

**RANCANGAN**  
**PERATURAN KEPALA BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR**  
**NOMOR ..... TAHUN .....**  
**TENTANG**  
**ASPEK PROTEKSI RADIASI DALAM DESAIN REAKTOR DAYA**

**DENGAN RAHMAT TUHAN YANG MAHA ESA**

**KEPALA BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR,**

- Menimbang : a. bahwa dalam rangka mendukung pelaksanaan 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 Kepala BAPETEN tersendiri;
- b. berdasarkan pertimbangan sebagaimana dimaksud dalam huruf a, perlu menetapkan Peraturan Kepala 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 Nomor 3676);
2. Peraturan Pemerintah Nomor 54 Tahun 2012 tentang Keselamatan dan Keamanan Instalasi Nuklir.

MEMUTUSKAN :

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

## **BAB I**

### **KETENTUAN UMUM**

#### Pasal 1

Dalam Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir ini yang dimaksud dengan:

1. Badan Pengawas Tenaga Nuklir yang selanjutnya disingkat BAPETEN adalah instansi yang bertugas melaksanakan pengawasan melalui peraturan, perizinan, dan inspeksi terhadap segala kegiatan pemanfaatan 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, *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 batasan keselamatan (*safety margin*) yang memadai terhadap nilai pembatas dosis tahunan.
12. Kecelakaan Nuklir adalah setiap kejadian atau rangkaian kejadian yang menimbulkan kerugian nuklir.

## Pasal 2

Peraturan Kepala BAPETEN mengenai persyaratan aspek Proteksi Radiasi dalam Desain Reaktor Daya ini merupakan panduan dalam rangka pengajuan:

- a. persetujuan desain terhadap suatu Desain Reaktor Daya yang akan dikonstruksi;
- b. persetujuan perubahan desain terhadap suatu Desain Reaktor Daya yang sedang dikonstruksi;
- c. persetujuan Modifikasi terhadap suatu Desain Reaktor Daya terbangun yang sedang menjalani tahap Komisioning; dan
- d. persetujuan Modifikasi terhadap suatu Desain Reaktor Daya terbangun yang sedang menjalani tahap Operasi.

## **BAB II**

### **PERSETUJUAN DESAIN REAKTOR DAYA**

## Pasal 3

- (1) Pemegang Izin harus memperoleh persetujuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 dari Kepala BAPETEN untuk:
  - a. perancangan Desain Reaktor Daya yang akan dikonstruksi, sebelum pengajuan permohonan izin konstruksi;
  - b. perubahan terhadap Desain Reaktor Daya yang sedang dikonstruksi;
  - c. Modifikasi terhadap Desain Reaktor Daya terbangun yang sedang menjalani tahap Komisioning; atau
  - d. Modifikasi terhadap Desain Reaktor Daya terbangun yang sedang menjalani tahap Operasi.
- (2) Desain Reaktor Daya sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus mencakup aspek Proteksi Radiasi yang menjadi bagian tidak terpisahkan dari dokumen Laporan Analisis

Keselamatan.

Pasal 4

- (1) Desain Reaktor Daya dari aspek Proteksi Radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 ayat (2) paling kurang harus mencakup analisis mengenai:
  - a. pertimbangan umum aspek Proteksi Radiasi;
  - b. Proteksi Radiasi terhadap personil di dalam tapak Reaktor Daya;
  - c. Proteksi Radiasi terhadap anggota masyarakat di sekitar tapak Reaktor Daya;
  - d. pemantauan radiasi dan kontaminasi; dan
  - e. perencanaan dan perancangan fasilitas bantu.
- (2) Analisis sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus memperhatikan seluruh kebutuhan pertimbangan aspek Proteksi Radiasi pada setiap tahapan pembangunan, pengoperasian dan Dekomisioning Reaktor Daya.
- (3) Tahapan pembangunan, pengoperasian, dan Dekomisioning Reaktor Daya sebagaimana dimaksud pada ayat (2) meliputi tahap:
  - a. prakonstruksi;
  - b. Konstruksi;
  - c. Komisioning;
  - d. Operasi; dan
  - e. Dekomisioning.

**BAB III**

**PERTIMBANGAN UMUM ASPEK PROTEKSI RADIASI**

Bagian Kesatu

Umum

Pasal 5

Pertimbangan umum aspek Proteksi Radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 4 ayat (1) huruf a harus diterapkan dengan mempertimbangkan:

- a. tujuan keselamatan desain;
- b. sumber radiasi;
- c. 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 6

Tujuan keselamatan desain sebagaimana dimaksud dalam Pasal 5 huruf a harus memastikan bahwa:

- a. dalam kondisi Operasi dan Dekomisioning:
  1. paparan radiasi di dalam maupun di luar instalasi Reaktor Daya tidak melampaui nilai pembatas dosis yang ditetapkan; dan
  2. 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.
- b. dalam kondisi terjadi Kecelakaan Nuklir, penanggulangan konsekuensi radiologi yang terjadi dapat diterapkan dengan baik.

Bagian Ketiga  
Sumber Radiasi

Paragraf 1

Umum

## Pasal 7

- (1) Pertimbangan mengenai sumber radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 5 huruf b harus ditentukan pada saat Desain Reaktor Daya untuk kondisi:
  - a. Operasi;
  - b. selama proses Dekomisioning; dan
  - c. apabila terjadi Kecelakaan Nuklir.
- (2) Pertimbangan sebagaimana dimaksud pada ayat (1) bertujuan untuk memastikan setiap personil tidak menerima paparan radiasi secara kontak langsung.
- (3) Tujuan sebagaimana dimaksud pada ayat (2) dapat dicapai dengan melakukan tindakan, antara lain:
  - a. identifikasi sumber radiasi;
  - b. pengendalian penyebaran sumber radiasi;
  - c. penanganan sumber radiasi yang tidak dimungkinkan mempergunakan penahan radiasi;
  - d. pencegahan dan minimalisasi sumber radiasi yang berpotensi menimbulkan limbah radioaktif dan/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 8

Identifikasi sumber radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 7 ayat (3) huruf a, diterapkan untuk kondisi:

- a. Operasi;
- b. selama proses Dekomisioning; dan
- c. apabila terjadi Kecelakaan Nuklir.

#### Pasal 9

- (1) Identifikasi sumber radiasi untuk kondisi Operasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 8 huruf a, meliputi antara lain 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 8 huruf b meliputi antara lain 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) Uraian lebih lanjut 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 Kepala BAPETEN ini.

## Pasal 10

- (1) Identifikasi sumber radiasi apabila terjadi Kecelakaan Nuklir, sebagaimana dimaksud dalam Pasal 8 huruf c, harus mengutamakan sumber produk fisi radioaktif.
- (2) Besar, lokasi, mekanisme, dan rute perpindahan produk fisi radioaktif sebagaimana dimaksud pada ayat (1) yang berpotensi mengakibatkan paparan radiasi pada saat terjadi Kecelakaan Nuklir harus ditentukan pada tahapan Desain Reaktor Daya.
- (3) Uraian lebih lanjut 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 Kepala BAPETEN ini.

## Paragraf 3

## Pengendalian Penyebaran Sumber Radiasi

## Pasal 11

Fitur Desain untuk pengendalian penyebaran sumber radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 7 ayat (3) huruf b harus memperhatikan beberapa aspek penting, meliputi:

- 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 penahan radiasi.

## Pasal 12

- (1) Pengendalian penyebaran sumber radiasi dari dalam teras reaktor dan instalasi sekitarnya sebagaimana dimaksud

dalam Pasal 11 huruf a harus dilakukan berdasarkan analisis kekuatan sumber radiasi, mencakup paling kurang:

- a. laju fisi;
- b. laju pancaran neutron dan radiasi gamma; 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 netronik 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 13

(1) Pengendalian penyebaran sumber radiasi dari struktur, sistem, dan komponen reaktor sebagaimana dimaksud dalam Pasal 11 huruf b paling kurang harus dilakukan terhadap:

- a. bahan bakar nuklir bekas;
- b. batang kendali;
- c. sumber neutron;
- d. alat instrumentasi di dalam teras reaktor (*in-core instruments*); dan
- e. peralatan lain di dalam reaktor.

(2) Dasar desain untuk penahan radiasi terhadap sumber radiasi yang terdapat di dalam struktur, sistem, dan komponen reaktor sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus didasarkan terhadap aktivitas maksimum yang dapat terjadi

sepanjang masa Operasi Reaktor Daya.

