasi Reaktor Daya.
- (2) Untuk Reaktor Daya berpendingin air ringan, Fitur Desain sistem pemantauan tingkat kontaminasi udara harus dipasang pada saluran ventilasi untuk pembuangan udara paling sedikit pada:
 - a. pengungkung;
 - b. fasilitas penyimpanan bahan bakar bekas;
 - c. bangunan fasilitas bantu (*auxiliary building*); dan
 - d. fasilitas pengolahan dan penyimpanan limbah radioaktif.
- (4) Untuk Reaktor Daya jenis air didih, selain dipasang pada lokasi sebagaimana dimaksud pada ayat (2), Fitur Desain sistem pemantauan tingkat kontaminasi udara juga harus dipasang pada turbin.
- (5) Untuk Reaktor Daya jenis lain, fitur desain sistem pemantauan tingkat kontaminasi udara yang serupa sebagaimana dimaksud pada ayat (2) harus dipasang pada lokasi yang sesuai.

Paragraf 4

Pemantauan Lingkungan Hidup

Pasal 100

Pemantauan lingkungan hidup sebagaimana dimaksud dalam Pasal 93 huruf c harus dilakukan melalui pengukuran terhadap:

- a. pelepasan efluen dari instalasi Reaktor Daya;
- b. pemantauan di dalam kawasan tapak; dan
- c. pemantauan di luar kawasan tapak.

Pasal 101

- (1) Pemantauan terhadap pelepasan efluen dari instalasi Reaktor Daya berpendingin air harus dirancang dan diterapkan paling sedikit pada sistem:
 - a. buangan gas (*off-gas*);
 - b. *vent header* tangki penampungan limbah radioaktif; dan
 - c. ventilasi bangunan yang berpotensi terjadi kontaminasi radioaktif.
- (2) Untuk instalasi Reaktor Daya siklus langsung, harus dirancang dan diterapkan pemantauan terhadap sistem pembuangan udara kondensor.
- (3) Untuk instalasi Reaktor Daya berpendingin gas, harus dirancang dan diterapkan pengambilan sampel dan pemantauan semua pembuangan pendingin selama pengoperasian.

Pasal 102

- (1) Peralatan untuk pemantauan terhadap pelepasan efluen dari instalasi Reaktor Daya sebagaimana dimaksud dalam Pasal 100 huruf a harus dirancang untuk menentukan aktivitas total dan komposisi nuklida lepasan.
- (2) Pemantauan terhadap pelepasan efluen sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dapat dirancang dengan penerapan system dalam jaringan (*on-line*) dan analisis laboratorium.

Pasal 103

- (1) Fitur Desain untuk pemantauan di dalam dan di luar kawasan tapak instalasi Reaktor Daya sebagaimana dimaksud dalam Pasal 100 huruf b dan huruf c harus mempertimbangkan parameter paling sedikit:
 - a. suku sumber secara total;
 - b. titik-titik lepasan yang penting;
 - c. mekanisme proses pelepasan radionuklida ke luar instalasi Reaktor Daya;
 - d. kondisi lingkungan hidup, meliputi:

1. data topografi;
 2. data penggunaan lahan sesuai dengan tata ruang dan tata wilayah yang ditetapkan;
 3. data demografi teraktual; dan
 4. data meteorologi dan klimatologi yang memadai.
- e. hasil perhitungan dispersi atmosfer dan hidrosfer.
- (2) Fitur Desain untuk pemantauan di dalam dan di luar kawasan tapak sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus dirancang berdasarkan analisis keselamatan radiasi yang memadai.
- (3) Analisis keselamatan radiasi sebagaimana dimaksud pada ayat (2) harus dilengkapi dengan perhitungan menggunakan simulasi kode pemrograman komputer yang sesuai dan tervalidasi.

Paragraf 5

Sistem Pemantauan Radiasi dan Kontaminasi

Pasal 104

Pemilihan perangkat pemantauan radiasi dan kontaminasi harus mempertimbangkan spesifikasi teknis dan karakteristik peralatan sebagai berikut:

- a. radionuklida yang akan dipantau;
- b. rentang laju dosis atau konsentrasi aktivitas;
- c. sensitivitas;
- d. catu daya utama dan cadangan;
- e. alarm ambang batas;
- f. kondisi lingkungan;
- g. kemudahan untuk pengujian, kalibrasi, dan perawatan;
- h. keandalan alat, termasuk dalam situasi abnormal;
- i. respons terhadap kondisi berlebih;
- j. indikasi mode kegagalan; dan/atau
- k. potensi interferensi data, khususnya untuk pemantauan neutron, tritium, dan sumber radiasi beta.

Pasal 105

- (1) Sistem pengukuran dalam rangka pemantauan radiasi dan kontaminasi harus dirancang untuk mempertahankan kemampuan pengoperasian pada kondisi lingkungan tertentu.
- (2) Kondisi lingkungan tertentu sebagaimana dimaksud pada ayat (1), meliputi:
 - a. temperatur;
 - b. tekanan;
 - c. kelembapan;
 - d. getaran; dan
 - e. medan radiasi latar.

Pasal 106

- (1) Sistem pengukuran sebagaimana dimaksud dalam Pasal 105 ayat (1) harus didukung rancangan sistem pengelolaan data dan informasi hasil pengukuran yang sesuai.
- (2) Sistem pengelolaan data dan informasi hasil pengukuran sebagaimana dimaksud pada ayat (1), terdiri atas:
 - a. sistem pengolahan;
 - b. sistem penyimpanan;
 - c. sistem penampil; dan
 - d. sistem perekaman.
- (3) Sistem penampil data dan informasi hasil pengukuran sebagaimana dimaksud pada ayat (2) huruf c harus ditempatkan sesuai kebutuhan, paling sedikit pada:
 - a. ruang kendali utama;
 - b. ruang fisika kesehatan;
 - c. lokasi titik kendali lokal; dan
 - d. sistem informasi komputer instalasi.

Bagian Ketiga
Pemantauan Radiasi dan Kontaminasi untuk Kondisi Apabila
Terjadi Kecelakaan Nuklir

Pasal 107

- (1) Pemantauan radiasi dan kontaminasi untuk kondisi apabila terjadi Kecelakaan Nuklir sebagaimana dimaksud dalam Pasal 92 ayat (1) huruf c harus dapat diterapkan pada kondisi kejadian:
 - a. Kecelakaan Dasar Desain; dan
 - b. Kecelakaan Parah.
- (2) Sistem pemantauan radiasi dan kontaminasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus dirancang untuk mengukur, mendeteksi, menilai, dan menentukan:
 - a. kondisi abnormal pada instalasi Reaktor Daya;
 - b. paparan radiasi dan pelepasan radioaktif yang terjadi;
 - c. laju paparan radiasi dan tingkat kontaminasi yang terjadi di dalam instalasi Reaktor Daya; dan
 - d. laju paparan radiasi dan tingkat kontaminasi yang terjadi di luar instalasi, baik di dalam maupun luar kawasan tapak.

Pasal 108

- (1) Fitur Desain instalasi Reaktor Daya harus mempertimbangkan perlindungan untuk setiap sistem pemantau radiasi dan kontaminasi terhadap kondisi lingkungan pada saat maupun setelah terjadi kecelakaan, meliputi pengaruh atau perubahan:
 - a. temperatur;
 - b. tekanan;
 - c. kelembapan;
 - d. getaran;
 - e. medan radiasi ambien di sekitar peralatan; dan
 - f. rentang dan skala pengukuran.
- (2) Fitur Desain sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus menerapkan ketersediaan akses terhadap peralatan

untuk mengukur dan/atau menampilkan data dan informasi hasil pemantauan radiasi dan kontaminasi.

Pasal 109

- (1) Data dan informasi hasil pemantauan radiasi dan kontaminasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 108 ayat (2) harus tersedia atau dapat ditampilkan di ruang kendali utama dan ruang kendali darurat.
- (2) Data dan informasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) selanjutnya menjadi dasar tindakan untuk:
 - a. aksi mitigasi oleh personel di dalam instalasi Reaktor Daya;
 - b. penentuan klasifikasi tingkat kedaruratan;
 - c. perlindungan personel dan instalasi Reaktor Daya; dan
 - d. rekomendasi tindakan perlindungan anggota masyarakat di luar instalasi Reaktor Daya.

Pasal 110

- (1) Sistem komunikasi data dan informasi hasil pemantauan radiasi dan kontaminasi dari ruang kendali utama dan ruang kendali darurat sebagaimana dimaksud dalam Pasal 109 ayat (1) harus dirancang untuk menyampaikan informasi dan petunjuk yang akan dikirimkan antar lokasi di dalam instalasi Reaktor Daya maupun untuk tujuan komunikasi eksternal dengan pemangku kepentingan lain di luar instalasi atau kawasan tapak Reaktor Daya.
- (2) Fitur Desain sistem komunikasi data dan informasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus dirancang untuk keperluan transfer data dan informasi yang relevan ke pusat tanggap darurat.

Pasal 111

- (1) Fitur Desain pengukuran radiasi dan kontaminasi yang bekerja secara otomatis dan *real-time* harus dipasang pada suatu lokasi yang tepat di dekat instalasi Reaktor

Daya untuk mengetahui data dan informasi lingkungan terkini.

- (2) Data dan informasi hasil pengukuran sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus dipantau oleh operator dan satuan tanggap darurat.

BAB VI FASILITAS BANTU

Pasal 112

- (1) Fasilitas bantu sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 ayat (1) huruf e harus menjadi bagian dari Fitur Desain Reaktor Daya yang direncanakan sejak awal.
- (2) Fasilitas bantu sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus mendukung Fitur Desain Reaktor Daya dalam rangka:
 - a. pengendalian radiologi yang efektif pada saat pengoperasian dan perawatan instalasi;
 - b. pencegahan atau pembatasan penyebaran kontaminasi di dalam dan di luar daerah pengendalian;
 - c. pengawasan yang memadai terhadap daerah kerja dan pekerja di dalamnya;
 - d. penyediaan peralatan pelindung yang diperlukan oleh pekerja;
 - e. pelaksanaan pengaturan operasional untuk tujuan fisika kesehatan; dan
 - f. pelaksanaan respons terhadap insiden atau keadaan darurat yang timbul, seperti infrastruktur penunjang evakuasi dan distribusi yodium.
- (3) Keberadaan fasilitas bantu sebagaimana dimaksud pada ayat (2) dapat disesuaikan dengan kebutuhan pada suatu area tapak Reaktor Daya guna mengoptimalkan efisiensi dan efektivitas penggunaan.

