

## BAB V PRINSIP DASAR DAN PERSYARATAN

### 5.1. Ekonomi

#### 5.1.1. Prinsip Dasar:

- PDE.1. Energi dan produk terkait serta layanan dari SEN harus selalu terjangkau dan tersedia.
- PDE.2. Dalam aplikasi dan pengembangan SEN, program partisipasi nasional harus diimplementasikan dengan baik dan secara bertahap meningkatkan kualitas industri nasional.

#### 5.1.2. Persyaratan :

- PE.1.1. *Biaya energi dari SEN, termasuk semua biaya dan kredit yang terkait dalam perhitungan harus kompetitif dengan sumber energi alternatif.*

Sasaran ekonomi dapat dinyatakan sebagai: Biaya terasas pembangkitan listrik dari PLTN harus kompetitif terhadap sumber energi alternatif berdasarkan pada peraturan nasional yang berlaku. Faktor ekonomi yang mempunyai pengaruh dominan yaitu: biaya modal (*capital costs*), lama pembangunan (*construction time*), faktor kapasitas (*capacity factor*), dan biaya operasi dan perawatan (*O&M costs*), serta bahan bakar (*fuel cost*) harus dikelola dengan baik untuk mencapai sasaran ekonomi. SEN didesain agar mempunyai keuntungan ekonomi yang signifikan terhadap sumber energi alternatif lain untuk jangka pendek dan selama masa bakti.

Evaluasi ekonomi dari suatu usulan untuk introduksi SEN ditentukan dengan 2 faktor dasar sebagai berikut:

- total nilai terkini dari proyek yang diusulkan dihitung dengan metode aliran kas terdiskonto, dan
- biaya pembangkitan neto per kWh yang diestimasi (menggunakan metode teratas) dengan biaya pengembalian modal, biaya bahan bakar, serta biaya operasi dan perawatan. Adapun biaya penggantian komponen utama (yang diperkirakan selama masa operasi pembangkit),

pengelolaan limbah radioaktif dan bahan bakar bekas, maupun dekomisioning sudah termasuk dalam perhitungan.

PE.1.2. *Total investasi yang dibutuhkan untuk desain, konstruksi, dan komisioning SEN, termasuk bunga selama konstruksi, harus dapat terdananai.*

Pemasok harus mengajukan perkiraan biaya modal (investasi total), biaya operasi dan perawatan serta biaya bahan bakar. Selanjutnya pemasok harus menyatakan kesepakatannya untuk menjamin tercapainya masa operasi pembangkit yang lebih lama, desain mantap dan teruji serta jadwal konstruksi sehingga investasi yang diperlukan dapat terdananai.

PE.1.3. *Risiko investasi dalam SEN harus dapat diterima investor dengan memperhitungkan terhadap risiko investasi dalam proyek energi lainnya.*

Pemasok harus selalu membantu pengguna dengan memberikan informasi penting untuk mendapatkan izin dari Badan Pengawas.

Upaya harus dilakukan untuk mengembangkan teknik dan prosedur yang tidak hanya memperpendek jadwal konstruksi namun juga mencegah penundaan pembangunan yang telah dimulai. Selain itu, sejak awal rencana dekomisioning harus dipertimbangkan dalam desain untuk mengoptimalkan kemampuan dekomisioning pembangkit dan meminimalkan biaya terkait. Pemasok SEN yang potensial harus mencari kemungkinan untuk menggunakan tiga pola pendanaan berikut: proyek sepenuhnya dibiayai melalui jaminan pemerintah, proyek sepenuhnya dibiayai oleh perusahaan listrik swasta, dan proyek dibiayai melalui model pendanaan proyek.

Untuk pembangunan PLTN pertama, kontrak putar-kunci telah dipertimbangkan sebagai cara terbaik, sebagaimana dinyatakan dengan jelas dalam laporan studi kelayakan. Dalam kebijakan pendanaan, pemerintah harus mendorong perusahaan swasta dan koperasi untuk mendanai pembangunan pembangkit listrik dalam rangka memenuhi peningkatan kebutuhan listrik.

Masalah spesifik independent power producer (IPP) nuklir perlu mendapatkan dorongan pemerintah seperti informasi dan edukasi masyarakat, pertanggungjawaban pihak ketiga, ujung belakang daur bahan bakar, dekomisioning, dan pengelolaan limbah jangka panjang. Kebutuhan untuk berbagi risiko pada sisi investor asing dapat memerlukan partisipasi pemerintah dalam bentuk ekuitas parsial.

PE.2.1. *SEN harus serasi dengan persyaratan lokal untuk mendorong partisipasi nasional dalam program industri nuklir.*

Partisipasi nasional sebenarnya banyak diperlukan sebagai sarana untuk mendorong kemampuan dalam operasi dan perawatan SEN, mengurangi porsi asing dalam pendanaan, meningkatkan efektivitas pendayagunaan tenaga kerja lokal, dan secara bertahap meningkatkan kualitas industri nasional. Seiring dengan pengembangan SEN melalui tahapan, kemampuan inisiasi desain dan rekayasa, fabrikasi, konstruksi, instalasi, komisioning, operasi & perawatan SEN diharapkan berkembang.