#### Pasal 14

Pengendalian penyebaran sumber radiasi pada bahan pendingin teraktivasi atau terkontaminasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 11 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 15

- (1) Pengendalian penyebaran sumber radiasi dengan penerapan pemisahan sumber radiasi menggunakan bahan struktur, sistem, dan komponen sebagai penahan radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 11 huruf d harus dilakukan dengan memperhitungkan daya tembus radiasi gamma dan neutron melalui, antara lain:
  - a. perisai sederhana dengan material tunggal;
  - b. beberapa lapis perisai dengan geometri kompleks dan terdapat bahan perisai dengan densitas rendah; dan
  - c. bahan dengan atenuasi rendah yang menyebabkan jalur paparan akibat adanya hamburan permukaan.
- (2) Perhitungan daya tembus radiasi gamma 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 penahan 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 Penahan Radiasi

#### Pasal 16

Fitur Desain untuk penanganan sumber radiasi yang tidak dimungkinkan mempergunakan penahan radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 7 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 17

Fitur Desain untuk pencegahan dan minimalisasi timbulnya sumber radiasi yang memberikan dosis secara dominan pada saat dekomisioning sebagaimana dimaksud dalam Pasal 7 ayat (3) huruf d harus dilakukan dengan cara, antara lain:

- 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 18

- (1) Fitur Desain untuk penanganan sumber radiasi dengan sifat bahaya khusus sebagaimana dimaksud dalam Pasal 7 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), antara lain 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 19

- (1) Fitur Desain untuk penanganan sumber radiasi yang memberikan dosis secara dominan terhadap masyarakat umum sebagaimana dimaksud dalam Pasal 7 ayat (3) huruf f

terdiri atas, paling kurang:

- 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, antara lain:

- a. gas mulia, meliputi  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ , dan  $^{133}\text{Xe}$  karena bersifat inert serta tidak berinteraksi dengan materi dan tidak dapat dipisahkan dalam sistem pemurnian sehingga berpotensi terlepas dalam volume besar;
- b.  $^3\text{H}$ , dan  $^{14}\text{C}$  karena inefisiensi pemisahan pada sistem pengolahan limbah radioaktif dan limbah radioaktif berumur paruh panjang; dan
- c. iodium, cesium, dan produk korosi.

### Bagian Ketiga

#### Penerapan Prinsip Limitasi dan Optimisasi

##### Pasal 20

(1) Penerapan prinsip limitasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 5 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 Kepala BAPETEN tersendiri.

#### Pasal 21

- (1) Penerapan prinsip optimisasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 5 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 ALARA (*as low as reasonably achievable*).

#### Pasal 22

- (1) Berdasarkan identifikasi sumber radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 8, nilai batas dosis sebagaimana dimaksud dalam Pasal 20 ayat (1), dan nilai pembatas dosis tahunan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 21 ayat (1) harus

ditetapkan nilai Dosis Target Desain;

- (2) Penetapan nilai Dosis Target Desain sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus memperhitungkan toleransi batasan keselamatan (*safety margin*) 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 Keempat

Pendekatan Desain untuk Tahap Operasi dan Dekomisioning

##### Pasal 23

Pendekatan desain untuk tahap Operasi dan Dekomisioning sebagaimana dimaksud dalam Pasal 5 huruf d harus mempertimbangkan:

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

##### Pasal 24

- (1) Sumber daya manusia sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23 huruf a harus memiliki keahlian yang memadai untuk mendukung perencanaan dan pembuatan Desain Reaktor Daya.
- (2) Sumber daya manusia sebagaimana dimaksud pada ayat (1), meliputi antara lain:
  - a. ahli proteksi radiasi;
  - b. ahli reaktor nuklir, terdiri atas:
    1. ahli netronik;
    2. ahli termohidraulik;

3. ahli keselamatan reaktor;
  4. ahli instrumentasi reaktor nuklir; dan
  5. ahli manajemen kecelakaan nuklir.
- c. ahli radiokimia;
  - d. ahli material;
  - e. ahli 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 bahan radioaktif di dalam instalasi maupun ke lingkungan sekitar;
  - b. evaluasi terhadap sumber-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 *in-service inspection*.
- (4) Dalam pembuatan Desain Reaktor Daya, ahli radiokimia sebagaimana dimaksud pada ayat (2) huruf b 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 c memberikan pertimbangan utama dalam hal pemilihan material untuk menahan radiasi, mendukung kekuatan struktur bangunan, dan pengendalian penyebaran sumber radiasi.

#### Pasal 25

- (1) Pengorganisasian desain sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23 huruf b harus direncanakan dengan cermat berdasarkan saran pertimbangan dari seluruh sumber daya manusia yang kompeten sebagaimana dimaksud dalam Pasal 24 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;
  - 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 26

Strategi desain sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23 huruf c

harus ditetapkan mencakup:

- a. pendekatan umum;
- b. desain proteksi radiasi untuk pekerja; dan
- c. desain proteksi radiasi untuk anggota masyarakat umum.

#### Pasal 27

- (1) Pendekatan umum dalam strategi desain sebagaimana dimaksud dalam Pasal 26 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 28

Strategi desain proteksi radiasi untuk pekerja radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 26 huruf b harus dilaksanakan dengan penerapan pertimbangan Fitur Desain untuk:

- a. pengendalian paparan radiasi semenjak awal desain secara logis;
- b. minimalisasi produksi dan *build up* radionuklida;
- c. pembagian tata letak instalasi (*layout*) 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 personil 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 29

- (1) Pengendalian paparan radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 28 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, antara lain:
  - 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, antara lain:

- a. penggunaan peralatan berstandar tinggi untuk menjamin kehandalan 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 30

- (1) Khusus untuk desain reaktor daya berpendingin air berat (*Pressurized Heavy Water Reactor, PHWR*), selain mempertimbangkan ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 28 dan Pasal 29, Fitur Desain yang berkaitan dengan tata letak (*layout*) harus dirancang dalam pembagian zona kerja berdasarkan tingkat kontaminasi radionuklida  $^3\text{H}$  (*thritium*) di udara.
- (2) Penanganan dan pengendalian radionuklida  $^3\text{H}$  (*thritium*) sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus mendapatkan perhatian khusus.

#### Pasal 31

- (1) Strategi desain proteksi radiasi untuk anggota masyarakat umum sebagaimana dimaksud dalam Pasal 26 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, antara lain:
- a. identifikasi seawal mungkin terhadap fitur-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-pilihan pendekatan desain yang lain.

#### Bagian Keempat

#### Pendekatan Desain untuk Kondisi Kecelakaan Nuklir

#### Pasal 32

Pendekatan desain untuk kondisi Kecelakaan Nuklir sebagaimana dimaksud dalam Pasal 5 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 33

- (1) Tujuan desain sebagaimana dimaksud dalam Pasal 32 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 (*design basis accidents*); dan
  - b. asumsi realistis atau perkiraan terbaik (*best estimation*) pada analisis kecelakaan parah (*severe accidents*).

### Pasal 34

- (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), antara lain 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 IV**  
**PROTEKSI RADIASI TERHADAP PERSONIL DI DALAM TAPAK**  
**REAKTOR DAYA**

Bagian Kesatu

Umum

Pasal 35

- (1) Proteksi radiasi terhadap personil di dalam tapak Reaktor Daya sebagaimana dimaksud dalam Pasal 4 ayat (1) huruf b, meliputi proteksi untuk:
  - a. personil pekerja radiasi; dan
  - b. personil nonpekerja radiasi.
- (2) Personil pekerja radiasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) huruf a, meliputi antara lain:
  - 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) Personil nonpekerja radiasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) huruf b merupakan personil pekerja yang memiliki potensi penerimaan dosis radiasi kurang dari 1 mSv dalam satu tahun.

Pasal 36

- (1) Proteksi radiasi terhadap personil sebagaimana dimaksud dalam Pasal 35 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 Personil untuk Kondisi Operasi dan selama Proses Dekomisioning

#### Paragraf 1

#### Umum

#### Pasal 37

Proteksi radiasi terhadap personil untuk kondisi Operasi dan selama proses Dekomisioning sebagaimana dimaksud dalam Pasal 35 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 38

Fitur Desain untuk tindakan perancangan pengendalian sumber radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 37 huruf a harus diterapkan terhadap:

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

## Pasal 39

- (1) Pengendalian sumber radiasi berupa produk fisi radioaktif sebagaimana dimaksud dalam Pasal 38 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 40

- (1) Terbentuknya produk korosi teraktivasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 38 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. meminimalisasi 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 *start up* dan pendinginan Reaktor Daya.

#### Pasal 41

- (1) Desain sistem pengendalian aktivitas air sediaan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 38 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 42

- (1) Fitur Desain untuk tindakan perancangan tata letak instalasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 37 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 43

- (1) Penerapan klasifikasi dan zonasi daerah kerja sebagaimana dimaksud dalam Pasal 42 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 diatur dalam Peraturan Kepala BAPETEN tersendiri.

#### Pasal 44

- (1) Penerapan pengendalian akses dan hunian sebagaimana dimaksud dalam Pasal 42 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 interlok;
- 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 45

Fitur Desain untuk tindakan perancangan struktur, sistem, dan komponen sebagaimana dimaksud dalam Pasal 37 huruf c harus diterapkan berdasarkan umpan balik dari pengalaman yang diperoleh dalam pengurangan penerimaan paparan radiasi pada instalasi Reaktor Daya yang beroperasi.