Pasal 113

Fitur Desain fasilitas bantu pada Reaktor Daya sebagaimana dimaksud dalam Pasal 112 paling kurang meliputi:

- a. ruang operasi fisika kesehatan, termasuk fasilitas uji dan kalibrasi peralatan deteksi dan perlindungan radiasi;
- b. ruang ganti pakaian pelindung;
- c. ruang penampungan benda atau peralatan terkontaminasi;
- d. fasilitas dekontaminasi untuk pekerja dan benda atau peralatan pendukung;
- e. fasilitas cuci untuk pakaian terkontaminasi;
- f. fasilitas pengumpulan, pengolahan, pengondisian, dan/atau penyimpanan limbah radioaktif;
- g. ruang penyimpanan sumber radioaktif penunjang;
- h. ruang pertolongan pertama pada kecelakaan;
- i. ruang tanggap darurat untuk penanganan insiden atau kecelakaan;
- j. laboratorium radiokimia;
- k. laboratorium kendali dosimetri; dan
- l. daerah untuk berkumpul dalam situasi kedaruratan.

Pasal 114

- (1) Fitur Desain fasilitas bantu sebagaimana dimaksud dalam Pasal 113 harus dapat mengakomodasi kebutuhan penyediaan, penyimpanan, dan/atau penggunaan peralatan pendukung lainnya.
- (2) Peralatan pendukung lainnya sebagaimana dimaksud pada ayat (1) meliputi:
 - a. perlengkapan pelindung pekerja;
 - b. peralatan pengambilan sampel dan pengukur konsentrasi radioaktivitas udara;
 - c. peralatan pengukur laju paparan radiasi dan tingkat kontaminasi;
 - d. perlengkapan tanda, rambu, simbol, dan/atau barikade untuk pengaturan atau pembatasan akses daerah kerja;
 - e. peralatan komunikasi;
 - f. instrumen meteorologi;

- g. wadah penampungan sementara limbah radioaktif padat dan cair;
- h. peralatan penanggulangan kedaruratan; dan
- i. perlengkapan pertolongan pertama pada kecelakaan.

BAB VIII
KETENTUAN PENUTUP

Pasal 115

Peraturan Badan ini mulai berlaku pada tanggal diundangkan.

Agar setiap orang mengetahuinya, memerintahkan pengundangan Peraturan Badan ini dengan penempatannya dalam Berita Negara Republik Indonesia.

Ditetapkan di Jakarta
pada tanggal 7 Februari 2020

KEPALA BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR
REPUBLIK INDONESIA,

JAZI EKO ISTIYANTO

Diundangkan di Jakarta
pada tanggal 12 Feb 2020

DIREKTUR JENDERAL
PERATURAN PERUNDANG-UNDANGAN
KEMENTERIAN HUKUM DAN HAK ASASI MANUSIA
REPUBLIK INDONESIA,

WIDODO EKATJAHJANA

BERITA NEGARA REPUBLIK INDONESIA TAHUN 2020 NOMOR 121

LAMPIRAN I
PERATURAN BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR
NOMOR 1 TAHUN 2020
TENTANG
ASPEK PROTEKSI RADIASI DALAM DESAIN
REAKTOR DAYA

**SUMBER RADIASI YANG HARUS DIPERHATIKAN DALAM KONDISI
OPERASI DAN SELAMA PROSES DEKOMISIONING**

Dalam konteks sumber radiasi, penting untuk memahami bahwa sumber radiasi utama untuk suatu kondisi operasi tertentu dapat menjadi tidak signifikan untuk kondisi operasi yang berbeda. Beberapa radionuklida yang kurang penting untuk pertimbangan laju dosis selama kondisi operasi menjadi sangat penting selama proses dekomisioning.

I.1 TERAS REAKTOR DAN BEJANA TEKAN

Selama operasi reaktor daya, produk fisi dan aktinida diproduksi sebagai hasil proses fisi yang terjadi. Radioisotop yang paling signifikan dalam memberikan dosis untuk personel dan anggota masyarakat berupa isotop gas mulia, yodium, dan sesium. Isotop lain seperti stronsium dan plutonium juga perlu mendapat perhatian. Dalam kondisi kecelakaan parah, ragam radioisotop yang lebih banyak harus dipertimbangkan.

Pada saat reaktor daya beroperasi, elemen bahan bakar memancarkan neutron dan sinar gama sebagai akibat proses fisi dan peluruhan produk fisi. Sinar gama juga dipancarkan sebagai hasil tangkapan neutron di dalam teras reaktor dan material di sekitarnya. Apabila bahan pendingin reaktor mengandung oksigen, sumber isotop utama lain selama operasi adalah nitrogen-16 (N-16), yang terbentuk akibat interaksi antar neutron cepat dengan oksigen-16 (O-16) yang ada di dalam pendingin tersebut. Untuk reaktor dengan moderator air berat, fotoneutron dipancarkan dari interaksi sinar gama dengan deuterium.

Bentuk radiasi lain, seperti partikel beta dan positron, dipancarkan dari teras reaktor dan daerah bejana tekan selama operasi reaktor daya. Namun mengingat daya tembus kedua partikel tersebut terbatas, kedua partikel tersebut tidak terlalu penting untuk tujuan proteksi radiasi.

Neutron dan sinar gama yang dipancarkan dari teras reaktor merepresentasikan sumber radiasi yang sangat kuat. Sisa fluks neutron di luar perisai utama adalah sumber aktivasi terhadap material struktural. Material struktural yang teraktivasi tersebut dapat menyebabkan peningkatan sumber radiasi tambahan dengan laju dosis signifikan selama periode pemadaman (*shut down*) dan akan menjadi sumber radiasi utama selama kegiatan dekomisioning.

Keberadaan jalur langsung yang menembus perisai radiasi (misalnya celah atau lubang) akan menyebabkan neutron atau sinar gama melewatinya (*streaming*) dengan sedikit atau tanpa atenuasi sama sekali. Fenomena tersebut akan menaikkan laju dosis, bahkan pada jarak yang cukup jauh dari teras reaktor.

Untuk reaktor pembiak cepat dengan pendingin natrium, dengan pompa pendingin dan generator uap berada di dalam bejana tekan, pendingin sekunder dan bahan struktur komponen menjadi aktif. Radionuklida yang paling penting dalam hal ini adalah natrium-22 (Na-22), natrium-24 (Na-24), mangan-54 (Mn-54), kobalt-58 (Co-58), kobalt-60 (Co-60), dan besi-59 (Fe-59).

Dalam hal akses ke gedung reaktor diizinkan selama operasi reaktor, sumber-sumber radiasi lain, termasuk argon-41 (Ar-41), udara terkontaminasi tritium-3 (H-3), produk fisi yang volatil, dan gas mulia harus mendapatkan perhatian. Di dalam reaktor teknologi air bertekanan (*pressurized water reactor/PWR*), aktivasi terhadap argon-40 (Ar-40) yang terkandung di udara menghasilkan sumber Ar-41 yang merupakan sumber radiasi pemancar gama. Meskipun laju dosis dari paparan eksternal rendah, namun keberadaan Ar-41 tidak mungkin diabaikan apabila target laju dosis individual yang ditetapkan kurang dari 10 $\mu\text{Sv/jam}$. Ar-41 juga diproduksi dalam pendingin karbondioksida (CO_2) pada reaktor berpendingin gas atau air berat yang mengandung gas helium, seperti pada sistem kontrol zona cair dan sistem gas penutup moderator. H-3 juga merupakan sumber radiasi yang sangat penting yang berasal dari kontaminasi udara pada reaktor berpendingin air berat, maupun di dalam gedung bahan bakar reaktor berpendingin air ringan.

Selama kondisi reaktor padam, sumber radiasi utama di sekitar bejana tekan adalah radiasi gama dari produk fisi dan produk aktivasi yang dihasilkan. Radiasi yang signifikan berada di bejana tekan, bagian logam isolasi, dan pada material yang terpapar fluks neutron untuk jangka waktu

yang cukup lama. Untuk reaktor berpendingin air berat, neutron yang timbul dari pelipatan populasi pada saat kondisi subkritis dari sumber fotoneutron akan menaikkan daya yang cukup signifikan dengan pancaran radiasi gama selama hingga 24 jam.

Untuk reaktor berpendingin air ringan, produksi aktivasi utamanya timbul pada bahan struktur perangkat bahan bakar nuklir (termasuk kelongsong), batang kendali, batang sumber neutron primer dan sekunder, pada struktur internal bejana tekan, pada pendingin berikut pengotor-pengotornya, serta di dalam perisai utama.

Untuk reaktor berpendingin gas, produk aktivasi utama timbul pada selongsong batang bahan bakar nuklir dan bahan perisai bejana tekan (yaitu antara inti teras reaktor dan sistem penukar panas, juga di atas dan bawah teras reaktor), pada tanki penahan, serta dalam batas tertentu pada fluida penukar panas itu sendiri.

Untuk reaktor berpendingin air berat bertekanan (*pressurized heavy water reaktor/PHWR*), produk aktivasi dimungkinkan timbul pada kelongsong pin bahan bakar, tabung tekan, tabung kalandria, tabung kendali, tanki kalandria, dan tanki perisai.

I.2 SISTEM PENDINGIN REAKTOR DAN FLUIDA MODERATOR

Untuk bahan pendingin yang mengandung oksigen (seperti pada reaktor perpendingin air ringan, air berat, atau CO₂), sumber utama radiasi selama operasi reaktor adalah N-16. N-16 dihasilkan dari interaksi antara neutron cepat dengan O-16 dalam pendingin yang melewati teras reaktor. N-16 merupakan radionuklida pemancar gama yang kuat dengan energi antara 6 hingga 7 MeV. Dikarenakan N-16 memiliki waktu paruh pendek (7,1 detik), signifikansi nuklida tersebut akan berkurang seiring waktu transportasi antara teras reaktor dan komponen lain dalam sistem pendingin yang lama dibandingkan dengan waktu paruhnya. Dalam kasus tersebut, produk aktivasi lain dari pendingin (seperti Ar-41 untuk reaktor berpendingin gas, Oksigen-19 (O-19) dan Fluor-18 (F-18) untuk reaktor berpendingin air) dapat menjadi kontributor yang paling penting terhadap laju dosis radiasi. Untuk reaktor berteknologi PWR yang memiliki waktu pendinginan untuk melintasi satu siklus sama besarnya dengan waktu paruh N-16, maka isotop N-16 menjadi kontributor utama terhadap laju dosis di sekitar sirkuit utama selama masa operasi reaktor.

Dalam reaktor berpendingin air (terutama air berat), H-3 merupakan sumber penting terhadap paparan radiasi internal. Dalam reaktor perpendingin air ringan (*light water reactor/LWR*), H-3 menjadi sumber radiasi yang sangat penting di dalam limbah cair dan gas yang dilepaskan ke lingkungan hidup. Hal tersebut berkenaan dengan belum adanya metode yang efektif dan murah untuk menghilangkan H-3 dari aliran limbah hingga saat ini.