Dalam fase pertama SEN, porsi partisipasi nasional diharapkan dapat mencapai 25%. Porsi ini harus ditingkatkan secara bertahap sesuai dengan pengembangan program partisipasi nasional, agar alih teknologi nuklir dan pemeliharaan industri nuklir di Indonesia yang berhasil dapat dicapai.

Untuk keberhasilan alih teknologi nuklir dan pemeliharaan industri nuklir di Indonesia, kondisi berikut harus dipenuhi:

- Konsensus nasional terhadap pemilihan SEN sebagai salah satu sumber daya yang sangat penting untuk mendukung kesejahteraan dan pertumbuhan ekonomi Indonesia
- Komitmen oleh Pemerintah Indonesia untuk mengarahkan dan mendukung program SEN di Indonesia
- Stabilitas dan keamanan pertumbuhan ekonomi Indonesia
- Industri nasional harus diklasifikasikan dan dikelompokkan sesuai kegiatan utamanya

## **5.2. Keselamatan Instalasi Nuklir**

### **5.2.1. Prinsip Dasar :**

- PDK.1. Instalasi SEN harus menerapkan strategi pertahanan berlapis yang selalu disempurnakan sebagai bagian dari pendekatan keselamatan fundamentalnya dan menjamin bahwa tingkatan proteksi di dalam pertahanan berlapis harus tidak saling gayut.
- PDK.2. Instalasi SEN harus unggul dalam keselamatan dan keandalan dengan menerapkan kedalam desainnya, bilamana memungkinkan, penekanan yang lebih besar pada karakteristik keselamatan melekat dan sistem pasif sebagai bagian dari pendekatan keselamatan fundamentalnya.
- PDK.3. Penerapan SEN harus menjamin bahwa risiko dari paparan radiasi terhadap pekerja, masyarakat dan lingkungan selama konstruksi/ komisioning, operasi, dan dekomisioning sebanding dengan risiko dari fasilitas industri lain yang dipergunakan untuk maksud serupa.
- PDK.4. Penerapan dan pengembangan SEN harus mencakup kegiatan penelitian, pengembangan dan demonstrasi yang berkaitan untuk mengungkapkan pengetahuan tentang karakteristik instalasi dan kemampuan metoda analitis yang dipergunakan untuk pengkajian keselamatan desain.
- PDK.5. Sebagai bagian sistem manajemen keselamatan, sistem manajemen mutu SEN harus ditetapkan berdasarkan standar yang diakui dan digunakan selama masa bakti SEN, misalnya selama desain, pengadaan dan instalasi, serta untuk kendali prosedur yang digunakan dalam pengujian, komisioning, operasi dan perawatan SEN.

### **5.2.2. Persyaratan**

- PK.1.1. *Instalasi SEN harus tangguh dalam desain berkenaan dengan kegagalan sistem dan komponen serta dalam pengoperasian.*

Cara yang utama dalam mencapai ketangguhan desain adalah menjamin kualitas tinggi dalam desain, konstruksi dan operasi

termasuk kinerja manusia. Untuk desain SEN frekuensi kegagalan pemicu atau gangguan yang mungkin terjadi harus dikurangi serendah mungkin dalam batas yang masih dapat dilaksanakan. Pengurangan ini dapat dicapai dengan mempergunakan misalnya : bahan terbaik, desain yang disederhanakan untuk meminimalkan kegagalan dan kesalahan, penyempurnaan batas desain yang tahan terhadap tekanan berlebih dan kelelahan bahan, batas pengoperasian lebih meningkat, redundansi sistem yang lebih meningkat, pengurangan dampak akibat intervensi yang tidak benar dari manusia (mesin seharusnya toleran terhadap kesalahan), inspeksi yang lebih efektif dan efisien, pemantauan kontinyu terhadap kondisi kesehatan instalasi dan lain-lain.

Contoh konsep reaktor yang ditingkatkan ketangguhannya dalam menghadapi potensi bahaya tertentu adalah desain yang menghindari tekanan sistem yang tinggi, menghindari ekskursi daya yang besar, pembatasan temperatur dalam transien reaktivitas, mempunyai potensi keandalan yang lebih tinggi, menghindari deviasi dari operasi normal, menghindari kebakaran dan menggunakan karakteristik keselamatan melekat dan lain-lain.

Desain yang selamat/aman adalah ramah terhadap operator (*operator friendly*) dan ditujukan untuk dapat mengakomodasi kesalahan manusia. Penghalang fisik atau administratif dipergunakan untuk mencegah kesalahan manusia atau membatasi dampaknya. Pada tingkat antarmuka pengguna, operator seharusnya disajikan informasi dengan cara yang dapat dikelola, waktu yang memadai untuk mengambil keputusan dan tindakan. Desain yang selamat juga ditujukan untuk meningkatkan tindakan operator yang tepat dengan memperhatikan waktu yang tersedia, tuntutan psikologis situasi dan lingkungan fisik. Perlunya intervensi operator dalam jangka pendek harus diminimalkan. Jika tindakan segera diperlukan, hendaknya dipicu secara otomatis. Jika operasi instalasi secara manual diperlukan, peralatan harus dalam posisi yang mudah dijangkau, dengan memperhatikan semua kondisi lingkungan yang terantisipasi.