#### Pasal 46

Langkah-langkah pengurangan penerimaan paparan radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 45 yang dapat diadopsi dalam desain sistem, antara lain:

- 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 perlu

dipasang 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 47

Berkaitan dengan sistem perpipaan, pendekatan Fitur Desain instalasi yang dapat diterapkan dalam perancangan, antara lain:

- a. pengaturan jarak yang memadai dalam pemasangan atau penempatan antara pipa yang berisi cairan radioaktif dengan pipa non-radioaktif, maupun dengan 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 kesesuaian aliran fluida dan pengendalian sifat kimia agar penumpukan tak terkendali partikel radioaktif dapat dicegah;
- d. jalur bukaan dan drainase yang tidak terlalu banyak;
- e. meminimalisir keberadaan sambungan pengelasan yang memerlukan inspeksi rutin; dan
- f. menghindari keberadaan sistem perpipaan yang menyebabkan terjadinya stagnasi cairan dan timbulnya pengendapan atau pengumpulan produk korosi teraktivasi.

#### Pasal 48

Langkah-langkah pengurangan penerimaan paparan radiasi

sebagaimana dimaksud dalam Pasal 46 yang dapat diadopsi dalam desain komponen, antara lain:

- a. pemilihan dan penggunaan komponen dengan kehandalan 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. pemeliharaan dan perbaikan komponen yang mengakibatkan paparan radiasi tinggi harus dipisahkan dari komponen lain.

#### Paragraf 5

#### Penerapan Teknik Jarak Jauh

#### Pasal 49

- (1) Fitur Desain untuk tindakan perancangan penerapan teknik jarak jauh sebagaimana dimaksud dalam Pasal 37 huruf d harus diterapkan untuk meminimalisasi penerimaan paparan radiasi oleh pekerja radiasi, baik untuk kondisi Operasi maupun dalam pelaksanaan Dekomisioning.
- (2) Penerapan teknik jarak jauh sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus mempertimbangkan kebutuhan pemindahan, pemasangan, dan pengoperasian peralatan dari jarak jauh.

#### Pasal 50

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 51

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

#### Paragraf 6

#### Fasilitas Dekontaminasi

#### Pasal 52

- (1) Fitur Desain untuk tindakan perancangan fasilitas dekontaminasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 37 huruf e harus mempertimbangkan adanya potensi kontaminasi zat radioaktif terhadap:
  - a. peralatan dan/atau perlengkapan kerja;
  - b. ruangan kerja; dan
  - c. personil.
- (2) Rancangan fasilitas dekontaminasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus menerapkan ketentuan sebagai berikut:
  - a. penggunaan lapisan khusus pada permukaan lantai dan dinding yang mudah didekontaminasi;
  - b. penanggulan dan pemiringan permukaan lantai yang memadai; dan
  - c. penyediaan sistem pengurasan, pengumpulan dan penampungan cairan hasil dekontaminasi secara cepat dan tepat.

#### Pasal 53

- (1) Perhatian khusus harus diterapkan pada ruangan kerja yang memiliki potensi adanya kebocoran atau tumpahan cairan radioaktif.
- (2) Ruangan kerja sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus memenuhi ketentuan rancangan fasilitas dekontaminasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 52 ayat (2).

#### Pasal 54

Selain pelaksanaan dekontaminasi pada fasilitas dekontaminasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 52 dan ruangan kerja sebagaimana dimaksud dalam Pasal 53 ayat (1), Fitur Desain juga harus mempertimbangkan kebutuhan dekontaminasi atau pemurnian pada beberapa sistem atau fasilitas sebagai berikut:

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

#### Paragraf 7

#### Penerapan Perisai Radiasi

#### Pasal 55

- (1) Fitur Desain untuk tindakan perancangan penerapan perisai radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 37 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 56

- (1) Pemilihan bahan untuk perisai radiasi harus mempertimbangkan:
- a. sifat radiasi, meliputi:
    1. keberadaan radiasi beta dan *bremstrahlung*;
    2. neutron dan sinar gamma; dan/atau
    3. sinar gamma saja;
  - b. sifat bahan perisai, 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 perisai radiasi harus diantisipasi sejak perancangan, antara lain akibat adanya:
- a. potensi aktivasi pada bahan yang memiliki tampang serap neutron tinggi;
  - b. radiolisis dan penggetasan;
  - c. erosi dan korosi oleh fluida pendingin; atau
  - d. pengaruh temperatur yang menyebabkan pelepasan gas maupun uap air; dan
  - e. pengaruh gaya eksternal, seperti getaran, seismik.
- (3) Kombinasi bahan harus dipertimbangkan untuk mendapatkan desain perisai radiasi yang optimal.

#### Pasal 57

Keberadaan radiasi sekunder yang timbul akibat proses serapan

netron harus dapat diserap oleh bahan perisai.

#### Pasal 58

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

#### Pasal 59

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, antara lain:

- 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 60

- (1) Fitur Desain untuk tindakan perancangan penerapan sistem ventilasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 37 huruf g harus diperhitungkan untuk tujuan:

- a. menjaga kondisi bersih di dalam ruangan kerja secara memadai;
  - b. mengendalikan kontaminasi radionuklida di udara lingkungan kerja;
  - c. mengurangi kebutuhan pemakaian perlengkapan pelindung pernafasan; dan
  - d. mencegah jumlah pelepasan radionuklida ke lingkungan hidup.
- (2) Rancangan sistem ventilasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus mempertimbangkan hal-hal sebagai berikut:
- a. mekanisme pencampuran secara termal dan mekanik;
  - b. efektivitas pengenceran dalam mengurangi pencemaran udara;
  - c. pembuangan udara dari ruangan atau daerah kontaminasi; dan
  - d. jarak aman antara titik pelepasan udara dengan titik asupan sistem ventilasi.

#### Pasal 61

- (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.
- (2) Aliran udara sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus diciptakan untuk meminimalisasi potensi terjadinya pencampuran kontaminan.

#### Pasal 62

- (1) Fitur Desain harus dapat mengantisipasi adanya kebutuhan sistem ventilasi nonpermanen untuk diterapkan pada daerah

dimana 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 tenda.

#### Paragraf 9

#### Pengelolaan Limbah Radioaktif

#### Pasal 63

- (1) Fitur Desain untuk perancangan tindakan pengelolaan limbah radioaktif sebagaimana dimaksud dalam Pasal 37 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 64

- (1) Fitur Desain untuk fasilitas penyimpanan sementara limbah radioaktif sebagaimana dimaksud dalam Pasal 63 ayat (1) huruf d harus menerapkan beberapa fungsi sebagai berikut:
  - a. mempertahankan pengisolasian terhadap limbah yang dikelola;
  - b. mempertahankan kondisi subkritikalitas 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 kerusakan perangkat elektronik;
  - c. ketahanan terhadap dampak beban operasional, insiden, maupun kecelakaan; dan
  - d. ketahanan terhadap efek termal;
  - e. potensi pembangkitan gas akibat efek kimiawi dan radiolisis;
  - f. potensi timbulnya bahan mudah terbakar atau korosif; dan
  - g. potensi percepatan korosi logam.

#### Pasal 65

Fitur Desain untuk fasilitas penyimpanan sementara limbah radioaktif sebagaimana dimaksud dalam Pasal 64 harus mengantisipasi kemungkinan terjadinya insiden dan kecelakaan.

#### Pasal 66

Untuk kebutuhan sistem keamanan atau proteksi fisik, Fitur Desain fasilitas pengelolaan limbah radioaktif harus dirancang

dengan pengamanan kunci dan/atau interlok yang memadai.

#### Pasal 67

- (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 Personil untuk Kondisi Kecelakaan Nuklir

#### Pasal 68

- (1) Proteksi radiasi terhadap personil untuk kondisi apabila terjadi Kecelakaan Nuklir sebagaimana dimaksud dalam Pasal 36 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 (*severe accidents*).

#### Pasal 69

- (1) Fitur Desain proteksi radiasi terhadap personil untuk kondisi apabila terjadi Kecelakaan Nuklir sebagaimana dimaksud dalam Pasal 68 harus dapat menjamin keselamatan semua

personil di dalam instalasi Reaktor Daya jika terjadi Kecelakaan Nuklir atau kejadian kedaruratan radiologis.

- (2) Fitur Desain sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus mencakup perancangan untuk:
  - a. akses penyelamatan dan titik kumpul (*assembly points*);
  - 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 pasca kecelakaan; dan
  - g. pengambilan sampel gas dan cairan pasca kecelakaan.

#### Pasal 70

- (1) Akses penyelamatan dan titik kumpul sebagaimana dimaksud dalam Pasal 69 ayat (2) huruf a harus dirancang untuk memastikan setiap personil 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 personil 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 personil yang tidak terlibat sebagai petugas penanggulangan selama kegiatan penanggulangan dilaksanakan.

## Pasal 71

- (1) Area dapat huni di dalam instalasi Reaktor Daya untuk keperluan kesiapsiagaan dan pengendalian kecelakaan nuklir sebagaimana dimaksud di dalam Pasal 69 ayat (2) huruf b, paling kurang meliputi:
  - a. ruang pengendalian;
  - 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 penanggulangan kedaruratan dilaksanakan.