Produk fisi yang terlepas dari pin bahan bakar dengan kelongsong yang cacat merupakan sumber radiasi dalam sistem pendingin reaktor. Aktivitas sumber tersebut tergantung pada sejumlah parameter, meliputi jumlah dan ukuran cacat kelongsong, kekuatan lokal di sekitar cacat, *burn up* bahan bakar, dan lain-lain. Pemasangan kisi penyaringan di bagian bawah perangkat bahan bakar nuklir akan mengurangi terjadinya debris atau interaksi benda-benda kecil yang bermigrasi dalam aliran fluida pendingin akan menurunkan timbulnya cacat kelongsong pada masa operasi reaktor.

Sisa kontaminasi uranium pada permukaan kelongsong bahan bakar nuklir ketika proses pabrikasi berlangsung maupun kandungan uranium pada bahan kelongsong akan menjadi produk fisi yang dapat terlarut dalam sistem pendingin. Untuk meminimalisasi hal tersebut, batas kontaminasi uranium pada bahan atau permukaan kelongsong bahan bakar perlu ditetapkan.

Selama pelaksanaan kegiatan pemeliharaan dan perbaikan, produk korosi teraktivasi, seperti Co-60, Co-58, Mn-54, F-59e, dan kromium-51 (Cr-51) merupakan kontributor utama terhadap laju dosis radiasi. Radionuklida-radionuklida tersebut hadir sebagai deposit pada semua komponen maupun pipa-pipa dalam sirkuit pendingin primer dan sirkuit lain yang terhubung. Produk fisi seperti yodium-131 (I-131), sesium-134 (Cs-134), dan sesium-137 (Cs-137) memberikan kontribusi rendah untuk laju dosis di sekitar sirkuit pendingin primer dan sirkuit lain yang terhubung dikarenakan sumber dan tingkat desposisi yang rendah. Namun dalam keadaan komponen penukar panas atau katup terbuka atau dimasuki personel ketika dilakukan kegiatan pemeliharaan atau perbaikan, maka kontribusi laju dosis akan meningkat secara signifikan.

Dalam hal reaktor beroperasi dengan sejumlah besar cacat kelongsong bahan bakar nuklir, sejumlah massa bahan bakar yang tidak dapat diabaikan (dalam beberapa gram hingga puluhan gram) akan terlarut dalam pendingin. Dalam keadaan tersebut, aktivitas partikel alfa pada pendingin

atau sediaannya tidak dapat diabaikan. Bersama dengan produk fisi dan korosi, massa bahan bakar nuklir yang terlarut tersebut menjadi potensi sumber radiasi yang sangat penting pada saat sirkuit dan komponen internal dibuka untuk pelaksanaan pemeliharaan atau perbaikan.

Dalam hal oksigen terpisah dari fluida pada sistem moderator (misalnya pada reaktor tabung bertekanan), N-16 merupakan isotop sumber radiasi utama selama reaktor beroperasi. Dalam kondisi reaktor padam, paparan radiasi di sekitar sistem pendingin primer berasal dari produk korosi yang teraktivasi. H-3 yang ada di dalam sistem pendingin air atau moderator akan memberikan kontribusi bahaya radiasi hanya jika terlepas dari sistem dan menjadi sumber radioaktivitas udara. Potensi bahaya tersebut harus diperhitungkan dalam desain reaktor LWR yang masih menerapkan toleransi terhadap keberadaan kebocoran pada sistem pendingin atau moderator.

Untuk reaktor berteknologi PWR, dengan material pada sistem pembangkitan uap berbahan dasar nikel, perubahan dari kondisi operasi menuju pemadaman harus mendapatkan perhatian khusus. Hal tersebut berkaitan dengan adanya perubahan bentuk fisik (akibat perubahan temperatur dan tekanan) maupun perubahan sifat kimia dari kondisi reduksi ke oksidasi. Kelarutan oksida produk fisik yang diendapkan meningkat pesat. Sebagian besar produk korosi yang teraktivasi yang terendap di dalam bahan bakar dilepaskan pada pendingin sehingga konsentrasi radionuklida pada air meningkat dua hingga tiga kali lipat.

Laju pelepasan produk korosi teraktivasi tersebut tidak konstan dan menurun seiring dengan penurunan suhu dari keadaan panas hingga mencapai 80°C. Dalam keadaan demikian, sejumlah logam tertentu juga turut terlepas. Untuk semua struktur atau komponen reaktor yang tersusun dari paduan logam berbahan dasar nikel, keseluruhan massa produk korosif teraktivasi yang terlepas bisa mencapai orde beberapa kilogram. Pelepasan meningkat tajam dan teramati adanya lonjakan pada saat ada pemompaan peroksida. Kondisi pengoksidasian untuk menghentikan pelepasan dan penurunan konsentrasi aktivitas air ditentukan oleh konstanta pemurnian (rasio antara laju alir pemurnian dengan massa air). Pelarutan endapan-endapan di luar teras reaktor secara umum diabaikan. Tidak diperlukan dekontaminasi terhadap komponen-komponen seperti pipa utama, pembangkit uap, dan pompa yang diamati. Sepanjang laju dosis tidak berubah, produk korosi teraktivasi terakumulasi terutama pada penukar ion

dari sistem kimia dan kendali volumetrik. Aktivitas akumulasi tersebut mungkin sama dengan aktivitas totak yang terakumulasi sepanjang periode operasi reaktor. Fenomena tersebut sangat dipengaruhi oleh desain, terutama komposisi paduan dasar tabung pembangkit uap yang mungkin berbasis bahan nikel ataupun besi. Selama periode tersebut, kontribusi radionuklida di dalam air terhadap laju dosis di sekitar sistem pendingin reaktor, sistem kimia dan kendali volumetrik, dan sistem pembuangan panas sisa tidak dapat diabaikan dibandingkan dengan kontribusi dari keberadaan endapan-endapan produk korosi teraktivasi.

Sebagai tambahan, untuk reaktor berteknologi PWR, fenomena pelonjakan produk fisi teramati pada tahap pemadaman reaktor. Produk fisi yang terakumulasi pada semua rongga dalam pin bahan bakar nuklir (patahan pada *pellet* bahan bakar, celah antara *pellet* bahan bakar dan kelongsong, ruang ekspansi) mungkin dilepaskan ke pendingin pada saat tekanan turun. Air dapat masuk ke dalam pin bahan bakar nuklir dan menyapu produk fisi ketika dipancarkan. Dengan demikian, pelepasan tidak terbatas pada gas dan bahan lain yang mudah menguap. Pelepasan tersebut terutama tergantung kepada karakteristik cacat kelongsong yang ada.

Dalam sistem pemurnian reaktor berpendingin dan bermoderator air (baik air, maupun air berat), zat radioaktif akan terakumulasi pada filter dan resin penukar ion. Zat radioaktif tersebut terdiri atas produk fisi, seperti yodium dan sesium yang telah larut di dalam pendingin melalui cacat yang ada pada kelongsong, dan produk korosi radioaktif yang diangkut oleh pendingin atau moderator. Filter dan resin penukar ion, serta lebih umum lagi semua komponen tempat akumulasi produk fisi terjadi, akan menghasilkan aktivitas yang sangat tinggi dan memerlukan perisai radiasi. Gas mulia radioaktif sebagai hasil peluruhan isotop yodium dapat terbentuk pada filter. Pada reaktor berpendingin air berat, fotoneutron dapat terbentuk dalam air berat dari N-16. Fotoneutron tersebut menjadi sumber radiasi yang signifikan dalam menentukan persyaratan perisai radiasi dari sirkuit pendingin eksternal ke teras reaktor. Pada reaktor berpendingin gas (*gas cooled reactor/GCR*), sistem pengolahan gas akan mengakumulasi produk korosi aktif (seperti Co-58 dan Co-60), serta produk fisi (seperti yodium dan sesium), yang akan menjadi sumber radiasi yang penting.

Untuk reaktor pembiak cepat berpendingin natrium cair, sumber radiasi yang dominan adalah natrium-22 (Na-22) dan natrium-24 (Na-24). Uap natrium naik pada komponen utama yang mungkin menembus perisai

pelat penutup bejana tekan reaktor. Apabila komponen tersebut menembus perisai, diperlukan perisai yang cukup untuk memastikan penerimaan laju dosis pada ruang operasi berada pada batas aman. H-3 yang dihasilkan pada bahan bakar melalui reaksi fisi berantai dilepaskan ke dalam pendingin primer melalui kelongsong *stainless steel* (melalui mekanisme difusi). Produk fisi, seperti yodium dan sesium, terlepas ke pendingin apabila terdapat cacat kelongsong. Pendingin natrium mungkin digantikan dengan gas mulia seperti argon. Aktivasi terhadap gas argon tersebut menghasilkan Ar-39 dan Ar-41 yang dimungkinkan bocor ke gedung reaktor.

Pendingin pada beberapa tipe reaktor berpendingin gas berisi tritium, belerang-35 (S-35) dalam bentuk senyawa sulfat karbonil, dan C-14. S-35 utamanya dihasilkan dari pengotor klorin di dalam moderator grafit. Tritium berasal dari pengotor litium di dalam grafit. Adapun C-14 berasal dari pengotor nitrogen di dalam bahan pendingin dan moderator. Karena merupakan pemancar sinar beta murni, radionuklida-radionuklida tersebut menimbulkan dampak kesehatan hanya apabila radionuklida terhirup atau tertelan.

C-14 dihasilkan pada reaktor berpendingin air ringan dan air berat melalui reaksi (n, α) terhadap oksigen-17 (O-17) yang ada pada bahan bakar dan pada moderator oksida, melalui reaksi (n, p) terhadap N-14 sebagai pengotor di dalam bahan bakar, dan juga melalui reaksi fisi tersier. Dikarenakan massa moderator yang besar, C-14 utamanya dihasilkan dari reaksi O-17 di dalam moderator pada reaktor berpendingin air berat. C-14 mungkin menjadi suku sumber utama dan memberikan dosis kolektif terikat dalam jangka panjang. Namun demikian, dalam beberapa sistem reaktor berpendingin air berat, kontribusi C-14 terhadap dosis kolektif total relatif kecil dikarenakan C-14 dapat dihilangkan dari moderator melalui sistem pemurnian.

I.3 SISTEM UAP DAN TURBIN

Pada reaktor air siklus langsung, N-16 yang terbawa hingga fase uap menjadi sumber radiasi utama selama pengoperasian reaktor. Efek hamburan balik radionuklida tersebut perlu dicek secara hati-hati pengaruhnya terhadap bangunan berstruktur bahan ringan, seperti pada atap gedung turbin. Pada kondenser, oksigen-19 (O-19) juga perlu dipertimbangkan sebagai sumber radiasi utama. Dalam hal terjadi kerusakan pin bahan bakar, produk fisi yang volatil menjadi sumber radiasi

tambahan, terutama gas mulia dan produk fisi yang volatil, seperti yodium dan sesium. Selama operasi reaktor, sumber radiasi tersebut tidak begitu penting dibandingkan dengan N-16, akan tetapi setelah reaktor padam, radioisotop tersebut dan anak luruhnya, misalnya barium-140 (Ba-140) akan menjadi sumber radiasi utama di dalam sistem. Sumber radiasi lainnya adalah produk korosi nonvolatil yang terbawa oleh embun air dalam uap.