Waktu tenggang (*grace period*), yaitu waktu sebelum tindakan manusia diperlukan dalam kasus kegagalan atau permulaan operasi abnormal, harus tersedia secara memadai. Nilai yang memadai dari "waktu tenggang" tergantung pada tipe fasilitas nuklir, mudah-tidaknya diagnosa kegagalan, dan kerumitan tindakan manusia yang harus

diambil, kegagalan ringan dan tindakan mudah dilakukan memerlukan waktu tenggang yang lebih singkat. Oleh karena itu, desain harus sedemikian rupa sehingga semua tindakan yang berada dalam waktu tenggang tersebut diotomatisasikan. Sebagai contoh, untuk fasilitas/instalasi SEN setelah kehilangan air umpan utama yang diikuti dengan keberhasilan pemindahan secara otomatis ke sistem redundansi, waktu tenggang sekitar satu hari adalah cukup.

Sistem yang terkait dengan inspeksi seharusnya mensyaratkan dan memungkinkan inspeksi yang lebih efisien dan cerdas, tidak hanya sekedar inspeksi yang sering. Ini berarti bahwa suatu program inspeksi harus dipersiapkan dan digerakkan oleh pemahaman yang baik atas mekanisme kegagalan sehingga lokasi yang benar diinspeksi pada waktu yang tepat.

Untuk menghindari konsekuensi yang dapat menunda *start* ulang dan kembali ke operasi normal, instalasi SEN hendaknya mempunyai kemampuan untuk menanggulangi kejadian operasional yang terantisipasi. Contoh tipikal yang terkait dengan kelembaman adalah tidak terjadinya aliran material keluar dari sistem primer setelah kehilangan transien beban (dalam PWR), maka tindakan desain yang sesuai adalah dengan penentuan ukuran *pressurizer* yang memadai. Contoh lain untuk reaktor nuklir adalah kelembaman termal bahan bakar (kenaikan temperatur secara perlahan) yang akan terjadi setelah transien seperti kehilangan aliran (kegagalan pompa pendingin utama) dalam sistem primer.

Batas pengoperasian yang dinaikkan akan mengurangi kejadian kondisi instalasi yang tidak normal yang mengarah pada pemadaman reaktor (pancung). Contohnya adalah tingkat daya yang memicu pancung reaktor (trip tingkat daya); terkadang tingkat daya ini bergantung kepada daya reaktor itu sendiri. Sebelum mencapai tingkat ini sistem kendali operasi mungkin mampu mengurangi kenaikan daya. Maka tingkat trip daya dapat diatur pada tingkat daya yang lebih tinggi sehingga batas pengoperasian (dalam hal ini lewat-batas) dapat ditingkatkan. Secara lebih umum, perbedaan antara tingkat daya operasi dengan tingkat daya pancung untuk semua pancung otomatis (misal aliran rendah, tekanan rendah dan sebagainya) merupakan sebuah indikator batas yang ditingkatkan. Perlu diperhatikan bahwa batas yang ditingkatkan ini dapat menghasilkan keluaran yang lebih rendah.

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa desain harus menjamin bahwa SEN sesuai untuk operasi yang handal, stabil dan mudah dikelola. Tujuan utamanya adalah pencegahan terjadinya kecelakaan.

PK.1.2. *SEN harus dapat mendeteksi dan mengintervensi penyimpangan terhadap kondisi operasi normal dalam rangka mencegah kejadian operasional terantisipasi (KOT) yang dapat meningkat menjadi kondisi kecelakaan.*

Harus tersedia beberapa cara untuk dapat menjamin adanya kemampuan pemadaman (*shutdown*) SEN dalam kondisi operasi dan kecelakaan dasar desain, dan kondisi pemadaman tersebut dapat dipertahankan untuk kondisi yang paling reaktif sekalipun.

Pendekatan keselamatan harus menyediakan cara yang memadai: untuk menjaga SEN dalam kondisi operasi normal; untuk menjamin respons jangka pendek yang tepat segera setelah terjadi kejadian awal yang dipostulasikan (KAD); dan untuk memfasilitasi pengelolaan instalasi pada saat dan setelah kecelakaan dasar desain (KDD) serta dalam kondisi kecelakaan melebihi KDD.

Prioritas harus diberikan kepada sistem instrumentasi dan kendali maju (I&K), dan memperbaiki keandalan sistem, sehingga mengurangi pemakaian redundansi dan keberagaman peralatan yang mahal.

Fungsi I&K keselamatan yang disediakan pada SEN dapat dijelaskan dari dua sudut pandang berikut:

- Dari sudut pandang berdasar kejadian, menunjukkan bahwa I&K keselamatan memicu tindakan proteksi yang diperlukan sebagai respons terhadap KAD dan kejadian KDD, dan
- Dari sudut pandang tujuan keselamatan, menunjukkan bahwa fungsi keselamatan diimplementasikan untuk mencapai tujuan tersebut.