## Pasal 72

- (1) Identifikasi kondisi bahaya terantisipasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 69 ayat (2) huruf c harus diprioritaskan untuk melindungi petugas kedaruratan (*emergency worker*) yang melakukan respon 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 kontinyu;
- 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 73

- (1) Penerapan perisai radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 69 ayat (2) huruf d harus dapat menjamin personil maupun petugas kedaruratan dapat mengakses dan menempati ruang pengendalian atau titik 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 keterjangkauan untuk melakukan perawatan dan perbaikan peralatan kedaruratan yang diperlukan pasca kejadian Kecelakaan Nuklir.
- (3) Penerapan perisai radiasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dan ayat (2) harus diatur sedemikian rupa untuk mengurangi intervensi secara langsung oleh personil.
- (4) Tindakan pengurangan intervensi secara langsung sebagaimana dimaksud pada ayat (3) dapat dilakukan antara lain dengan pemasangan peralatan kendali otomatis atau kendali jarak jauh.

#### Pasal 74

- (1) Minimalisasi penyebaran kontaminasi radionuklida ke udara sebagaimana dimaksud dalam Pasal 69 ayat (2) huruf e harus

diterapkan pada, antara lain:

- a. bangunan reaktor;
- b. tempat penyimpanan bahan bakar;
- c. ruang kendali reaktor; dan
- d. titik kendali tambahan.

(2) Tindakan minimalisasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dapat dicapai antara lain dengan:

- a. penutupan jalur masuk dan keluar udara;
- b. penerapan sistem resirkulasi pendinginan udara yang dilengkapi dengan perlengkapan filter yang memadai;
- c. penggunaan pengungkuh ganda; dan/atau
- d. pemberian jalur pembuangan ke atmosfer melalui cerobong udara yang dilengkapi dengan filter yang memadai.

#### Pasal 75

Antisipasi paparan radiasi pasca kecelakaan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 69 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 76

Pengambilan sampel gas dan cairan pasca kecelakaan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 69 ayat (2) huruf g harus mempertimbangkan prosedur dan instruksi kerja untuk memastikan petugas sampling mengambil dan memeriksa sampel tanpa mengakibatkan paparan radiasi berlebih.

**BAB V**  
**PROTEKSI RADIASI TERHADAP ANGGOTA MASYARAKAT DI**  
**SEKITAR TAPAK REAKTOR DAYA**

Bagian Kesatu

Umum

Pasal 77

- (1) Proteksi Radiasi terhadap anggota masyarakat di sekitar tapak Reaktor Daya sebagaimana dimaksud dalam dalam Pasal 4 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 78

Proteksi Radiasi terhadap anggota masyarakat di sekitar tapak Reaktor Daya untuk kondisi Operasi dan selama proses Dekomisioning sebagaimana dimaksud dalam Pasal 77 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 79

- (1) Fitur Desain untuk perancangan penerapan perisai radiasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 78 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 kurang berisi:
  - a. tanda bahaya radiasi; dan
  - b. informasi pendukung yang memadai.

#### Pasal 80

- (1) Fitur Desain untuk perancangan pelepasan radionuklida sebagaimana dimaksud dalam Pasal 78 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 kajian keselamatan radiasi dan lingkungan hidup yang paling kurang 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; dan
- 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 Kepala BAPETEN tersendiri.

#### Pasal 81

- (1) Fitur Desain untuk perancangan minimalisasi lepasan limbah radioaktif sebagaimana dimaksud dalam Pasal 78 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 82

- (1) Rancangan sistem pengolahan limbah cair sebagaimana dimaksud dalam Pasal 81 ayat (2) huruf a harus diterapkan terhadap sumber utama air terkontaminasi, meliputi antara lain:
  - 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, antara lain:
  - 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, antara lain:
  - a. filtrasi mekanik;
  - b. penukaran ion;
  - c. sentrifugasi; dan/atau
  - d. destilasi dan pengendapan kimia.

## Pasal 83

- (1) Rancangan sistem penampungan dan pengolahan gas sebagaimana dimaksud dalam Pasal 81 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 iodium; 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 menggunakan peralatan kriogenik dengan pemilihan dan desain yang sesuai.
- (4) Keberadaan isotop iodium 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 84

- (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 nilai batas lepasan radioaktivitas ke lingkungan dan baku tingkat radioaktivitas di lingkungan, serta tingkat klierens sebagaimana dimaksud pada ayat (1) diatur dalam Peraturan Kepala BAPETEN tersendiri.

#### Bagian Ketiga

Proteksi Radiasi terhadap Anggota Masyarakat di Sekitar Tapak

## Reaktor Daya untuk Kondisi Kecelakaan Nuklir

### Pasal 85

Proteksi Radiasi terhadap anggota masyarakat di sekitar tapak Reaktor Daya untuk kondisi apabila terjadi Kecelakaan Nuklir sebagaimana dimaksud dalam Pasal 77 huruf c harus mencakup penerapan Fitur Desain untuk tindakan antisipasi terhadap:

- a. kecelakaan dasar desain; dan
- b. kecelakaan parah.

### Pasal 86

- (1) Tindakan antisipasi terhadap kecelakaan dasar desain sebagaimana dimaksud dalam Pasal 85 huruf a harus berkesesuaian dengan target desain yang didasarkan 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 87

- (1) Analisis keselamatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 86 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 kurang meliputi:

- a. kondisi kecepatan angin ekstrim; dan
  - b. kondisi curah hujan ekstrim.
- (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 kurang 1 (satu) tahun dan mendapat persetujuan dari Kepala BAPETEN.

#### Pasal 88

- (1) Berdasarkan perhitungan potensi pelepasan material radioaktif ke atmosfer sebagaimana dimaksud dalam Pasal 87, 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 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 89

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 (*precautionary action zone*); dan

- b. zona perencanaan tindakan perlindungan mendesak (*urgent protective action planning zone*).

#### Pasal 90

- (1) Tindakan antisipasi terhadap kecelakaan parah sebagaimana dimaksud dalam Pasal 85 huruf b harus berkesesuaian dengan target desain yang didasarkan 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 91

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

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

- keluar pengungkung;
- e. pemasangan perisai pada posisi dimana 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 iodine (misalnya hidrasin hidrat), 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 92

Beberapa Fitur Desain yang berkaitan dengan keselamatan berdasarkan analisis keselamatan probabilistik harus dipertimbangkan pada desain, antara lain:

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

Pasal 93

- (1) Suatu pengaturan harus ditetapkan untuk memastikan informasi yang relevan direkam dan disimpan selama dan sesudah Kecelakaan Nuklir.
- (2) Informasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus dapat digunakan:
  - a. selama keadaan darurat;
  - b. untuk evaluasi pasca kedaruratan;
  - c. untuk pemantauan kesehatan jangka panjang; dan
  - d. untuk tindak lanjut evaluasi petugas kedaruratan dan anggota masyarakat yang berpotensi terkena dampak.

**BAB VI**

**PEMANTAUAN RADIASI DAN KONTAMINASI**

Bagian Kesatu

Umum

Pasal 94

- (1) Pemantauan radiasi dan kontaminasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 4 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 95

Pemantauan radiasi dan kontaminasi untuk kondisi Operasi dan selama proses Dekomisioning sebagaimana dimaksud dalam Pasal 94 huruf a dan huruf b, meliputi:

- a. pemantauan personil;
- b. pemantauan daerah kerja; dan
- c. pemantauan lingkungan hidup.

Paragraf 2

Pemantauan Personil

Pasal 96

- (1) Pemantauan personil sebagaimana dimaksud dalam Pasal 95 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) dapat berupa:
  - a. *thermoluminisense dosimeter (TLD) badge*;
  - b. *film badge*;
  - c. *radiophotoluminisense dosimeter badge*; atau
  - d. dosimeter pembacaan langsung.
- (3) Penggunaan peralatan pemantau dosis individu sebagaimana dimaksud pada ayat (2) harus mempertimbangkan beberapa faktor, antara lain:
  - a. kualifikasi personil;

- b. zonasi daerah kerja; dan
- c. kebutuhan pekerjaan.

### Paragraf 3

#### Pemantauan Daerah Kerja

##### Pasal 97

- (1) Pemantauan daerah kerja sebagaimana dimaksud dalam Pasal 95 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 98

Untuk daerah pengendalian, peralatan pemantau daerah kerja sebagaimana dimaksud dalam Pasal 97 harus dapat dioperasikan secara terus-menerus, serta dilengkapi dengan penampil hasil pembacaan yang dapat dibaca dengan mudah dan alarm peringatan yang sesuai.