Pada reaktor PWR dan PHWR, sistem uap dan turbin terpisah dari sistem aktif dengan tabung penukar panas sebagai bahan penghalang. Dengan demikian, pada reaktor ini, zat radioaktif hanya dapat mencapai sistem uap dan turbin apabila kebocoran terjadi antara sirkuit primer dan sekunder. Dengan memastikan bahwa laju kebocoran tersebut terpantau (misalnya dengan pengukuran aktivitas air atau N-16 dalam siklus sekunder) dan dipastikan bahwa pada tingkat aktivitas pada sistem sekunder rendah, maka tindakan perlindungan terhadap radiasi langsung maupun hamburan pada sistem tersebut tidak diperlukan. Dengan demikian, tingkat kebocoran maksimum yang dapat ditoleransi antara sirkuit primer dan sekunder perlu dijaga senantiasa tetap sangat rendah. Namun demikian, ketentuan untuk membersihkan cairan sirkuit dan untuk pembuangan limbah dari sisi sekunder dalam hal terjadi kebocoran harus dibuat. Kebocoran pendingin primer ke sirkuit sekunder juga dapat dideteksi dengan memantau tritium dalam air umpan. Adanya radioaktivitas dalam air umpan dapat menyebabkan pelepasan zat radioaktif yang tidak terkendali ke lingkungan hidup melalui bocoran air umpan dan ventilasi uap udara.

Pada reaktor siklus langsung, tambahan sumber kontaminasi sistem sekunder yang memerlukan perhatian adalah kebocoran dari peralatan untuk mengkonsentrasikan limbah radioaktif yang melibatkan pemanasan uap. Salah satu sumber kontaminasi semacam ini adalah adanya kebocoran tabung yang memungkinkan limbah yang terkontaminasi memasuki uap panas yang terkondensasi. Air terkondensasi yang terkontaminasi dari uap tersebut kemudian masuk ke sistem sekunder.

Pada reaktor pembiak cepat, pendingin natrium sekunder dapat teraktivasi menjadi Na-22 dan Na-24. Hal tersebut dapat menimbulkan laju dosis pada bagian bangunan di luar pengungkung apabila penundaan waktu selama transportasi natrium dari generator uap menuju area-area tersebut tidak lebih lama dibandingkan waktu paruh dari Na-22 dan Na-24.

I.4 SISTEM PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF

a. Sistem Pengolahan Limbah Cair

Sistem pengolahan limbah cair mengumpulkan limbah dan memurnikannya sampai pada tingkat yang dapat digunakan kembali di pembangkit, disimpan secara aman pada fasilitas penyimpanan, atau dilepaskan ke lingkungan hidup sesuai dengan ketentuan nilai batas lepasan radioaktivitas ke lingkungan atau tingkat klierens yang ditetapkan.

Komposisi limbah cair, baik konsentrasi aktivitas radionuklida maupun kandungan kimianya, sangat bervariasi berdasarkan asal-usulnya. Pemilahan, pemisahan, dan pengolahan limbah cair berdasarkan komposisi tujuan yang diharapkan merupakan cara umum yang diterapkan. Dengan demikian, cairan di dalam sistem pengolahan limbah cair memiliki beragam konsentrasi aktivitas. Pemisahan limbah cair dapat dilaksanakan berdasarkan beberapa kategori sebagai berikut:

- a. pemurnian tingkat tinggi, misalnya untuk limbah yang berasal dari kebocoran rangkaian sirkuit utama reaktor PWR yang sedang beroperasi;
- b. kandungan kimia tinggi, misalnya pemisahan cairan dekontaminasi;
- c. kandungan zat padat tinggi, misalnya limbah cair yang berasal dari saluran pembuangan pada lantai;
- d. deterjen yang mengandung limbah cair, misalnya limbah cair yang berasal dari buangan air cucian dan tempat mandi personel;
- e. minyak yang mengandung limbah cair, misalnya limbah cair yang berasal dari saluran pembuangan dari lantai pada area tanki minyak pelumas untuk melancarkan sirkulasi pada reaktor GCR;
- f. limbah cair mengandung tritium konsentrasi sangat tinggi (untuk reaktor PHWR).

Percampuran antara sejumlah volume kecil limbah yang memiliki konsentrasi aktivitas tinggi dengan sejumlah volume besar limbah yang memiliki konsentrasi aktivitas rendah harus dihindari.

Pada reaktor LWR, sebelum pengolahan, beberapa jenis limbah cair dimungkinkan memiliki kandungan radionuklida yang tinggi sebagaimana yang terdapat pada fluida pendingin reaktor, dengan mengecualikan radionuklida berumur pendek dan segera akan meluruh, dan gas yang akan segera berdifusi akibat penurunan tekanan.

Konsentrasi aktivitas hingga mencapai 10^{10} Bq/m³ (Becquerel per meter kubik) dapat ditemukan di dalam cairan yang belum diolah tersebut. Karena sistem pengolahan limbah cair mengolah cairan radioaktif, maka zat radioaktif akan terkonsentrasi pada bagian filter, penukar ion, dan evaporator.

Dalam kebanyakan kasus, kandungan radionuklida yang terakumulasi akan terdiri atas beberapa bahan teraktivasi, seperti Co-60, Co-58, Cr-51, Mn-54, dan Fe-59 (tergantung kepada laju pembentukan dan korosi yang terjadi pada material yang dipergunakan pada sirkuit primer). Produk fisi, seperti isotop yodium, sesium, dan stronsium dapat menjadi penting apabila terjadi kegagalan kelongsong bahan bakar nuklir.

b. Sistem Pengolahan Limbah Gas

Sistem Gas Buang

Sejumlah gas radioaktif dengan umur paruh relatif singkat (seperti N-16, O-19, dan N-13) terbentuk di dalam reaktor berpendingin air akibat aktivasi terhadap pendingin reaktor. Keberadaan cacat pada kelongsong bahan bakar memungkinkan gas-gas produk fisi tersebut terlepas ke pendingin reaktor. Apabila diperlukan, gas-gas tersebut dapat dikeluarkan dari pendingin reaktor melalui sistem gas buang khusus.

Dalam kasus khusus pada reaktor air didih (*boiling water reactor*/BWR) siklus langsung, gas-gas produk fisi tersebut hanya akan berada di dalam pendingin untuk waktu singkat sebelum akhirnya dibuang melalui sistem gas buang. Adapun dalam siklus tidak langsung sebagaimana pada reaktor PWR, pembuangan gas fisi mungkin hanya diperlukan sebelum pemadaman reaktor. Hal tersebut dilaksanakan apabila dianggap penting untuk mengurangi aktivitas dalam sistem yang mungkin harus dibuka selama penonaktifan reaktor.

Dalam kondisi adanya bahan bakar yang cacat di dalam teras reaktor dan kondisi laju pembuangan gas yang tinggi (misalnya pada reaktor BWR), konsentrasi aktivitas hingga dalam orde 5×10^{11} Bq/m³ dapat ditemukan pada bagian awal sistem yang beraktivitas tinggi. Pada kejadian tersebut, fraksi zat radioaktif yang cukup besar mengandung isotop berumur pendek dengan umur paruh kurang dari 1 jam. Apabila waktu tinggal rerata gas di dalam sirkuit primer lama (dimungkinkan terjadi pada reaktor PWR yang dioperasikan pada laju pembuangan gas

yang rendah), isotop dengan umur paruh yang panjang merupakan fraksi yang paling signifikan.

Untuk memberikan waktu tunda pelepasan gas radioaktif yang sudah diekstraksi secara memadai untuk peluruhan sebagian besar zat radioaktif, pada sistem *off-gas* harus dilengkapi dengan beberapa sistem pendukung, seperti tanki tunda (*holdup tanks*) pipa tunda (*holdup pipes*), tumpukan karbon peluruhan (*charcoal delay beds*), atau peralatan kriogenik (*cryogenic devices*).

Fenomena pembentukan gas radiolisis pada reaktor BWR siklus langsung dan keberadaan hidrogen konsentrasi tinggi pada pendingin primer reaktor PWR merupakan faktor yang paling penting dalam desain sistem gas buang. Untuk reaktor PHWR, sejumlah besar gas hidrogen dapat terbentuk dan menyelubungi moderator hingga tingkat tertentu di dalam sirkuit primer. Hal tersebut dapat menyebabkan pembentukan campuran gas yang mudah terbakar pada bagian-bagian instalasi tempat udara dapat memasuki sistem. Untuk menghindari hal tersebut, perlu disediakan pencampur (*recombiner*). Penerapan pencampur akan meningkatkan waktu tunda dari sistem tertentu hingga faktor sepuluh kalinya. Hal lain yang dapat diterapkan, misalnya pemisahan secara fisik dengan sempurna dan penerapan prosedur yang sesuai terhadap limbah gas teraerasi dan terhidrogenasi.

Peningkatan waktu tunda akan mengurangi kandungan radioisotop yang berumur pendek dalam limbah radioaktif, meskipun tidak akan mengubah secara signifikan kandungan radioisotop dengan umur paruh lebih lama daripada waktu tunda. Namun demikian, peningkatan waktu tunda hingga 30 hari akan sangat mengurangi pelepasan limbah gas, terutama xenon-133 (Xe-133). Dalam hal ini, radionuklida yang paling penting dilepas adalah Kr-85 dan C-14.

Ventilasi bangunan dapat menjadi sumber pelepasan gas dan pengurangan aerosol. Isotop utama pada sistem tersebut adalah H-3 yang berasal dari penguapan kolam pendingin, dan juga Ar-41.

Sistem Ventilasi Proses

Dalam beberapa kasus, tidak mungkin mencegah berlangsungnya pengenceran gas radioaktif dengan gas yang tidak radioaktif, sebelum gas-gas tersebut diolah. Beberapa contoh kejadian tersebut adalah sebagai berikut:

- gas kubah kalandria (pada reaktor tabung bertekanan, *pressure tube reactor*);
- gas yang menyelubungi kontainer yang di dalamnya tersimpan cairan yang mengandung zat volatil (misalnya tangki penyimpanan untuk penampungan air bocoran pendingin pada reaktor LWR, dan tangki penyimpanan atau peralatan lain pada sistem pengolahan limbah cair. Dalam beberapa kasus, gas yang terbentuk berasal dari produk peluruhan, misalnya peluruhan yodium menjadi xenon);
- bocoran gas pendingin ke bagian lain yang berisi udara pada reaktor GCR;
- udara yang memasuki bejana tekan pada reaktor LWR, setelah dilakukan penurunan tekanan dan pengurangan ketinggian air sebelum pembukaan bejana.