Tujuan utama sistem I&K untuk KOT adalah untuk mendeteksi kejadian tersebut dan mengembalikan instalasi ke operasi normal tanpa akibat, sehingga tidak memerlukan inspeksi atau laporan kejadian kepada badan pengawas. Pada SEN, karakteristik melekat dan/atau sistem atau komponen pasif dapat membantu atau bahkan menggantikan sebagian kemampuan sistem I&K. Dengan demikian, optimasi sistem pasif dan aktif diperlukan untuk menjamin pengembalian segera kepada operasi normal.

Sebuah model instalasi yang dinamik harus ada yang mensimulasikan variabel sistem pengendalian, pembatasan dan proteksi, parameter trip, serta perilaku operasi sistem keselamatan dan sistem bantu. Agar sistem I&K dapat diterima, hasil analisis harus menunjukkan bahwa semua batasan dan batas keselamatan dipatuhi dalam kasus penyimpangan dari operasi normal yang diasumsikan.

*Probabilistic Safety Assessment (PSA)* lengkap dengan analisis ketidakpastian untuk bagian yang terkait dengan keselamatan dari sistem I&K harus dilakukan. Analisis tersebut harus berkualitas tinggi dan menghasilkan hitungan ketidaktersediaan (*un-availabilities*) yang rendah, misalnya untuk pemadaman (*shutdown*).

PK.1.3. *Frekuensi terjadinya kecelakaan harus dikurangi sehingga konsisten dengan tujuan keselamatan secara menyeluruh. Jika terjadi kecelakaan, sistem keselamatan teknis (engineered safety features) harus mampu mengembalikan SEN ke keadaan terkendali dan selanjutnya (apabila relevan) ke kondisi padam yang aman, dan menjamin pengungkungan material radioaktif. Kebergantungan kepada intervensi manusia harus seminimal mungkin dan diperlukan hanya setelah waktu tenggang tertentu.*

Untuk reaktor berpendingin air yang sudah ada, kecelakaan dasar desain berkisar dari kondisi transien operasional tanpa terjadinya kehilangan pendingin sampai dengan kecelakaan kehilangan pendingin ukuran sedang dan besar. Berdasarkan pengalaman pengoperasian (lebih dari sepuluh ribu tahun

reaktor operasi) dan kajian analitik mengenai korelasi antara frekuensi kejadian dengan variabel konsekuensi (misal tingkat kerusakan atau dosis) diperoleh bahwa konsekuensi meningkat dengan menurunnya frekuensi kejadian. Frekuensi terjadinya kecelakaan yang diharapkan dapat terjadi pada reaktor tipe *light water reactor* (LWR) yaitu batas penerimaan untuk *loss of coolant accident* (LOCA) ukuran kecil adalah  $<10^{-2}$  per reaktor-tahun, dan untuk LOCA ukuran besar adalah  $10^{-4}$  per reaktor tahun. Waktu tenggang bagi operator untuk melakukan suatu intervensi sekurang-kurangnya 30 menit setelah kecelakaan terjadi.

Pengertian 'keadaan terkendali' adalah suatu situasi di mana sistem keselamatan teknis mampu mengkompensasi hilangnya fungsi akibat terjadinya kecelakaan. Keandalan sistem keselamatan teknis dapat ditingkatkan dengan desain pasif, walaupun metode lain dapat juga diterapkan.

Desain sistem keselamatan teknis harus secara deterministik menjamin tetap terjaganya integritas, sekurang-kurangnya pada satu penghalang (mengungkung material radioaktif) setelah suatu kecelakaan dasar desain. Strategi pertahanan berlapis (PB) ada dua lapis: pertama, untuk mencegah kecelakaan dan, kedua, jika pencegahan gagal, untuk membatasi konsekuensi yang potensial dan mencegah perkembangan ke kondisi yang lebih serius. Seandainya tindakan pencegahan gagal, tindakan mitigasi, khususnya penggunaan fungsi sungkup / pengungkung yang terdesain dengan baik dapat memberikan proteksi tambahan yang penting bagi masyarakat dan lingkungan.

Setelah terjadinya suatu kecelakaan baik reaktor nuklir (*shutdown depth*) maupun fasilitas daur bahan bakar, "batas sub kriticalitas" harus ada. Hal ini untuk mencegah kecelakaan kekritisan.

Oleh karena pengendalian kecelakaan memiliki arti yang sangat penting tingkat selanjutnya adalah kemungkinan terjadinya degradasi teras yang parah maka waktu tenggang bagi para operator dalam tingkat PB ini harus lebih panjang daripada kejadian abnormal. Salah satu indikasinya mungkin adalah pergantian operator setiap 8 jam, karena petugas operasi yang baru akan mengambil alih tanggung jawab dan mungkin mampu berfikir lebih jernih dalam mendiagnosis kecelakaan. Waktu tenggang yang lebih panjang ini menghasilkan persyaratan desain yang lebih luas dibandingkan dengan kejadian abnormal itu, terutama respons yang lebih panjang dari sistem yang terotomatisasi secara penuh

(misalnya catu daya darurat, pembuang panas sisa, daya baterai untuk I&K dan lain sebagainya)

Waktu untuk mengatasi kehilangan total catu daya listrik (*station black-out*) untuk pendinginan teras harus minimum 8 jam, namun untuk SEN pasif waktu yang diperlukan tak dipastikan. Batasan untuk kondisi tanpa proteksi teras dalam SEN pasif harus lebih dari 72 jam, dengan asumsi bahwa tidak diperlukan tindakan operator pada kejadian dasar desain yang masuk dalam daftar perizinan, termasuk kehilangan total catu daya.