##### Pasal 99

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

##### Pasal 100

- (1) Untuk Reaktor Daya berpendingin air ringan (*Light Water Reactor, LWR*), Fitur Desain sistem pemantauan paparan radiasi eksternal harus dipasang, paling kurang 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 101

- (1) Alat pemantau terpasang permanen untuk mendeteksi tingkat kontaminasi udara sebagaimana dimaksud dalam Pasal 97 ayat (1) huruf c harus dipasang pada lokasi yang sesuai di dalam instalasi Reaktor Daya.
- (2) Untuk Reaktor Daya berpendingin air ringan (*Light Water Reactor, LWR*), Fitur Desain sistem pemantauan tingkat kontaminasi udara harus dipasang pada saluran ventilasi untuk pembuangan udara, paling kurang pada:
  - a. pengungkung;

- b. fasilitas penyimpanan bahan bakar bekas;
  - c. bangunan fasilitas bantu (*auxiliary building*); dan
  - d. fasilitas pengolahan dan penyimpanan limbah radioaktif.
- (3) Untuk Reaktor Daya jenis air didih (*Boiling Water Reactor, BWR*), selain dipasang pada lokasi sebagaimana dimaksud pada ayat (2), Fitur Desain sistem pemantauan tingkat kontaminasi udara juga harus dipasang pada turbin.
- (4) 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 102

Pemantauan lingkungan hidup sebagaimana dimaksud dalam Pasal 95 huruf c harus dilakukan melalui pengukuran terhadap:

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

#### Pasal 103

- (1) Pemantauan terhadap pelepasan efluen dari instalasi Reaktor Daya berpendingin air harus dirancang dan diterapkan paling kurang 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 104

- (1) Peralatan untuk pemantauan terhadap pelepasan efluen dari instalasi Reaktor Daya sebagaimana dimaksud dalam Pasal 103 harus dirancang untuk menentukan aktivitas total dan komposisi nuklida lepasan.
- (2) Pemantauan terhadap pelepasan efluen sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dapat dirancang dengan penerapan sistem *on-line* dan analisis laboratorium.

#### Pasal 105

- (1) Fitur Desain untuk pemantauan di dalam dan di luar kawasan tapak instalasi Reaktor Daya sebagaimana dimaksud dalam Pasal 102 huruf b dan huruf c harus mempertimbangkan parameter, antara lain:
  - 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; dan
  - 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 pemrograman komputer (*computer code*) yang sesuai dan tervalidasi.

#### Paragraf 5

#### Sistem Pemantauan Radiasi dan Kontaminasi

#### Pasal 106

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. kehandalan alat, termasuk dalam situasi abnormal;
- i. respon terhadap kondisi berlebih;
- j. indikasi mode kegagalan; dan/atau
- k. potensi interferensi data, khususnya untuk pemantauan neutron, tritium, dan sumber radiasi beta.

#### Pasal 107

- (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. kelembaban;
  - d. getaran; dan
  - e. medan radiasi latar.

#### Pasal 108

- (1) Sistem pengukuran sebagaimana dimaksud dalam Pasal 107 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 penyimpan;
  - 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 kurang 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 109

- (1) Pemantauan radiasi dan kontaminasi untuk kondisi apabila terjadi Kecelakaan Nuklir sebagaimana dimaksud dalam Pasal 94 ayat (1) huruf b harus dapat diterapkan pada kondisi kejadian:
  - a. kecelakaan dasar desain (*design basic accidents*); dan
  - b. kecelakaan parah (*severe accidents*).
- (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 110

- (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. kelembaban;
  - 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 111

- (1) Data dan informasi hasil pemantauan radiasi dan kontaminasi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 110 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 personil di dalam instalasi Reaktor Daya;
  - b. penentuan klasifikasi tingkat kedaruratan;
  - c. perlindungan personil dan instalasi Reaktor Daya; dan
  - d. rekomendasi tindakan perlindungan anggota masyarakat di luar instalasi Reaktor Daya.

#### Pasal 112

- (1) Sistem komunikasi data dan informasi hasil pemantauan radiasi dan kontaminasi dari ruang kendali utama dan kendali darurat sebagaimana dimaksud dalam Pasal 111 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 113

- (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, satuan tanggap darurat, maupun pemangku kepentingan lainnya.

### **BAB VII**

#### **FASILITAS BANTU**

#### Pasal 114

- (1) Fasilitas bantu sebagaimana dimaksud dalam Pasal 4 ayat (1) huruf e harus menjadi bagian 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 radiologis 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 respon insiden atau keadaan darurat yang timbul, seperti infrastruktur penunjang evakuasi dan distribusi iodine.
- (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 115

Fitur Desain fasilitas bantu pada Reaktor Daya sebagaimana dimaksud dalam Pasal 114 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 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 116

- (1) Fitur Desain peralatan bantu sebagaimana dimaksud dalam Pasal 115 harus dapat mengakomodir kebutuhan penyediaan, penyimpanan, dan/atau penggunaan peralatan pendukung lainnya.
- (2) Peralatan pendukung lain sebagaimana dimaksud pada ayat (1) antara lain 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 117

Peraturan Kepala BAPETEN ini mulai berlaku pada tanggal diundangkan.

Agar setiap orang mengetahuinya, memerintahkan pengundangan Peraturan Kepala BAPETEN ini dengan

penempatannya dalam Berita Negara Republik Indonesia.

Ditetapkan di Jakarta  
Pada tanggal ..... 2017

KEPALA BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR

JAZI EKO ISTIYANTO

Diundangkan di Jakarta

Pada tanggal .....

Direktur Jenderal Peraturan Perundang-undangan  
KEMENTERIAN HUKUM DAN HAK ASASI MANUSIA

WIDODO EKATJAHJANA

BERITA NEGARA REPUBLIK INDONESIA TAHUN.... NOMOR....

LAMPIRAN I  
PERATURAN KEPALA BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR  
NOMOR: ..... TAHUN .....  
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 personil dan anggota masyarakat berupa isotop gas mulia, iodium, dan cesium. 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 gamma sebagai akibat proses fisi dan peluruhan produk fisi. Sinar gamma 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  $^{16}\text{N}$ , yang terbentuk akibat interaksi antar neutron cepat dengan  $^{16}\text{O}$  yang ada di dalam pendingin tersebut. Untuk reaktor dengan moderator air

berat, photoneutron dipancarkan dari interaksi sinar gamma 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 gamma 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 *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 gamma 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 dimana 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  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , dan  $^{59}\text{Fe}$ .

Dalam hal akses ke gedung reaktor diizinkan selama operasi reaktor, sumber-sumber radiasi lain termasuk  $^{41}\text{Ar}$ , udara terkontaminasi  $^3\text{H}$ , produk fisi yang volatil, dan gas mulia harus mendapatkan perhatian. Di dalam reaktor teknologi *Pressurized Water Reactor* (PWR), aktivasi terhadap  $^{40}\text{Ar}$  yang terkandung di udara merupakan sumber  $^{41}\text{Ar}$  yang merupakan sumber radiasi pemancar gamma. Meskipun laju dosis dari paparan eksternal rendah, namun keberadaan  $^{41}\text{Ar}$  tidak mungkin diabaikan apabila target laju dosis individual yang ditetapkan kurang dari  $10 \mu\text{Sv/jam}$ .  $^{41}\text{Ar}$

juga diproduksi dalam pendingin CO<sub>2</sub> pada reaktor berpendingin gas atau air berat yang mengandung gas helium, seperti pada sistem kontrol zona cair dan sistem gas penutup moderator. <sup>3</sup>H 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 *shut down*, sumber radiasi utama di sekitar bejana tekan adalah radiasi gamma 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 fotonetron akan menaikkan daya yang cukup signifikan dengan pancaran radiasi gamma 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 dengan 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 dengan tabung bertekanan, 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 CO<sub>2</sub>), sumber utama radiasi selama operasi reaktor adalah <sup>16</sup>N. <sup>16</sup>N dihasilkan dari interaksi antara neutron cepat dengan <sup>16</sup>O dalam pendingin yang melewati teras reaktor. <sup>16</sup>N merupakan radionuklida pemancar gamma yang kuat dengan energy antara 6 hingga 7 MeV. Dikarenakan <sup>16</sup>N 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 <sup>41</sup>Ar untuk reaktor berpendingin gas, <sup>19</sup>O dan <sup>18</sup>F untuk reaktor berpendingin air) dapat menjadi kontributor yang paling penting terhadap laju dosis radiasi. Untuk reaktor berteknologi PWR dimana waktu pendinginan untuk melintasi satu siklus sama besarnya dengan waktu paruh <sup>16</sup>N, maka isotop <sup>16</sup>N menjadi kontributor utama terhadap laju dosis di sekitar sirkuit utama selama masa operasi reaktor.

Dalam reaktor berpendingin air (khususnya lagi air berat), <sup>3</sup>H merupakan sumber penting terhadap paparan radiasi internal. Dalam reaktor perpendingin air ringan, <sup>3</sup>H sebagai HTO 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 <sup>3</sup>H 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 *grid* 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  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ , dan  $^{51}\text{Cr}$  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  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ , dan  $^{137}\text{Cs}$  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 personil 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 alpha pada pendingin atau sediaananya 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),  $^{16}\text{N}$  merupakan isotop sumber radiasi utama selama reaktor beroperasi. Dalam kondisi reaktor *shut down*, paparan radiasi di sekitar sistem pendingin primer berasal dari produk

korosi yang teraktivasi.  $^3\text{H}$  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 berpendingin air ringan yang masih menerapkan toleransi terhadap keberadaan kebocoran pada sistem pendingin atau moderator.