Ventilasi untuk gas-gas buang radioaktif tersebut harus ditempatkan sedemikian rupa sehingga zat radioaktif yang terkandung di dalamnya dapat dijauhkan dari operator reaktor. Dalam kasus reaktor berpendingin gas teknologi maju (*advanced gas-cooled reactor/AGR*), dan gas kubah kalandria pada reaktor tabung bertekanan, zat radioaktif yang ada sebagian besar di antaranya adalah Ar-41. Pada reaktor berpendingin air ringan, gas produk fisi biasanya lebih mendominasi. Pada bejana reaktor bertekanan, hal yang sama berlaku untuk ventilasi proses yang berada pada kontak langsung dengan pendingin (misalnya di tangki penyimpanan dan lain-lain).

c. Sistem Pengolahan Limbah Padat

Di samping bahan bakar nuklir bekas, berikut merupakan limbah radioaktif padat yang timbul selama operasi reaktor (terutama dalam hal aktivitas dan volume):

1. komponen dan struktur yang teraktivasi atau terkontaminasi, dan harus dibuang (misalnya batang kendali, perangkat bakar sumber neutron, pompa yang rusak, struktur atau bagian dari perangkat pengukuran fluks neutron);
2. komponen teriradiasi perangkat bahan bakar nuklir pada reaktor berpendingin gas;
3. resin penukar ion, bahan filter, bahan pelapis filter, katalis, pengering (*desiccants*), dan sejenisnya;

4. konsentrat dari evaporator;
5. berbagai peralatan yang terkontaminasi;
6. pakaian, handuk, lembaran plastik, kertas bekas dan benda lainnya yang terkontaminasi.

Total volume limbah radioaktif belum terolah yang dihasilkan pada pengoperasian pembangkit daya nuklir berkapasitas 1.000 MWe (megawatt electric) mencapai beberapa ratus meter kubik. Sebagian besar di antara limbah radioaktif tersebut merupakan limbah radioaktif tingkat rendah. Konsentrasi aktivitas limbah radioaktif bervariasi dalam rentang yang lebar, dengan persentase kecil memiliki konsentrasi aktivitas maksimum pada kisaran 5×10^{16} Bq/m³ untuk komponen teraktivasi, dan 5×10^{14} Bq/m³ untuk resin penukar ion dan bahan pelapis filter awal (*pre-coat*).

Dalam kebanyakan kasus, produk aktivasi berumur panjang (seperti Co-60) dan produk fisi berumur panjang (terutama Cs-134 dan Cs-137 bila terjadi cacat kelongsong bahan bakar) merupakan sumber radioaktif yang timbul.

Limbah padat memerlukan pengelolaan secara hati-hati agar volumenya dapat diminimalisasi. Pembatasan pelepasan limbah padat ke lingkungan hidup untuk menunggu tingkat radioaktivitasnya hingga mencapai tingkat yang sangat rendah akan berkonsekuensi meningkatnya volume limbah padat yang harus disimpan dan dikelola.

I.5 BAHAN BAKAR NUKLIR BARU

Bahan bakar nuklir yang dibuat dari uranium baru (*fresh uranium*) atau bahan fisil lainnya yang masih baru memiliki aktivitas radionuklida yang sangat rendah. Dikarenakan sebagian besar radiasi yang dipancarkan berupa sinar alfa dan beta yang memiliki daya tembus sangat terbatas, maka radiasi yang terpancar dapat teratenuasi dengan baik oleh kelongsong bahan bakar. Dengan demikian, paparan radiasi eksternal pada bahan bakar nuklir yang masih baru sangat kecil, bahkan dapat diabaikan.

Dalam beberapa kasus, bahan bakar nuklir diproduksi dari bahan uranium atau plutonium yang didaur ulang. Dalam proses daur ulang, tidak sepenuhnya bisa dilakukan pemurnian terhadap produk fisi maupun nuklida aktinida yang terdapat pada bahan bakar nuklir bekas. Dengan demikian, bahan bakar nuklir baru merupakan sumber neutron dan paparan radiasi gama yang signifikan, sehingga harus dikungkung dengan

perisai radiasi yang memadai sepanjang waktu hingga pada saat bahan bakar nuklir tersebut dimasukkan ke teras reaktor. Kekuatan sumber neutron yang ada sangat tergantung kepada rentang waktu yang terjadi sejak plutonium terbentuk, karena pancaran neutron muncul dari aktinida yang merupakan anak luruh dari plutonium.

Dalam hal bahan bakar nuklir baru tersusun dari torium-233 (Th-233) atau uranium-233 (U-233), bahan bakar tersebut menjadi sangat radioaktif karena keberadaan anak luruh dari U-232. Bahan bakar tersebut harus dilindungi dan dikungkung secara memadai sampai dengan saat dimasukkan ke dalam teras reaktor.

I.6 BAHAN BAKAR NUKLIR BEKAS

Bahan bakar nuklir bekas, yang sudah teriradiasi di dalam teras reaktor, mengandung produk fisi dan unsur transuranium yang sangat radioaktif.

Pada sistem pengisian bahan bakar saat reaktor beroperasi (*on-load refueling system*), bahan bakar dalam sistem pengisian tersebut akan memancarkan neutron tunda. Keberadaan neutron tunda tersebut harus diperhitungkan dalam desain sistem pengisian bahan bakar di atas.

Tambahan sumber radiasi akan dipancarkan dari material teraktivasi yang digunakan untuk membuat perangkat bahan bakar nuklir.

Selama penanganan dan penyimpanan bahan bakar nuklir bekas, sejumlah radionuklida dapat terlepas ke pendingin. Produk korosi radioaktif juga dapat masuk ke dalam larutan atau dilepaskan sebagai partikel pada saat bahan bakar bekas sedang diangkut atau disimpan di dalam air.

Dalam hal sebagian jalur penanganan bahan bakar nuklir bekas merupakan jalur kering, dan terutama bila kelongsong teroksidasi, maka bahan teraktivasi dapat mengelupas pada permukaan perangkat bahan bakar sebagai akibat adanya kejutan termal maupun mekanis. Di samping itu, pin bahan bakar nuklir yang rusak atau cacat dapat melepaskan produk fisi radioaktif yang sebagian di antaranya merupakan isotop gas mulia, yodium, sesium, dan stronsium.

Untuk sistem penanganan dan penyimpanan bahan bakar nuklir bekas dengan metode basah, sistem pembersihan air pendingin dengan filter partikulat dan penukar ion harus disediakan, serta dikombinasikan dengan sistem pembuangan panas yang memadai. Filter dan resin penukar ion bekas merupakan sumber radiasi yang harus ditangani dengan baik sebagai

limbah radioaktif. Kontaminasi yang timbul pada sistem penanganan, pemurnian, dan pembuangan sisa panas juga merupakan sumber radioaktif tambahan yang harus diperhatikan.

Pada reaktor AGR, sebelum proses pembongkaran, bahan bakar ditangani dan disimpan menggunakan metode kering. Setelah itu, bahan bakar nuklir bekas ditempatkan pada kolam berpendingin air.

Dalam penerapan sistem untuk penanganan dan penyimpanan bahan bakar dengan metode kering, dimungkinkan timbul kontaminasi yang disebabkan oleh produk korosi radioaktif yang mengelupas dari elemen bahan bakar. Beberapa komponen dari perangkat bahan bakar nuklir bekas yang sudah dibongkar disimpan dalam wadah yang ditempatkan di instalasi reaktor. Kondisi yang sama juga dilaksanakan dalam penyimpanan bahan bakar nuklir bekas dari reaktor CANDU, yang merupakan reaktor PHWR.

I.7 FASILITAS DEKONTAMINASI

Zat radioaktif dalam larutan limbah radioaktif terutama terdiri atas produk korosi yang mengandung radionuklida Co-60, Co-58, Cr-51, Fe-59, dan Mn-54. Zat radioaktif tersebut muncul dari proses dekontaminasi terhadap komponen atau bahan dari daerah terkontaminasi, pakaian pelindung terkontaminasi, bahkan personel. Konsentrasi aktivitas pada limbah radioaktif yang muncul dari proses dekontaminasi terhadap pakaian pelindung dan personel biasanya berada pada tingkatan yang rendah. Adapun kandungan konsentrasi aktivitas yang muncul dari fasilitas dekontaminasi terhadap komponen dalam pekerjaan perbaikan utama biasanya dalam kisaran sedang hingga tinggi.

I.8 SUMBER RADIASI LAIN

Sumber radiasi lain juga terdapat di dalam instalasi reaktor daya, seperti sumber pemicu neutron, sampel korosif aktif, detektor di dalam dan luar teras, sumber radiasi untuk kalibrasi, serta sumber radiasi yang dipergunakan untuk kegiatan uji tak rusak dalam rangka pengujian bahan struktur, sistem, dan komponen reaktor.

Sebagai pendukung kegiatan pengoperasian reaktor dalam rangka pemeliharaan dan peningkatan kesehatan personel, dimungkinkan pula keberadaan klinik kesehatan yang mengoperasikan pembangkit radiasi pengion untuk keperluan diagnostik.

Keberadaan sumber-sumber radiasi lain ini harus diperhitungkan sebagai bagian dari keseluruhan instalasi, terutama dalam rangka penentuan dosis target desain dan penetapan nilai pembatas dosis.

KEPALA BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR
REPUBLIK INDONESIA,



JAZI EKO ISTIYANTO

LAMPIRAN II
PERATURAN BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR
NOMOR 1 TAHUN 2020
TENTANG
ASPEK PROTEKSI RADIASI DALAM DESAIN
REAKTOR DAYA

**SUMBER RADIASI YANG HARUS DIPERHATIKAN DALAM KONDISI
KECELAKAAN NUKLIR**

Dalam perhitungan desain reaktor daya untuk kondisi kecelakaan, sumber radiasi utama pada saat terjadi kecelakaan adalah produk fisi radioaktif. Produk fisi tersebut dapat terlepas dari matriks dan kelongsong bahan bakar nuklir, maupun dari berbagai sistem pengungkung produk fisi radioaktif.

Beberapa kasus kondisi kecelakaan yang menyebabkan terjadinya pelepasan produk fisi radioaktif, di antaranya adalah hilangnya pendingin dan adanya kerusakan bahan kelongsong yang disebabkan adanya tekanan atau panas berlebih pada bahan bakar nuklir. Kasus yang sama juga dapat terjadi dikarenakan kecelakaan dalam penanganan bahan bakar nuklir bekas, seperti jatuhnya perangkat bahan bakar nuklir bekas yang menyebabkan kegagalan mekanisme kelongsong bahan bakar. Radionuklida produk fisi yang bersifat volatil biasanya mendominasi suku sumber yang terlepas pada kondisi kecelakaan tersebut.

Perhitungan untuk memperkirakan zat radioaktif yang terakumulasi pada filter ataupun yang terlepas atau lolos melalui filter atau melewati sistem pengolahan limbah cair setelah kecelakaan terjadi harus dilakukan semenjak perencanaan desain. Keberadaan produk aktivasi dalam kondisi kecelakaan biasanya kurang penting untuk diperhitungkan jika dibandingkan dengan keberadaan radiasi yang dipancarkan dari produk fisi dan bahan aktinida radioaktif.