**Catatan :** Kejadian eksternal dasar desain harus ditentukan berdasarkan informasi data tapak. Pemasok potensial harus mengirimkan data dukung termasuk asumsi yang digunakan untuk menentukan kondisi desain yang diusulkan.

- PK.1.4. *Frekuensi penglepasan radioaktivitas yang besar ke dalam sungkup /pengungkung dari sebuah SEN akibat dari kejadian internal harus dikurangi. Jika penglepasan terjadi, konsekuensi harus termitigasi.*

Teras yang amat terdegradasi dan penglepasan produk fisi yang volatil dari teras akan terjadi jika sistem keselamatan tidak mampu mempertahankan atau memulihkan teras ke keadaan aman. Biasanya, produk fisi yang volatil akan dilepaskan ke dalam lingkungan sungkup /pengungkung. Bergantung pada desainnya, material teras cair atau padat mungkin masuk ke sungkup/ pengungkung setelah kerusakan (kegagalan) bejana tekan reaktor (*reactor pressure vessel, RPV*); integritas sungkup/ pengungkung mungkin terancam, misalnya untuk LWR oleh interaksi beton / teras.

Sistem keselamatan pada desain harus dapat mencegah degradasi teras dengan tetap menjaga teras selalu terendam air dan menjamin bahwa produksi panas dalam teras tidak melewati kemampuan pendinginan, dan harus dapat mencegah adanya kejadian pemicu yang menyebabkan kerusakan teras dan kerusakan teras yang parah. Manajemen kecelakaan

meningkatkan sistem keselamatan pada desain untuk mencegah degradasi kecelakaan berkembang menjadi kondisi kecelakaan parah, dan untuk memitigasi kecelakaan jika terjadi. Ketahanan terhadap kecelakaan mensyaratkan bahwa sistem keselamatan pada desain meminimalkan frekuensi kejadian dan tingkat keparahan kejadian pemicu, seperti:

- Batas termal bahan bakar sama atau lebih tinggi dari 15%,
- Respons instalasi yang lebih lambat terhadap kondisi yang mengganggu melalui fitur seperti kenaikan inventori pendingin, dan
- Menggunakan material terbaik yang tersedia.

Untuk instalasi SEN, keandalan sistem dalam pengendalian urutan kecelakaan yang kompleks harus ditingkatkan, termasuk sistem instrumentasi, kendali dan diagnosis. Dengan demikian frekuensi lepasan radioaktivitas dalam jumlah besar ke sungkup mungkin berkurang. Lepasannya ke sungkup dapat dikendalikan atau dimitigasi dengan misalnya sistem penyemprot, sehingga mengurangi potensi lepasan dalam jumlah besar keluar dari sungkup.

Jika instalasi mencapai keadaan teras sangat terdegradasi, maka proses teknis aktif maupun pasif atau proses alami harus tersedia untuk mengurangi beban pada sungkup dan untuk mengurangi dan/atau mengendalikan aktivitas di dalam sungkup.

Dalam mencegah kerusakan teras, desain harus menjamin bahwa kejadian pemicu tidak berkembang ke arah kerusakan teras. Melalui kajian keselamatan probabilistik frekuensi kerusakan teras harus ditunjukkan kurang dari  $1 \times 10^{-5}$  kejadian per reaktor-tahun. Selama LOCA akibat pecahnya pipa ukuran kecil, pelelehan bahan bakar tidak boleh terjadi. Dalam kasus pelelehan bahan bakar, lelehan material bahan-bakar dan teras harus tetap tertahan di dalam bejana tekan.

Pada kejadian kecelakaan terparah di dalam instalasi, tindakan manajemen harus memberikan cara pada operator untuk mencegah lepasan lebih lanjut ke sungkup/ pengungkung dan atau untuk mengurangi konsentrasi radionuklida. Selain penggunaan sistem keselamatan yang telah ditetapkan, instalasi dapat menggunakan sistem lain untuk mencoba mengendalikan kembali fasilitas. Dalam beberapa kasus komponen dari sistem seperti itu harus diperbaiki atau dimodifikasi (misalnya rentang instrumentasi) untuk dapat digunakan dalam situasi kecelakaan. Perbaikan tersebut harus telah dilakukan sebelum digunakan.

- PK.1.5. *Lepasan radioaktivitas dalam jumlah besar dari SEN harus dicegah, sehingga instalasi SEN tidak membutuhkan tindakan relokasi dan evakuasi di luar tapak instalasi, terpisah dari tindakan kedaruratan biasa yang dikembangkan bagi fasilitas industri yang dipergunakan untuk maksud serupa.*

Sistem keselamatan teknis pada instalasi SEN harus mampu mengendalikan skenario kecelakaan terparah (kecelakaan di luar dasar desain) dan memitigasi konsekuensinya, untuk mencegah kegagalan sungkup. Kendali dan mitigasi harus ditujukan pada semua ancaman (internal dan eksternal).