Untuk reaktor berteknologi PWR dimana material pada sistem pembangkitan uap berbahan dasar nikel, perubahan dari kondisi operasi menuju *shut down* 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  $80^{\circ}\text{C}$ . 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 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, 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 volumetric, 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 *shut down* 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 iodium dan caesium 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 dimana akumulasi produk fisi terjadi, akan menghasilkan aktivitas yang sangat tinggi dan memerlukan perisai radiasi. Gas mulia radioaktif sebagai hasil peluruhan isotop iodium dapat terbentuk pada filter. Pada reaktor berpendingin air berat, fotonetron dapat terbentuk dalam air berat dari  $^{16}\text{N}$ . Fotonetron tersebut menjadi sumber radiasi yang signifikan dalam menentukan persyaratan perisai radiasi dari sirkuit pendingin eksternal ke teras reaktor. Pada reaktor berpendingin gas, sistem pengolahan gas akan mengakumulasi produk korosi aktif (seperti  $^{58}\text{Co}$  dan

$^{60}\text{Co}$ ), serta produk fisi (seperti iodium dan caesium), yang akan menjadi sumber radiasi yang penting.

Untuk reaktor pembiak cepat berpendingin natrium cair, sumber radiasi yang dominan adalah  $^{22}\text{Na}$  dan  $^{24}\text{Na}$ . 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. Tritium yang dihasilkan pada bahan bakar melalui reaksi fisi berantai dilepaskan ke dalam pendingin primer melalui kelongsong stainless steel (melalui mekanisme difusi). Produk fisi, seperti iodium dan caesium, terlepas ke pendingin apabila terdapat cacat kelongsong. Pendingin Na mungkin digantikan dengan gas mulia seperti argon. Aktivasi terhadap gas argon tersebut menghasilkan  $^{39}\text{Ar}$  dan  $^{41}\text{Ar}$  yang dimungkinkan bocor ke gedung reaktor.

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

$^{14}\text{C}$  dihasilkan pada reaktor berpendingin air ringan dan air berat melalui reaksi  $(n, \alpha)$  terhadap  $^{17}\text{O}$  yang ada pada bahan bakar dan moderator oksida, melalui reaksi  $(n,p)$  terhadap  $^{14}\text{N}$  sebagai pengotor di dalam bahan bakar, dan juga melalui reaksi fisi tersier. Dikarenakan massa moderator yang besar,  $^{14}\text{C}$  utamanya dihasilkan dari reaksi  $^{17}\text{O}$  di dalam moderator pada reaktor berpendingin air berat.  $^{14}\text{C}$  mungkin menjadi suku sumber utama dan memberikan dosis kolektif terikat dalam jangka panjang. Namun demikian, dalam beberapa sistem reaktor berpendingin air berat,

kontribusi  $^{14}\text{C}$  terhadap dosis kolektif total relatif kecil dikarenakan  $^{14}\text{C}$  dapat dihilangkan dari moderator melalui sistem pemurnian.

### **I.3 SISTEM UAP DAN TURBIN**

Pada reaktor air siklus langsung,  $^{16}\text{N}$  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 condenser,  $^{19}\text{O}$  juga perlu dipertimbangkan sebagai sumber radiasi utama. Dalam hal terjadi kerusakan pin bahan bakar, produk fisi yang volatile menjadi sumber radiasi tambahan, terutama gas mulia, dan produk fisi yang volatil, seperti iodium dan caesium. Selama operasi reaktor, sumber radiasi tersebut tidak begitu penting dibandingkan dengan  $^{16}\text{N}$ , akan tetapi setelah reaktor shut down radioisotop tersebut dan anak luruhnya (misalnya  $^{140}\text{Ba}$ ) 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 *Pressurized Heavy Water Reactor* (PHWR), sistem uap dan turbin terpisah dari sistem aktif dengan tabung penukar panas sebagai bahan penghalang. Dengan demikian, pada reaktor ini bahan 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  $^{16}\text{N}$  dalam siklus sekunder) dan dipastikan pada bahwa 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 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 bahan radioaktif yang tidak terkendali ke lingkungan hidup melalui bocoran air umpan, serta ventilasi uap udara.

Pada reaktor siklus langsung, tambahan sumber radiasi 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 mungkin teraktivasi menjadi  $^{22}\text{Na}$  dan  $^{24}\text{Na}$ . 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  $^{22}\text{Na}$  dan  $^{24}\text{Na}$ .

## **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 cair yang berasal dari buangan air cucian dan tempat mandi personil;
- 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 berpendingin gas (*Gas Cooled Reactor, GCR*);
- f. limbah cair mengandung tritium konsentrasi sangat tinggi (untuk reaktor berpendingin air berat, *Pressurized HPHWR*).

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 perpendingin air ringan (*Light Water Reactor, 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, gas yang akan segera berdifusi akibat penurunan tekanan. Konsentrasi aktivitas hingga mencapai beberapa  $10^{10}$  Bq/m<sup>3</sup> 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 <sup>60</sup>Co, <sup>58</sup>Co, <sup>51</sup>Cr, <sup>54</sup>Mn, dan <sup>59</sup>Fe (tergantung kepada laju pembentukan dan korosi

yang terjadi pada material yang dipergunakan pada sirkuit primer). Produk fisi, seperti isotop iodium, caesium, 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  $^{16}\text{N}$ ,  $^{19}\text{O}$ , dan  $^{13}\text{N}$ ) 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 *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 (*shut down*) pembangkit. Hal tersebut dilaksanakan apabila dianggap penting untuk mengurangi aktivitas dalam sistem yang mungkin harus dibuka selama penonaktifan pembangkit.

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  $5 \times 10^{11}$  Bq/m<sup>3</sup> 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. Dalam hal 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 siklus langsung BWR 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 pembangkit dimana udara dapat memasuki sistem. Untuk menghindari hal tersebut perlu disediakan pencampur (*recombiner*). Penerapan pencampur akan meningkatkan waktu tunda dari sistem tertentu hingga factor 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  $^{133}\text{Xe}$ . Dalam hal ini radionuklida yang paling penting dilepas adalah  $^{85}\text{Kr}$  dan  $^{14}\text{C}$ .

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

## **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 iodium menjadi xenon.
- bocoran gas pendingin ke bagian lain yang berisi udara pada reaktor berpendingin gas, GCR;
- udara yang memasuki bejana tekan pada reaktor berpendingin air ringan, 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, *Advanced Gas-Cooled Reactor (AGR)*, dan gas kubah kalandria pada reaktor tabung bertekanan, zat radioaktif yang ada sebagian besar diantaranya adalah  $^{41}\text{Ar}$ . 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 di tangki penyimpanan, dan lainnya.

### **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, penyerapan 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 mencapai beberapa ratus meter kubik. Sebagian besar diantara 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  $5 \times 10^{16}$  Bq/m<sup>3</sup> untuk komponen teraktivasi, dan  $5 \times 10^{14}$  Bq/m<sup>3</sup> untuk resin penukar ion dan bahan pelapis filter awal (*pre-coat*).

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

Limbah padat memerlukan pengelolaan secara hati-hati agar memungkinkan 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 baru yang dibuat dari uranium baru (*fresh uranium*) atau bahan fisil lainnya yang masih baru, bahan bakar tersebut memiliki aktivitas radionuklida yang sangat rendah. Dikarenakan sebagian besar radiasi yang dipancarkan berupa sinar alpha dan beta yang memiliki daya tembus sangat terbatas, sehingga radiasi yang terpancar dapat teratenuasi dengan baik oleh matrik, kelongsong, hingga material perangkat bahan bakar lainnya. Dengan demikian paparan radiasi eksternal pada bahan bakar nuklir yang masih baru sangat kecil, bahkan dapat diabaikan.

Dalam beberapa kasus, bahan bakar nuklir baru diproduksi dari bahan uranium atau plutonium yang didaur ulang. Dalam proses daur ulang tentu saja tidak sepenuhnya bisa dilakukan pemurnian terhadap produk fisi maupun nuklida aktinida yang terdapat pada bahan bakar nuklir bekas. Dalam hal demikian bahan bakar nuklir baru merupakan sumber neutron dan paparan radiasi gamma 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 sejak plutonium terbentuk karena pancaran neutron muncul dari aktinida yang merupakan anak luruh dari unsure plutonium.

Dalam hal bahan bakar nuklir baru tersusun dari  $^{233}\text{Th}$  atau  $^{233}\text{U}$ , bahan bakar tersebut menjadi sangat radioaktif karena keberadaan anak luruh dari  $^{232}\text{U}$ . 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 tentu saja sudah teriradiasi di dalam teras reaktor, mengandung produk fisi dan unsur transuranium yang sangat radioaktif.

Pada sistem pengisian bahan bakar pada saat reaktor beroperasi (*on-load refueling system*), bahan bakar dalam sistem pengisian tersebut akan memancarkan neutron tunda (*delayed neutron*). 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 (*stringer*) bahan bakar nuklir.