II.1 REAKTOR BERPENDINGIN AIR RINGAN

Kecelakaan Hilangnya Pendingin

Kecelakaan hilangnya pendingin pada teras reaktor dapat terjadi akibat kurangnya laju aliran pendingin dan kebocoran sistem pendingin utama,

hingga kejadian pecahnya kedua ujung (*double ended rupture*) pipa pendingin utama. Fitur desain sistem keselamatan di dalam teras reaktor harus memperhitungkan kemungkinan kerusakan matriks dan kelongsong bahan bakar yang mungkin timbul sebagai konsekuensi kecelakaan hilangnya pendingin, termasuk fraksi tiap produk fisi yang lepas akibat kerusakan bahan bakar nuklir yang terjadi.

Perkiraan pelepasan produk fisi radioaktif berikutnya dari sistem pendingin ke sistem pengungkung dan perilakunya di dalam bangunan instalasi reaktor harus diperhitungkan semenjak perencanaan desain. Perhitungan perilaku lepasan produk fisi tersebut harus mencakup keadaan paling kurang:

- a. dampak pelapisan permukaan pada semua struktur, sistem, dan komponen di dalam sistem pengungkung;
- b. endapan produk fisi radioaktif yang terbentuk melalui proses pencelupan atau penyemprotan; dan
- c. pengaruh reaksi lepasan yodium.

Untuk tujuan perkiraan pelepasan produk fisi radioaktif sebagaimana dimaksud di atas, perlu diasumsikan bahwa teras reaktor telah beroperasi untuk jangka waktu yang cukup lama sehingga inventarisasi produk fisi radioaktif yang mengalami kesetimbangan maksimum sudah terakumulasi di dalam teras pada saat kecelakaan terjadi.

Laju kebocoran produk fisi radioaktif dari sistem pengungkung sebagai fungsi waktu setelah kecelakaan harus diperhitungkan semenjak perencanaan desain. Meskipun isolasi pengungkung terjadi sebagai akibat adanya tekanan tinggi di dalam sistem pengungkung akan meminimalkan pelepasan ke lingkungan, potensi pelepasan signifikan yang terjadi sebelum isolasi pengungkung terpasang perlu diperhitungkan dalam analisis pencegahan dan penanggulangan kecelakaan.

Sebagai alternatif dalam analisis terhadap kemungkinan terjadinya kecelakaan akibat hilangnya pendingin, praktik umum oleh beberapa negara dalam penentuan fraksi inventarisasi teras didasarkan atas produk fisi radioaktif yang dianggap mencapai atmosfer pengungkung setelah kecelakaan terjadi. Fraksi tersebut ditentukan secara berbeda untuk berbagai kategori unsur kimia, tetapi biasanya tidak bergantung pada tindakan desain yang dilakukan terhadap kecelakaan jenis tertentu. Dengan demikian, fraksi tersebut ditetapkan sebagai batas atas yang diasumsikan tanpa memperhatikan karakteristik kinerja sistem pendingin teras darurat.

Perilaku radionuklida setelah pelepasannya dari pengungkung bergantung pada desain reaktor daya. Pada beberapa desain, radionuklida lepasan dapat segera mencapai atmosfer. Ada pula desain reaktor lain yang memungkinkan radionuklida lepasan tertahan dalam sistem pengungkung sekunder. Namun demikian, ada pula desain reaktor yang memungkinkan radionuklida lepasan dapat dilepas ke bangunan sekitar dengan laju yang sangat rendah melalui cerobong setelah melewati filter yang memadai.

Kerusakan Jalur Uap pada Reaktor BWR

Kerusakan jalur uap utama pada reaktor BWR dapat menimbulkan konsekuensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan rusaknya pipa sirkulasi pada kasus kecelakaan akibat hilangnya pendingin sebagaimana dibahas sebelumnya. Hal tersebut sangat tergantung kepada diameter pipa pendingin dan karakteristik sistem keselamatan reaktor daya. Dengan demikian, pada saat perencanaan desain harus dilakukan analisis terhadap kedua parameter tersebut.

Dalam hal lokasi kerusakan jalur uap (*steam line break*, SLB) masih berada di dalam sistem pengungkung, urutan kejadian lepasan produk fisi radioaktif sama dengan urutan kejadian akibat hilangnya pendingin namun dengan fraksi kegagalan kelongsong bahan bakar nuklir yang berbeda. Konsentrasi kesetimbangan untuk produk fisi radioaktif pada kondisi operasi daya penuh harus diasumsikan. Analisis desain untuk potensi pelepasan produk fisi radioaktif harus mempertimbangkan waktu yang dibutuhkan untuk isolasi pengungkungan dan efektivitas dari sistem pemurnian pendingin.

Untuk lokasi kerusakan SLB berada di luar sistem pengungkung, dan dalam hal isolasi katup jalur pipa utama dekat dengan pengungkung yang dalam waktu singkat menutup untuk mengisolasi reaktor, hanya fraksi dari zat radioaktif yang terdapat pada uap dalam kondisi operasi yang diduga akan terlepas. Kondensasi uap dalam bangunan ketika kecelakaan terjadi dan pelapisan permukaan berupa nuklida selain gas mulia akan mengurangi radionuklida yang terlepas ke atmosfer. Lokasi pelepasan produk fisi radioaktif ke atmosfer sangat tergantung kepada desain reaktor daya.

Secara umum, lepasan pendingin ke dalam bangunan reaktor selain ke pengungkung akan menghasilkan tekanan berlebih. Tekanan tersebut mengakibatkan zat radioaktif akan keluar dari bangunan, baik melalui titik

lepasan yang telah ditentukan (lewat atap), maupun melalui pintu atau struktur lemah lainnya yang akan terbuka secara otomatis akibat tekanan berlebih atau adanya kebocoran.

Percampuran antara uap dan udara di dalam bangunan reaktor dapat diasumsikan terjadi apabila posisi kerusakan pipa dan titik keluar lepasan dari bangunan tidak berdekatan. Setelah tekanan berlebih berkurang, lepasan keluar tidak akan melalui titik lepasan yang tidak terkontrol, melainkan melalui cerobong yang merupakan bagian dari sistem ventilasi dan filter.

Pada beberapa desain Reaktor BWR, sistem kendali kebocoran telah ditambahkan di antara katup isolasi uap utama untuk membatasi keluarnya lepasan zat radioaktif melalui katup dimaksud.

Kemungkinan adanya lepasan langsung radionuklida dari bangunan reaktor setelah lepasnya tekanan berlebih perlu dipertimbangkan apabila bukaan untuk melepas tekanan berlebih tidak tertutup dan tekanan negatif dalam bangunan reaktor tidak dapat dikembalikan oleh sistem ventilasi ataupun oleh sistem pengeringan alami pada cerobong.

Kerusakan Jalur Uap pada Reaktor PWR

Pada kondisi awal kejadian, SLB pada Reaktor PWR hanya akan melepaskan jumlah radionuklida yang tidak signifikan dan mungkin sebelumnya terdapat pada sistem sekunder selama operasi normal.

Sebagai konsekuensi terjadinya SLB, integritas dari tabung pembangkit uap harus dinilai. Integritas tabung tersebut sangat bergantung pada parameter tekanan antara sisi primer dan sisi sekundernya. Dalam hal integritas tabung pada pembangkit uap tersebut tidak dapat dipastikan, jumlah air pendingin primer yang dapat memasuki sisi sekunder perlu diperkirakan. Setelah reaktor padam, kandungan radionuklida dalam air yang bocor dapat meningkat sebagai efek perubahan signifikan produk fisi radioaktif (*fission product spiking*).

Bergantung pada desain sistem pembangkit uap, air pendingin primer yang bocor menuju sisi sekunder dapat bercampur dengan pendingin sekunder di dalam pembangkit uap. Uap yang dihasilkan tak lama setelah kejadian kecelakaan keluar melalui jaringan uap yang rusak dan akan memiliki kelembapan yang lebih tinggi dari tingkat normal karena adanya penurunan tekanan (*depressurization*).

Kejadian patahnya kedua ujung pipa uap (*double ended rupture*) pada pembangkit uap dapat menimbulkan pelepasan zat radioaktif secara signifikan ke atmosfer yang disebabkan oleh pelepasan uap pada jalur uap yang patah tersebut. Hal tersebut dapat terjadi apabila kerusakan yang terjadi tidak dapat diisolasi dari pembangkit uap. Seiring peningkatan konsentrasi yodium secara signifikan yang terjadi di dalam pendingin primer dan dengan adanya kebocoran dari sistem pendingin primer ke sistem pendingin sekunder, maka konsentrasi aktivitas pada uap yang keluar juga menjadi signifikan. Potensi kejadian tersebut dapat memberikan dampak lebih besar lagi apabila terjadi kegagalan kelongsong pada bahan bakar. Peningkatan lepasan radioaktif sebagaimana tersebut di atas dipengaruhi oleh beberapa faktor, meliputi:

- a. tingginya konsentrasi aktivitas lepasan sebagaimana yang sudah diperhitungkan dalam perencanaan desain;
- b. kejadian kerusakan (*break*) yang tidak dapat diisolasi sepenuhnya; dan
- c. tingkat pengeringan sistem pembangkit uap yang terkena dampak.

Setelah reaktor padam, produksi uap yang terjadi akan bergantung kepada panas peluruhan. Kelembapan uap akan menjadi rendah sebagai akibat dari rendahnya laju aliran uap, dan efisiensi peralatan pemisah uap dan pengering uap menjadi tinggi. Dengan demikian, uap yang dapat terlepas melalui katup pelepasan tekanan (*pressure relief valve*) akan memiliki konsentrasi bahan larut air, seperti yodium dan sesium yang relatif rendah. Pelepasan radioaktif diharapkan dapat diminimalisasi dengan pengisolasian pembangkit uap yang rusak dan tindakan keselamatan lain yang dilakukan berdasarkan rancangan desain.

Pecahnya Tabung Pembangkitan Uap

Kerusakan tabung pembangkit uap pada Reaktor PWR dapat berpotensi menyebabkan pelepasan zat radioaktif ke atmosfer. Pelepasan tersebut dapat menjadi signifikan dikarenakan lonjakan pembentukan yodium tidak terjadi sebelum kejadian awal berlangsung, namun justru pada fase transien. Insiden rusaknya tabung pembangkit uap pernah terjadi setidaknya pada 12 reaktor daya yang beroperasi.