Untuk kecelakaan terparah yang dimaksud dalam desain, sungkup harus mampu memenuhi tujuan keselamatan dan radiologis. Hal ini termasuk pemeliharaan fungsi integritas sungkup dan ketahanan bocor sungkup. Desain sungkup harus mampu untuk menjaga keutuhan sungkup dan kebocoran yang kecil selama kecelakaan terparah, dan tahan terhadap beban mekanik dan termal yang muncul dari kecelakaan internal. Jadi, desain SEN harus menunjukkan bahwa:

- Kemungkinan sebuah lepasan yang berjumlah besar adalah sangat kecil ( $< 10^{-6}$  per unit -tahun) sehingga tindakan kedaruratan di luar tapak tidak menyebabkan pengurangan risiko secara berarti, meskipun tindakan tersebut mungkin mengurangi konsekuensinya; atau
- Lepasannya berjumlah besar dapat dihindari melalui desain, misalnya dengan penggunaan karakteristik keselamatan melekat (*inherent safety*).

Konsekuensinya, untuk SEN tidak diperlukan rencana kedaruratan luar tapak, suatu hal yang berbeda dari rencana untuk fasilitas industri yang digunakan untuk maksud serupa.

Fenomena kecelakaan terparah dan tantangan yang harus dipertimbangkan dan ditangani (dicegah dan dimitigasi) di dalam desain reaktor berpendingin air adalah:

- Pengeluaran lelehan bertekanan tinggi dan pemanasan sungkup secara langsung,
- Produksi dan pembakaran hidrogen di dalam bejana tekan reaktor dan sungkup,
- Ledakan uap di dalam bejana tekan reaktor dan sungkup,

- Interaksi teras-beton di dalam sungkup , dan
- Jalur pintas lewat sungkup dan kehilangan kemampuan pembuangan panas dalam jangka panjang.

Didalam reaktor berpendingin gas yang harus diper-  
timbangkan dan ditangani:

- masuknya (*ingress*) air ke dalam teras,
- kecelakaan masuknya udara ke dalam pipa utama, dan
- kecelakaan pipa (*stand pipe*) pecah.

Bergantung pada desain, fenomena terkait dengan proses tersebut seperti transien reaktivitas, kejadian kekritisasi ulang, atau terjadinya benda terbang (*missile generation*) juga harus dipertimbangkan.

Ketentuan untuk memitigasi kecelakaan semacam itu harus ditetapkan selaras dengan persyaratan terbaru operasi instalasi di negara asal pemasok. Manual manajemen kecelakaan harus disediakan sebagai bagian dari dokumentasi instalasi.

Frekuensi kerusakan teras tahunan rata-rata dari instalasi, dievaluasi menggunakan PSA, harus kurang dari  $1 \times 10^{-5}$  kejadian/reaktor-tahun. Dosis seluruh tubuh pada batas tapak harus kurang dari 0.25 Sv untuk lepasan pada kecelakaan parah, frekuensi kumulatif kurang dari  $1 \times 10^{-6}$  /reaktor-tahun. Sistem sungkup harus didesain agar batasan paparan di atas dapat terpenuhi.

PK.1.6. *Untuk SEN, kajian harus dilakukan untuk membuktikan bahwa tingkatan pertahanan berlapis dipenuhi dan tidak saling gayut satu sama lainnya.*

Rentang tingkatan PB adalah dari keadaan operasi instalasi sampai keadaan kecelakaan instalasi. Tingkatan tersebut disusun berdasarkan derajat keparahan, mulai dari keadaan operasi (tingkat 1) sampai mitigasi konsekuensi radiologis lepasan dalam jumlah besar material radioaktif (tingkat 5). Kajian keselamatan mengenai tidak saling gayut tingkat yang berbeda pada PB harus dilakukan menggunakan kombinasi pendekatan deterministik dan probablistik yang sesuai, atau analisis bahaya.

PSA, jika dikerjakan secara seksama, akan menghasilkan nilai tidak saling gayut tingkatan PB (atau lebih umum akan memberikan titik berat di mana tingkatan tersebut tidak berdiri sendiri)

PSA meliputi:

- Identifikasi hubungan silang yang mencakup tidak saling gayut tingkatan PB;
- Dibutuhkan untuk tindakan manusia (untuk SEN rentang waktu tenggang dari 30 menit untuk tingkat 2 sampai sekurang-kurangnya 8 jam untuk tingkat 3 dan 4; karakteristik keselamatan melekat akan meniadakan perlunya tindakan manusia). Perlu diperhatikan bahwa tindakan manusia dapat berkontribusi pada meningkatnya ketangguhan instalasi (peningkatan tingkat PB) atau sebaliknya (diagnosis kecelakaan yang tidak tepat). Waktu tenggang yang lebih panjang memungkinkan peningkatan ketangguhan PB daripada ketidaktepatan dalam diagnosis kecelakaan; dan
- Keandalan sistem keselamatan pasif dan karakteristik keselamatan melekat relatif terhadap keandalan sistem keselamatan aktif - redundansi dan keberagaman.