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

Dalam hal bahan bakar nuklir bekas ditangani dengan metode kering, sangat dimungkinkan terjadinya oksidasi terhadap kelongsong, terkelupaskan bahan teraktivasi 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 diantaranya merupakan isotop gas mulia, iodium, caesium, 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 bependingin gas termaju AGR sebelum proses pembongkaran dilakukan bahan bakar ditangani dan disimpan menggunakan metode kering. Setelah itu bahan bakar nuklir bekas ditempatkan pada kolam bependingin air.

Dalam penerapan sistem untuk penanganan dan penyimpanan bahan bakar secara 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.

## **I.7 FASILITAS DEKONTAMINASI**

Zat radioaktif dalam larutan limbah radioaktif terutama terdiri atas produk korosi yang mengandung radionuklida  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ , dan  $^{54}\text{Mn}$ . Zat radioaktif tersebut muncul dari proses dekontaminasi terhadap komponen atau bahan dari daerah terkontaminasi, pakaian pelindung terkontaminasi, bahkan personil. Konsentrasi aktivitas pada limbah radioaktif yang muncul dari proses dekontaminasi terhadap pakaian pelindung dan personil biasanya 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 personil 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

Jazy Eko Istiyanto

LAMPIRAN II  
PERATURAN KEPALA BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR  
NOMOR: ..... TAHUN .....  
ASPEK PROTEKSI RADIASI DALAM DESAIN REAKTOR  
DAYA

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

Untuk setiap desain reaktor daya yang telah mengadopsi rancangan dalam rangka tindakan pencegahan 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, diantaranya 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 kelongsing bahan bakar. Radionuklida produk fisi yang bersifat volatil biasanya mendominasi suku sumber yang terlepas pada kondisi kecelakaan tersebut.

Perhitungan untuk memperkirakan bahan 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 kejadiannya pecahnya kedua ujung (*double ended rupture*) pipa pendingin utama. Fitur desain sistem keselamatan di dalam teras reaktor harus memperhitungkan kemungkinan kerusakan matrik dan kelongsong bahan bakar yang mungkin timbul sebagai konsekuensi kecelakaan hilangnya pendingin, termasuk fraksi tiap produk fisi yang lepas dari 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 (*plateout*) 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 iodium.

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 pasca 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 dari produk fisi radioaktif yang dianggap mencapai atmosfer pengungkung setelah kecelakaan terjadi. Fraksi tersebut ditentukan secara berbeda untuk berbagai kategori unsure kimia, tetapi biasanya tidak tergantung 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 tergantung kepada 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 (*Boiling Water Reactor*)**

Kerusakan jalur uap utama pada reaktor BWR dapat menimbulkan konsekuensi yang lebih banyak 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 posisi kerusakan jalur uap (*steam break line, SBL*) masih berada di dalam sistem pengungkungan, urutan lepasan produk fisi radioaktif selanjutnya sama dengan akibat kejadian hilangnya pendingin namun dengan fraksi yang berbeda dengan akibat kejadian kegagalan selongsong bahan bakar

nuklir. Konsentrasi kesetimbangan untuk produk fisi radioaktif pada kondisi operasional 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 posisi kerusakan jalur uap (*steam line break, SLB*) berada di luar sistem pengungkungan, 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 operasional yang diduga akan terlepas. Kondensasi uap dalam bangunan ketika kecelakaan terjadi dan pelapisan permukaan (*plateout*) 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, pelepasan pendingin ke dalam bangunan reaktor jika dibandingkan dengan pelepasan pendingin ke pengungkung akan menghasilkan tekanan berlebih (*overpressure*). Tekanan tersebut mengakibatkan zat radioaktif akan keluar dari bangunan, baik melalui titik lepasan (lewat atap), pintu, atau struktur lemah lainnya yang akan terbuka secara otomatis akibat tekanan berlebih atau adanya kebocoran.

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

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

Kemungkinan adanya pelepasan langsung radionuklida dari bangunan reaktor setelah periode tekanan berlebih perlu dipertimbangkan dalam hal

bukaan setelah berakhirnya tekanan berlebih tidak tertutup dan tekanan di dalam bangunan reaktor relatif lebih rendah daripada tekanan atmosfer dan tidak dapat dikembalikan oleh sistem ventilasi ataupun oleh sistem pengeringan alami cerobong.

### **Kerusakan Jalur Uap pada Reaktor PWR (*Pressurized Water Reactor*)**

Pada kondisi awal kejadian, kerusakan jalur uap (*steam line break, 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 kerusakan jalur uap, integritas dari tabung pembangkit uap harus dinilai. Integritas tabung tersebut sangat tergantung dengan 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 *shutdown*, kandungan radionuklida dalam air yang bocor dapat meningkat sebagai efek dari perubahan signifikan dari produk fisi radioaktif (*fission product spiking*).

Bergantung terhadap 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 kelembaban yang lebih tinggi dari tingkat normal karena adanya depresurisasi.

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 iodine 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 pelepasan 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*) tidak dapat diisolasi sepenuhnya;
- c. tingkat pengeringan sistem pembangkit uap yang terkena dampak.

Setelah reaktor shutdown, produksi uap yang terjadi akan bergantung kepada panas peluruhan. Kelembaban uap akan menjadi rendah sebagai akibat dari rendahnya laju aliran uap dan tingginya efisiensi peralatan pemisah dan pengering uap. Dengan demikian, uap yang dapat terlepas melalui katup pelepasan akan memiliki konsentrasi air dengan substansi terlarut, seperti iodine dan caesium, yang relatif rendah. Pelepasan radioaktif diharapkan dapat diminimalisir 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 pelonjakan pembentukan iodine tidak terjadi segera sebelum kejadian awal berlangsung, namun justru terjadi pada fase transien. Kejadian insiden aktual rusaknya tabung pembangkit uap pernah terjadi setidaknya pada 12 reaktor daya yang beroperasi.

Pertimbangan 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 pelepasan pendingin primer reaktor ke sisi sekunder. Setelah reaktor trip, aktuasi terhadap katup pelepas tekanan uap pada sisi sekunder akan

melepaskan uap terkontaminasi ke atmosfer. Potensi pelepasan radioaktif senantiasa ada, bahkan meskipun bejana pembangkit uap tidak terbuka sebagai 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.

Pasca reaktor *trip*, besarnya panas peluruhan, tindakan operator untuk mengisolasi pembangkit uap, atau untuk membuka kalang primer akan menentukan besarnya pelepasan zat radioaktif. Pelepasan zat radioaktif 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 kepada sistem pengaman otomatis dan waktu dimana operator mulai mengambil tindakan yang efektif dalam penanggulangan insiden.

### **Kecelakaan Penanganan Bahan Bakar**

Dalam perhitungan analisis fitur desain guna menanggulangi kecelakaan penanganan bahan bakar nuklir, langkah pertama yang dilakukan adalah penentuan inventori zat radioaktif yang ada di dalam bahan bakar pada saat kecelakaan terjadi. Asumsi mengenai sejarah 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 dengan awal pelaksanaan tindakan penanganan bahan bakar harus digunakan untuk menentukan inventori suku sumber radioaktif maksimum di dalam bahan bakar pada saat awal pelaksanaan pengisian ulang bahan bakar. Jumlah batang bahan bakar yang bisa rusak sebagai dampak kecelakaan perlu ditentukan secara teoritis, 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 kepada volume ruang bebas yang terdapat di dalam batang bahan bakar. Tidak ada konsensus umum untuk menentukan pelepasan iodium dari batang bahan bakar ke air kolam pendingin akibat keretakan pada kelongsong. Iodium mungkin terlindi oleh air yang menembus batang bahan bakar yang rusak. Pelepasan iodium paling dominan dalam wujud gas, yang dianggap ada di dalam ruang bebas dalam batang bahan bakar.

Pendekatan yang lazim dan konservatif dalam memperkirakan lepasan iodium dilakukan dengan mengabaikan kelarutan gas mulia di dalam air kolam. Namun demikian, pada kenyataannya sejumlah fraksi iodium dan caesium yang signifikan akan tertahan di dalam air kolam. Pelepasan iodium ke atmosfer melalui permukaan air kolam dapat digambarkan dengan koefisien partisi yang menyatakan perbandingan antara konsentrasi aktivitas volumetric iodium di udara dan di dalam air kolam. Untuk sebagian iodium yang terikat di dalam senyawa organik, seperti metil iodium, 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 awal kejadian hingga padamnya sistem ventilasi, dan efektivitas desain dari sistem penghisap udara di atas permukaan air kolam.

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

Selain gas mulia dan iodium, caesium dapat secara perlahan tercuci oleh air yang menembus batang bahan bakar yang rusak. Caesium tersebut akan berada dalam bentuk ion yang terdapat di dalam air. Dengan demikian perpindahan caesium ke udara di atas kolam air dapat diabaikan.

Jumlah gas mulia dan iodium yang terlepas ke lingkungan hidup akan dikendalikan dengan laju ventilasi dan sistem penyapu udara di atas kolam

yang digunakan. Pengurangan konsentrasi iodium karena proses penyaringan pada udara buang diperhitungkan menggunakan factor dekontaminasi yang berkesesuaian dengan desain filter yang diterapkan. Pelepasan yang terjadi dapat dihentikan melalui tindakan isolasi pada bagian yang tepat dari sistem reaktor daya, terutama apabila kolam penyimpanan berada di dalam sungkup. Apabila tindakan isolasi tersebut dilakukan oleh operator, waktu tundak dapat diasumsikan antar 10 hingga 30 menit.