Fitur desain untuk memperhitungkan kemungkinan kejadian pecahnya tabung pembangkit uap didasarkan kepada kejadian pecahnya kedua ujung pada satu atau lebih tabung pembangkit uap. Pecahnya penghalang dari sistem primer ke sistem sekunder tersebut memicu lepasan pendingin

primer reaktor ke sisi sekunder. Setelah pemadaman reaktor secara otomatis (*reactor trip*), aktuasi terhadap katup pelepas tekanan uap pada sisi sekunder akan melepaskan uap terkontaminasi ke atmosfer. Potensi lepasan radioaktif senantiasa ada, bahkan meskipun bejana pembangkit uap tidak terbuka akibat bocoran langsung pendingin primer ke jalur uap. Sumber radiasi selama kejadian tersebut berlangsung adalah produk fisi radioaktif yang terdapat dalam aliran bocoran pendingin primer ke sekunder. Pelepasan jumlah produk fisi radioaktif ke atmosfer akan semakin bertambah melalui lepasan yang terjadi pada katup pelepas tekanan sisi sekunder.

Setelah pemadaman reaktor secara otomatis, besarnya panas peluruhan dan tindakan operator untuk mengisolasi pembangkit uap atau untuk membuka kalang primer akan menentukan besarnya lepasan zat radioaktif. Lepasannya ke atmosfer akan terhenti pada saat tekanan di kalang primer dan sekunder telah sama. Operator akan melakukan pendinginan pembangkit uap menggunakan sistem pembangkit uap yang masih utuh.

Sifat transien berlangsungnya insiden sangat bergantung pada sistem pengaman otomatis dan waktu yang dibutuhkan operator untuk mulai mengambil tindakan yang efektif dalam penanggulangan insiden.

Kecelakaan Penanganan Bahan Bakar

Dalam analisis fitur desain terhadap pengaruh kecelakaan penanganan bahan bakar nuklir terpostulasi, seperti jatuhnya bahan bakar bekas saat dipindahkan dari bejana reaktor ke kolam penyimpanan, langkah pertama yang dilakukan adalah penentuan inventori zat radioaktif yang ada di dalam bahan bakar pada saat kecelakaan terjadi. Asumsi mengenai riwayat iradiasi bahan bakar secara rinci perlu dipilih sehingga menghasilkan perkiraan aktivitas zat radioaktif di dalam bahan bakar yang konservatif.

Waktu minimum yang berlangsung antara pemadaman reaktor dan awal pelaksanaan penanganan bahan bakar harus digunakan untuk menentukan inventori suku sumber radioaktif maksimum di dalam batang bahan bakar di awal pelaksanaan pengisian ulang bahan bakar. Jumlah batang bahan bakar yang bisa rusak sebagai dampak kecelakaan perlu ditentukan secara teoretis, atau dengan mengevaluasi kejadian sebenarnya pada elemen bahan bakar yang serupa, atau melalui kajian eksperimental.

Fraksi inventori gas mulia yang dilepaskan ke air kolam sekitarnya bergantung pada volume ruang bebas yang terdapat di dalam batang bahan bakar. Tidak ada konsensus umum untuk menentukan mekanisme yang dominan bagi lepasan yodium dari batang bahan bakar ke air kolam pendingin akibat keretakan pada kelongsong. Yodium mungkin terlindi oleh air yang merembes ke batang bahan bakar yang rusak atau lepasan yodium paling dominan mungkin dalam wujud gas, yang diasumsikan terdapat di dalam ruang bebas dalam batang bahan bakar.

Pendekatan yang lazim dan konservatif dalam memperkirakan lepasan yodium dilakukan dengan mengabaikan kelarutan gas mulia di dalam air kolam. Namun demikian, pada kenyataannya sejumlah fraksi yodium dan sesium yang signifikan akan tertahan di dalam air kolam. Lepasannya yodium ke atmosfer melalui permukaan air kolam dapat digambarkan dengan koefisien partisi yang menyatakan perbandingan antara konsentrasi aktivitas volumetrik yodium (Bq/m^3) di udara dan di dalam air kolam. Untuk sebagian yodium yang terikat di dalam senyawa organik, seperti metil yodium, kelarutannya di dalam air dapat diabaikan.

Dalam penentuan jumlah berbagai jenis zat radioaktif yang dilepaskan ke atmosfer dari instalasi reaktor daya, perlu diperhitungkan fitur dan parameter lain, seperti rasio volume air dan udara, lamanya waktu yang dibutuhkan dari awal kejadian hingga padamnya sistem ventilasi, dan efektivitas desain dari sistem penghisap udara di atas permukaan air kolam.

Untuk mempermudah evaluasi pelepasan yodium, fraksi yodium yang diperkirakan terlepas dari bahan bakar ke ruangan atas kolam penyimpanan bahan bakar mungkin ditetapkan sebagai nilai yang berlaku umum untuk setiap desain reaktor tertentu.

Selain gas mulia dan yodium, sesium dapat secara perlahan terlindi/tercuci oleh air yang merembes batang bahan bakar yang rusak. Sesium tersebut akan berada dalam bentuk ion yang terdapat di dalam air. Dengan demikian, perpindahan sesium ke udara di atas kolam air dapat diabaikan.

Jumlah gas mulia dan yodium yang terlepas ke lingkungan hidup akan dikendalikan dengan laju ventilasi dan sistem penyapu udara di atas kolam yang digunakan. Pengurangan konsentrasi yodium karena proses penyaringan pada udara buang diperhitungkan menggunakan faktor dekontaminasi yang berkesesuaian dengan desain filter yang diterapkan. Lepasannya yang terjadi dapat dihentikan melalui tindakan isolasi pada bagian

yang tepat dari sistem reaktor daya, terutama apabila kolam penyimpanan berada di dalam pengungkung. Apabila tindakan isolasi tersebut dilakukan oleh operator, waktu tunda dapat diasumsikan antar 10 hingga 30 menit.

Kecelakaan pada Sistem Bantu

Beberapa contoh kecelakaan yang terjadi pada sistem bantu meliputi antara lain:

- a. pecahnya pipa pada sistem bantu;
- b. percikan api dari filter atau peredam;
- c. ledakan pada tangki penyimpan;
- d. tumpahnya limbah radioaktif cair; dan
- e. kebakaran dalam sistem limbah radioaktif.

Konsekuensi kecelakaan yang terjadi pada sistem bantu bergantung pada fitur desain sistem yang bersangkutan, dengan perbedaan yang signifikan untuk setiap desain reaktor daya yang berbeda. Dengan demikian, asumsi yang dipilih untuk keperluan analisis kecelakaan perlu dibuat berdasarkan kasus per kasus.

Salah satu jenis kecelakaan pada sistem bantu yang penting adalah kecelakaan yang disebabkan oleh retaknya pipa pada sistem pembuangan panas pada waktu beroperasi setelah reaktor padam, atau terhentinya sistem kontrol kimia dan volume pada saat reaktor beroperasi. Dalam kedua kasus kejadian tersebut, kontribusi suku sumber yang paling penting adalah peningkatan atau lonjakan produk fisi yang terjadi sebagai akibat reaktor padam atau sebelum terhentinya sistem kontrol tersebut.

Analisis terhadap kejadian kecelakaan sebagaimana tersebut di atas mensyaratkan bahwa laju kebocoran dari pipa, pergerakan gas radioaktif melalui fasilitas bantu dan sistem ventilasi aktif, perilaku yodium, dan efisiensi sistem filtrasi pada kondisi kecelakaan ditentukan sebagai fungsi waktu.

Kecelakaan Parah

Kecelakaan yang merupakan gabungan dari kegagalan multisistem atau kegagalan komponen dan kesalahan operator sehingga menyebabkan peluang terjadinya menjadi sangat kecil diklasifikasikan sebagai kecelakaan yang melampaui dasar desain. Dalam beberapa kasus, sebagian dari teras reaktor dapat meleleh dan kejadian tersebut disebut sebagai kecelakaan parah. Kemungkinan tingkat keparahan sebagai konsekuensi kecelakaan

parah sangat ditentukan oleh fitur desain reaktor daya dan sifat alamiah dari kegagalan, serta tindakan penanggulangan oleh operator. Dalam kasus seperti di atas, sistem keselamatan dapat saja gagal untuk menjalankan peran dan fungsi keselamatan sebagaimana rancangan desain awal. Kondisi ini dapat mengancam integritas penghalang terakhir yang tersisa untuk menahan lepasan zat radioaktif ke lingkungan hidup sepanjang kecelakaan parah berlangsung. Dengan demikian, terdapat potensi pelepasan zat radioaktif yang sangat besar ke lingkungan hidup di sekitar instalasi reaktor daya.

Dikarenakan potensi kerusakan teras reaktor sangat signifikan terjadi selama kecelakaan parah, potensi kecelakaan parah harus dianalisis secara rinci untuk menentukan konsekuensi radiologi yang mungkin timbul dan memiliki dampak yang signifikan terhadap kesehatan dan keselamatan masyarakat. Analisis tersebut dapat memperkirakan jenis dan besarnya suku sumber radiologi guna membuat inventori zat radioaktif yang dimungkinkan terlepas ke lingkungan hidup.

II.2 REAKTOR BERPENDINGIN KARBON DIOKSIDA (CO₂), BERBAHAN BAKAR URANIUM DIOKSIDA (UO₂) DENGAN KELONGSONG LOGAM

Kegagalan Kanal Tunggal

Untuk kecelakaan yang melibatkan bahan bakar nuklir di dalam teras reaktor, suku sumber yang paling signifikan adalah produk fisi di dalam matriks bahan bakar dan produk teraktivasi di dalam kelongsong. Desain teras reaktor dan bahan bakar berhubungan dengan derajat bakar bahan bakar, pendinginan, dan stabilitas konfigurasi teras, sehingga dalam kecelakaan dasar desain tidak akan terjadi pelelehan UO₂.

Jenis kejadian yang dapat menyebabkan lepasan zat radioaktif terbesar dianggap sebagai sebuah kecelakaan yang merupakan dampak dari pelelehan sebagian kelongsong yang diiringi dengan kenaikan temperatur bahan bakar (UO₂) di atas temperatur normal operasi. Sisa aliran melalui kanal (bahkan jika ada pergantian konfigurasi bahan bakar), konduksi kalor ke seluruh struktur teras, dan pengurangan densitas daya bahan bakar akibat pemadaman secara otomatis akan menjamin UO₂ tidak akan meleleh.

Dalam kondisi sebagaimana dimaksud di atas, persentase substansial dari gas mulia dan nuklida yodium sebagai hasil fisi yang dilepaskan dari matriks bahan bakar yang kelongsongnya rusak ke pendingin dapat mencapai 100%. Zat radioaktif pada kelongsong yang meleleh senantiasa

diasumsikan dilepaskan ke pendingin secara keseluruhan. Persentase lepasan produk fisi dari bahan bakar yang mengalami kerusakan kelongsong sangat bergantung pada riwayat temperatur bahan bakar sebagai fungsi waktu yang mengikuti kegagalan kelongsong dan keberadaan hasil oksidasi UO_2 menjadi uranium oksida (U_3O_8) oleh pendingin CO_2 . Nilai yang akurat ditentukan dari percobaan yang khusus ditujukan untuk menentukan persentase lepasan.