Hasil dari PSA adalah rentang frekuensi terkait tingkatan PB yang berbeda; sasaran untuk SEN adalah nilai frekuensi lebih kecil (lebih baik) daripada frekuensi pada instalasi yang ada atau daripada nilai yang direkomendasikan (misal IAEA). PSA dapat dilengkapi dengan teknik non kuantitatif menggunakan pakar, seperti telaah formal desain. Keselamatan komprehensif dan verifikasi oleh pihak lain harus dilakukan untuk mengkonfirmasi bahwa desain akan memenuhi tujuan dan persyaratan keselamatan sebelum organisasi pengoperasi menyelesaikan pengajuan aspek teknis ke badan pengawas.

**Catatan :** Tanggungjawab untuk menjamin bahwa keselamatan desain dapat diterima merupakan tanggungjawab organisasi pengoperasi. Tugas menghasilkan desain yang aman merupakan tanggungjawab organisasi pendesain. Kelompok yang bertanggungjawab pada kajian keselamatan, terpisah dari yang membuat desain, perlu menyediakan verifikasi pihak lain bahwa semua persyaratan keselamatan dan tujuan keselamatan telah dipenuhi. Organisasi pengoperasi bertanggungjawab untuk memastikan bahwa ketentuan yang dibuat adalah efektif. Selain itu, organisasi pengoperasi harus memastikan adanya hubungan baik dengan kelompok pendesain dalam rangka menjamin bahwa desain memenuhi persyaratan dari staf pengoperasi dan konsisten dengan prosedur pengoperasian terantisipasi.

PK.1.7. *Operasi yang aman dari sebuah SEN harus didukung oleh Antarmuka Manusia Mesin yang dikembangkan dengan baik berdasarkan penerapan secara sistematis persyaratan faktor manusia ke dalam desain, konstruksi, pengoperasian dan dekomisioning.*

Pertimbangan sistematis antarmuka manusia-mesin dan faktor manusia harus dimasukkan ke dalam seluruh tahap desain dan dalam pengembangan terkait dengan persyaratan operasional.

Pendesain SEN harus semakin menitikberatkan faktor manusia untuk meminimalkan kemungkinan kesalahan manusia (misalnya operator atau pelaksana perawatan). Pengalaman dari pengoperasian instalasi nuklir dan praktik terbaik dari industri lainnya seperti industri penerbangan dan industri kimia harus dipertimbangkan dalam proses ini.

Terdapat dua pandangan mengenai faktor manusia: sisi pertama, staf pengoperasi dilihat sebagai sumber daya yang memainkan peran penting dalam operasi instalasi, pengujian, pemeliharaan dan inspeksi instalasi, dan kadangkala mengatasi kekurangan dalam sistem otomatis. Pada sisi lain, intervensi manusia juga dilihat sebagai faktor pengganggu dan yang membatasi keandalan yang pengaruhnya harus diperhitungkan dalam desain seluruh sistem dan fungsi instalasi untuk menjamin tingkat keselamatan yang memadai dan ketersediaan instalasi. Terdapat tiga kontribusi yang mungkin dari intervensi manusia dalam analisis bahaya kecelakaan:

- Kesalahan dalam operasi instalasi, pengujian atau perawatan yang berkontribusi pada kegagalan sistem atau pada ketersediaannya;
- Kesalahan dalam operasi instalasi, pengujian atau perawatan yang mengarah kepada kejadian pemicu; dan
- Intervensi dalam situasi insiden atau situasi kecelakaan yang dapat mempengaruhi urutan kejadian yang pada satu sisi menunjukkan kemampuan menangani situasi yang tidak terduga, namun pada sisi lain tindakan tersebut hanya memiliki keandalan yang terbatas.

Sebagai prinsip umum, harus dapat dipastikan bahwa:

- Fungsi-fungsi yang telah ditetapkan untuk staf operasi, meliputi tugas yang konsisten dan sesuai dengan kemampuan dan kekuatan staf operasi (derajat otomatisasi yang cocok, jumlah tugas yang sesuai, pembagian yang tepat antar tindakan operasi terpusat dan lokal); dan
- Antarmuka manusia-mesin (ruang kendali, peralatan kendali konvensional dan berbasis layar tampilan, pemrosesan informasi yang akan disampaikan kepada operator) secara optimal mendukung tugas operator dan meminimalkan kesalahan manusia.

Diharapkan bahwa kemampuan untuk memprediksi respons manusia terhadap situasi normal dan abnormal akan meningkat secara dramatis dalam rentang 50 tahun ke depan dan akan memberikan dampak besar pada desain dan operasi instalasi.

Begitupun teknologi simulator akan membaik yang memungkinkan diturukannya kejadian secara lebih realistis, termasuk kecelakaan terparah, dan menghasilkan perbaikan respons operator (lewat pelatihan). Bandingkan situasinya dengan bidang penerbangan.