### **Kecelakaan pada Sistem Tambahan**

Beberapa contoh kecelakaan yang terjadi pada sistem tambahan, meliputi antara lain:

- a. pecahnya pipa pada sistem tambahan;
- 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 tambahan tersebut tergantung pada fitur desain sistem yang bersangkutan dimana terdapat perbedaan yang signifikan untuk setiap desain reaktor daya. Dengan demikian asumsi yang dipilih untuk keperluan analisis kecelakaan perlu dibuat berdasarkan kasus per kasus.

Salah satu jenis kecelakaan pada sistem tambahan yang penting adalah kecelakaan yang disebabkan oleh retaknya pipa pada sistem pembuangan sisa panas. Kecelakaan tersebut pada waktu operasi yang menyertai *shutdown*-nya reaktor, atau terhentinya sistem kontrol kimia dan volume pada saat reaktor beroperasi. Dalam kedua kasus kejadian tersebut, kontribusi suku sumber yang paling penting adalah peningkatan produk fisi yang terjadi sebagai akibat reaktor *shutdown* atau jeda sebelumnya.

Analisis terhadap kejadian kecelakaan sebagaimana tersebut di atas mengharuskan laju kebocoran dari pipa, pergerakan gas radioaktif melalui

bangunan tambahan sistem ventilasi aktif, perilaku iodium, dan efisiensi sistem filtrasi pada kondisi kecelakaan perlu ditentukan sebagai fungsi waktu.

### **Kecelakaan Parah**

Kecelakaan yang diperparah oleh kegagalan multi sistem atau komponen, dan kesalahan operator sehingga menyebabkan peluang terjadinya kecelakaan yang 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 pelepasan 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-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 ada dan dimungkinkan terlepas ke lingkungan hidup.

## **II.2 REAKTOR BERPENDINGIN CO<sub>2</sub>, BERBAHAN BAKAR UO<sub>2</sub> 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 pelepasan  $UO_2$ .

Jenis kejadian yang dapat menyebabkan pelepasan zat radioaktif terbesar dianggap sebagai sebuah kecelakaan yang merupakan dampak dari pelepasan sebagian kelongsong yang diiringi dengan kenaikan temperatur bahan bakar ( $UO_2$ ) 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 trip secara otomatis akan menjamin  $UO_2$  tidak akan meleleh.

Dalam kondisi sebagaimana dimaksud di atas, persentasi substansial dari nuklida gas mulia dan iodium yang diproduksi dari hasil fisi dilepaskan dari matrik bahan bakar yang kelongsongnya rusak ke pendingin dapat mencapai 100%. Zat radioaktif pada kelongsong yang meleleh senantiasa diasumsikan dilepaskan ke pendingin secara keseluruhan. Persentasi pelepasan produk fisi dari bahan bakar yang mengalami kerusakan kelongsong sangat tergantung kepada riwayat temperatur bahan bakar sebagai fungsi waktu yang mengikuti kegagalan kelongsong dan keberadaan hasil oksidasi  $UO_2$  menjadi  $U_3O_8$  oleh pendingin  $CO_2$ . Nilai yang akurat ditentukan dari percobaan yang khusus ditujukan untuk menentukan persentase pelepasan.

Sebagian radionuklida yang berada dalam fluida pendingin sebagai 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 *HEPA filter*.

Setelah zat radioaktif dilepaskan ke fluida pendingin, jumlah pelepasan zat radioaktif ke atmosfer akan sangat tergantung kepada beberapa parameter, meliputi kebocoran, pelapisan permukaan (*plateout*), 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 iodium, harus dipertimbangkan kemungkinan adanya lebih dari satu jenis isotop iodium dan sifat pelapisannya yang berbeda-beda. Beberapa iodium yang terlepas ke sirkulasi fluida pendingin akan membentuk senyawa atau unsure yang melekat pada partikel, dan sisanya membentuk senyawa metil-iodium. Dua jenis senyawa iodium tersebut akan terendap dari fluida pendingin dengan laju pengendapan yang berbeda-beda. Total endapan yang terbentuk akan dibatasi oleh adsorpsi dan pelarutan kembali terhadap iodium yang terendap. Hal tersebut harus dipertimbangkan dalam penentuan variasi aktivitas fluida pendingin terhadap fungsi waktu. Nilai yang akurat dalam penentuan fraksi iodium 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 matriks bahan bakar nuklir dimungkinkan tidak terhindar dari keberadaan kebocoran kecil dimana matriks tersebut dapat melepaskan fraksi produk fisi gas mulia, iodium, dan caesium yang bergerak bebas dari matriks bahan bakar menuju fluida pendingin. Besarnya fraksi produk fisi yang terlepas hingga ke fluida pendingin sangat bergantung daya termal reaktor, temperatur bahan bakar, dan faktor burn-up.

Pada kasus gas mulia dan iodin, fraksi dari produk fisi gas Xe, gas Kr, dan  $^{133}\text{Xe}$ , serta  $^{131}\text{I}$  yang berada di dalam matriks bahan bakar dihitung menggunakan program komputer berdasarkan teori difusi pada batas butir  $\text{UO}_2$  dan pembentukan gelembung pada batas butir tersebut. Konstanta yang dipergunakan dalam perhitungan tersebut harus disesuaikan untuk memberikan fraksi perhitungan sesuai dengan pengukuran. Untuk caesium yang keluar dari matriks bahan bakar menuju fluida pendingin ditentukan

atas dasar pengamatan bahwa fraksi unsur tersebut yang terlepas sekitar 1/3 dari keseluruhan <sup>131</sup>I.

Untuk kasus gas mulia saja, fraksi pelepasan 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 iodin dan caesium 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 berpendingin gas (*Gas Cooled Reactor*, GCR), desain kalang pendingin dan sistem *shut down* 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 diasumsikan tidak akan terjadi, kebocoran pada kalang fluida pendingin hanya dapat terjadi sebagai akibat kegagalan pada penetrasi yang terdapat pada bejana tekan (misalnya keberadaan pipa penghubung ke sistem pembangkitan 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.

Tripping reaktor berupa trip tekanan rendah, langkah pembatasan berdasarkan desain laju penurunan tekanan maksimum dapat 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 tingkatan terendahnya akan memperkecil kemungkinan kerusakan kelongsong bahan bakar yang mungkin terjadi sebagai akibat hilangnya tekanan fluida pendingin. Batas desain untuk temperatur kelongsong bahan bakar, temperatur bahan bakar, dan tekanan gas produk fisi perlu didesain sedemikian rupa sehingga hanya matriks bahan bakar dengan cacat manufaktur yang tidak terdeteksi saja yang akan mengalami kegagalan berupa kebocoran pada saat terjadi kecelakaan akibat hilangnya tekanan pada fluida pendingin.

Titik pelepasan fraksi produk fisi ke atmosfer sangat tergantung dimana lokasi kebocoran terjadi. Pada beberapa titik dimana kebocoran besar dapat terjadi, saluran gas panas telah disediakan untuk mengalirkan gas ke atmosfer 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 HEPA filter. 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 HEPA filter. Oleh karena itu, dengan tidak menerapkan faktor filtrasi oleh HEPA filter maka perhitungan yang dilakukan bersifat sangat konservatif.

### **II.3 REAKTOR BERPENDINGIN AIR BERAT**

Reaktor yang menggunakan air berat (deuterium oksida) sebagai moderator, baik pendingin maupun moderatornya memiliki potensi pelepasan zat radioaktif yang sama sebagaimana pelepasan akibat kecelakaan pada

reaktor berpendingin air ringan (*Light Water Reactor*, LWR) sebagaimana dijelaskan pada bagian sebelumnya. Untuk reaktor dengan sistem tabung bertekanan, analisis kecelakaan akibat kehilangan fluida pendingin perlu menyertakan pula kemungkinan pecahnya tabung tekan, sebagaimana 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 (sebagaimana air) dan biasanya tidak menjadi parameter yang penting terhadap potensi bahaya radioaktif ke masyarakat umum setelah kejadian kecelakaan. Namun demikian, keberadaan tritium perlu diperhitungkan untuk perlindungan terhadap personil yang berada di lokasi selama ataupun setelah kecelakaan berlangsung.

#### **II.4 REAKTOR DENGAN PENGISIAN BAHAN BAKAR DALAM KEADAAN BEROPERASI**

Untuk reaktor dengan kemampuan pengisian 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 akibat dari kecelakaan berupa hilangnya sebagian kecil fluida pendingin. Tingkat keparahan akan sangat tergantung lokasi dimana kegagalan terjadi dan waktu yang telah berlalu setelah pengambilan bahan bakar dari teras reaktor.

## **II.5 KECELAKAAN LAINNYA**

Daerah di dalam reaktor nuklir dimana kejadian awal terpostulasi menimbulkan pelepasan 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

Jazy Eko Istiyanto