Sebagian radionuklida yang berada dalam fluida pendingin akibat terjadinya kecelakaan terlepas dari rangkaian pendingin melalui kebocoran sistem pendingin. Untuk mengantisipasi hal tersebut, fitur desain reaktor daya harus dirancang untuk mengumpulkan pendingin yang bocor menggunakan sistem ventilasi dan melepaskannya ke atmosfer melalui filter HEPA.

Setelah zat radioaktif dilepaskan ke fluida pendingin, jumlah pelepasan zat radioaktif ke atmosfer akan sangat tergantung kepada beberapa parameter, meliputi kebocoran, pelapisan permukaan, pembersihan oleh sistem pengolahan pendingin, dan peluruhan radioaktif. Terkait dengan gas mulia, pelapisan permukaan dan penghilangan pada fasilitas pengolahan bahan pendingin tidak terjadi. Untuk pelapisan permukaan dengan yodium, harus dipertimbangkan kemungkinan adanya lebih dari satu jenis isotop yodium dan sifat pelapisannya yang berbeda-beda. Beberapa yodium yang terlepas ke sirkulasi fluida pendingin akan membentuk senyawa atau unsur yang melekat pada partikel, dan sisanya membentuk senyawa metil-yodium. Dua jenis senyawa yodium tersebut akan terendap dari fluida pendingin dengan laju pengendapan yang berbeda-beda. Total endapan yang terbentuk akan dibatasi oleh adsorpsi dan pelarutan kembali terhadap yodium yang terendap. Hal tersebut harus dipertimbangkan dalam penentuan variasi aktivitas fluida pendingin terhadap fungsi waktu. Nilai yang akurat dalam penentuan fraksi yodium dalam berbagai bentuk, waktu paruh setiap jenis endapan, dan untuk pembatasan faktor pelapisan permukaan harus ditentukan melalui eksperimen.

Kecelakaan Penurunan Tekanan Secara Drastis

Kelongsong dari beberapa pin bahan bakar nuklir dimungkinkan tidak terhindar dari keberadaan kebocoran kecil, dan pin tersebut dapat melepaskan fraksi produk fisi gas mulia, yodium, dan sesium yang bergerak bebas dari pin bahan bakar menuju fluida pendingin. Besarnya fraksi

produk fisi yang terlepas hingga ke fluida pendingin sangat bergantung pada daya termal reaktor, temperatur bahan bakar, dan faktor *burnup*.

Pada kasus gas mulia dan yodium, fraksi dari produk fisi gas Xe, gas Kr, dan xenon-133 (Xe-133), serta yodium-131 (I-131) yang berada di dalam matriks bahan bakar dihitung menggunakan program komputer berdasarkan teori difusi pada batas butir UO₂ dan pembentukan gelembung pada batas butir tersebut. Konstanta yang dipergunakan dalam perhitungan tersebut harus disesuaikan untuk memberikan fraksi perhitungan sesuai dengan pengukuran. Sesium yang keluar dari matriks bahan bakar menuju fluida pendingin ditentukan atas dasar pengamatan bahwa fraksi unsur tersebut yang terlepas sekitar 1/3 dari keseluruhan I-131.

Untuk kasus gas mulia saja, fraksi lepasan gas tersebut dari bahan bakar yang terlepas hingga mencapai atmosfer ditentukan oleh parameter umur paro dan laju penurunan tekanan pada pendingin reaktor. Khusus untuk nuklida yodium dan sesium yang terlepas dalam bentuk molekuler, deposisi kedua unsur tersebut pada permukaan bangunan reaktor akan mengurangi konsentrasinya di dalam pendingin, demikian halnya konsentrasi yang dapat terlepas ke atmosfer. Data tersebut sangat diperlukan untuk memperhitungkan baik deposisi maupun desorpsi selanjutnya. Faktor-faktor penting yang menentukan deposisi dan desorpsi meliputi variasi kecepatan aliran fluida pendingin dan temperatur permukaan sebagai fungsi waktu, serta tingkat pencampuran pendingin di dalam reaktor.

Untuk reaktor GCR, desain kalang pendingin dan sistem pemadaman otomatis reaktor dan *rating* bahan bakar dirancang sedemikian rupa sehingga pelelehan kelongsong tidak akan pernah terjadi dalam kasus kecelakaan akibat hilangnya tekanan pada fluida pendingin. Perlu dicatat bahwa kegagalan bejana reaktor yang terbuat dari bahan beton pratekan (*prestressed*) diasumsikan tidak akan terjadi, dan kebocoran pada kalang fluida pendingin dapat terjadi sebagai akibat kegagalan pada penetrasi yang terdapat pada bejana tekan (misalnya keberadaan pipa penghubung ke sistem pembangkit uap atau pipa air), atau pipa pendingin eksternal (seperti katup pelepas tekanan, atau pipa penghubung ke sistem pengolahan fluida pendingin). Kebocoran terbesar yang dapat terjadi akan dihasilkan dari kegagalan pipa pengumpan atau pipa pengumpan balik dari dan ke sistem pengolah fluida pendingin. Untuk mengurangi laju penurunan tekanan, pembatas aliran harus dipasang pada bagian penetrasi ke bejana tekan yang

berhubungan dengan pipa penghubung ke sistem pengolahan fluida pendingin.

Memadamkan reaktor secara otomatis melalui pemadaman tekanan rendah, membatasi desain laju penurunan tekanan maksimum, memastikan laju aliran pendingin minimum yang diperlukan pada tekanan atmosfer, dan upaya pendinginan berkelanjutan dengan sistem penukar panas merupakan tindakan-tindakan untuk memastikan bahwa temperatur kelongsong bahan bakar tidak akan naik hingga melebihi temperatur operasi dalam kondisi normal. Tindakan mempertahankan temperatur kelongsong bahan bakar pada tingkat rendah akan memperkecil kemungkinan kerusakan kelongsong bahan bakar sebagai akibat kejadian penurunan tekanan pada fluida pendingin. Batas desain untuk temperatur kelongsong bahan bakar, temperatur bahan bakar, dan tekanan gas produk fisi di dalam pin bahan bakar perlu didesain sedemikian rupa sehingga hanya matriks bahan bakar dengan cacat saat pabrikan yang tidak terdeteksi saja yang akan mengalami kegagalan berupa kebocoran pada saat terjadi kecelakaan akibat penurunan tekanan pada fluida pendingin.

Titik lepasan fraksi produk fisi ke atmosfer sangat tergantung pada lokasi kebocoran terjadi. Pada beberapa titik tempat kebocoran besar dapat terjadi, saluran gas panas telah disediakan untuk mengalirkan gas ke atmosfer atau udara yang berada di bawah atap gedung reaktor. Di beberapa titik lain, gas dibuang ke atmosfer yang berada di atas atap gedung reaktor melalui sistem ventilasi pembuangan udara untuk udara yang terkontaminasi. Pelepasan gas ke atmosfer tersebut disaring dengan peralatan filter HEPA. Namun demikian, dikarenakan efisiensi penangkapan gas yang terlepas ke atmosfer tidak sepenuhnya dapat dijamin, maka secara praktis dapat dianggap bahwa gas yang terlepas ke atmosfer tidak dapat didekontaminasi oleh filter HEPA. Oleh karena itu, dengan tidak memperhitungkan faktor filtrasi oleh filter HEPA, maka perhitungan yang dilakukan dapat diklaim sebagai sangat konservatif.

II.3 REAKTOR BERPENDINGIN AIR BERAT

Reaktor yang menggunakan air berat (deuterium oksida) sebagai moderator, baik pendingin maupun moderatornya memiliki potensi lepasan zat radioaktif yang sama dengan lepasan akibat kecelakaan pada reaktor LWR sebagaimana telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Untuk reaktor dengan sistem tabung bertekanan, analisis kecelakaan akibat kehilangan

fluida pendingin perlu menyertakan pula kemungkinan pecahnya tabung tekan, dan pecahnya ujung ataupun bagian tengah pipa. Perlu dicermati bahwa pecahnya tabung bertekanan bersamaan dengan pecahnya ujung ataupun bagian tengah pipa tidak diperlukan atau dipertimbangkan dalam analisis kecelakaan dasar desain. Namun demikian, kecelakaan yang melibatkan tabung pembangkit uap atau tabung penukar panas harus dianalisis.

Air berat di dalam reaktor yang sedang beroperasi berisi tritium yang merupakan produk aktivasi terhadap deuterium. Tritium yang ada berbentuk oksida (dalam bentuk air) dan biasanya tidak menjadi parameter yang penting dalam potensi bahaya radioaktif ke masyarakat umum setelah kejadian kecelakaan. Namun demikian, keberadaan tritium perlu diperhitungkan untuk perlindungan terhadap personel yang berada di lokasi selama dan setelah kecelakaan berlangsung.

II.4 REAKTOR DENGAN PENGISIAN-ULANG BAHAN BAKAR DALAM KEADAAN BEROPERASI

Untuk reaktor dengan kemampuan pengisian-ulang bahan bakar selama operasi berlangsung, perlu dipertimbangkan kemungkinan kecelakaan sebagai akibat kegagalan pada pelaksanaan pengisian-ulang, baik pada saat mesin pengisian bahan bakar terhubung ke teras reaktor atau ketika bahan bakar bekas sedang dipindahkan dari teras reaktor menuju kolam penyimpanan sementara. Tingkat keparahan akibat kecelakaan yang ditimbulkan kurang lebih sama dengan atau lebih kecil dari tingkat keparahan akibat kecelakaan berupa hilangnya sebagian kecil fluida pendingin. Tingkat keparahan akan sangat tergantung lokasi kegagalan terjadi dan rentang waktu yang terjadi setelah pemindahan bahan bakar dari teras reaktor.

II.5 KECELAKAAN LAINNYA

Daerah di dalam reaktor nuklir tempat kejadian awal terpostulasi yang dapat menimbulkan lepasan zat radioaktif ke lingkungan hidup meliputi:

- 1) daerah penanganan bahan bakar nuklir bekas (termasuk mesin pengisian bahan bakar, tempat penyimpanan kering bahan bakar nuklir bekas, ruang pembongkaran bahan bakar, kolam penyimpanan bahan bakar bekas, dan saluran untuk pemuatan bahan bakar ke dalam bungkusan yang akan diangkut);

- 2) instalasi pengolahan limbah cair dan gas;
- 3) instalasi untuk pengolahan dan pendinginan air kolam bahan bakar;
- 4) instalasi pengolahan fluida pendingin;
- 5) tempat penyimpanan limbah radioaktif padat;
- 6) tempat penyimpanan serpihan bahan bakar nuklir; dan
- 7) filter ventilasi.

KEPALA BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR
REPUBLIK INDONESIA,

J.E. Istiyanto

JAZI EKO ISTIYANTO