**Catatan :** Desain juga perlu memperhitungkan kemampuan kinerja personel pengoperasian dan perawatan. Perhatian terhadap faktor manusia akan menjamin bahwa instalasi toleran terhadap kesalahan manusia. Di antara elemen yang sesuai dalam meminimalkan kesalahan manusia adalah aplikasi prinsip ergonomika secara sistematis.

PK.2.1. *SEN harus diupayakan menghilangkan atau meminimalkan beberapa bahaya yang terkait dengan instalasi yang ada dengan menerapkan karakteristik keselamatan melekat dan atau sistem pasif bilamana diperlukan.*

Analisis karakteristik keselamatan melekat adalah sangat sulit tapi dimungkinkan melalui pemodelan matematis yang memadai dan, dalam beberapa kasus dilakukan melalui pengujian secara eksperimen. Sebagian besar karakteristik keselamatan melekat untuk instalasi SEN diharapkan bersifat parsial, artinya karakteristik tersebut membatasi bahaya tetapi tidak menghilangkan bahaya tersebut.

Persyaratan tingkat satu bagi pengguna: adalah pembatasan fundamental dalam tipe reaktor daya atau operasi pada rentang daya, yang menjaga karakteristik keselamatan melekat secara absolut (misalnya reaktor daya memerlukan reaktivitas positif yang cukup untuk mengkompensasi racun xenon).

Desain SEN harus dibuat sedemikian rupa sehingga bahaya dapat dihindarkan (jika mungkin) atau diminimalkan (misalnya dengan membatasi gas eksplosif pada jumlah yang diperlukan saja atau dengan menggunakan fitur keselamatan melekat dalam desain teras dan operasi untuk membatasi reaktivitas lebih). Jika bahaya tidak dapat dihindarkan, sistem proteksi yang tepat harus tersedia. Selain itu, tindakan administratif harus ada untuk menghindari kesalahan manusia sejauh mungkin (misalnya dengan pembatasan pemindahan material yang berbahaya ke dalam sungkup/pengungkung selama periode pemadaman).

Kajian bahaya dan konsekuensinya harus dilakukan dengan pendekatan deterministik dan probabilistik. Untuk penilaian keteknikan dalam pendekatan deterministik, pengalaman operasi dan pertukaran informasi yang berkelanjutan dengan bidang yang sama adalah diwajibkan. Untuk pendekatan probabilistik, metode harus divalidasi (juga untuk sistem pasif) dan data yang digunakan harus andal.

Semua kajian harus meliputi seluruh keadaan operasi termasuk pemadaman, perawatan dan perbaikan antar waktu.

PK.3.1. *Instalasi SEN harus menjamin suatu penerapan konsep optimasi proteksi radiasi yang efisien melalui penggunaan otomatisasi, perawatan jarak jauh, dan pengalaman operasional dari desain yang ada.*

Untuk operasi normal, persyaratan ini mengikuti prinsip optimasi dosis yang telah diterima secara internasional untuk pekerja di instalasi nuklir (ALARA). Dosis dari fasilitas pengoperasian sedemikian rendah, walaupun demikian, dosis ini tidak keluar dari prinsip optimasi, maka tidak diperlukan pengurangan dosis lebih lanjut untuk maksud tertentu.

Pengalaman di reaktor yang ada, inspeksi saat operasi, pengujian periodik dan perbaikan (termasuk penggantian) merupakan penyumbang terbesar terhadap dosis yang diterima pekerja.

SEN dapat memanfaatkan konsep desain inovatif untuk mengurangi dosis pekerja tanpa biaya melalui misalnya inspeksi dan perawatan otomatis. Desain inovatif harus mudah dirawat melalui tata-ruang yang seksama, peralatan yang andal, dan ketersediaan prosedur perawatan secara elektronik saat bekerja untuk memandu para pekerja perawatan.

Instalasi harus didesain dan dikonstruksi agar paparan radiasi yang diterima pekerja kurang dari 1 orang-Sv/reaktor-tahun. Tujuannya adalah untuk mengoptimalkan lebih lanjut dosis radiasi kolektif untuk personil instalasi dan meminimalkan lepasan radioaktif dan kimia di bawah pedoman *IAEA Basic Safety Standard (BSS) 115* selama operasi maupun kondisi kecelakaan. Tujuan tersebut mengarah kepada penerapan teknologi proteksi radiasi yang lebih baik, material maju dan peningkatan kepatuhan personil terhadap aturan keselamatan radiasi. Hasil dari instalasi acuan dan tindakan untuk mencapai tujuan ini harus disediakan.

**PK.3.2.** *Dosis individual masyarakat dari instalasi SEN selama operasi normal harus merefleksikan penerapan konsep optimasi yang efisien, dan dosis tersebut mungkin dapat dikurangi di bawah tingkatan dari fasilitas yang ada untuk meningkatkan fleksibilitas penentuan tapak.*

Persyaratan ini menerapkan prinsip yang sama untuk optimasi dosis masyarakat tetapi bukan pengurangan untuk maksud tertentu. Instalasi pembangkitan yang ada mempunyai risiko yang sangat rendah (dibanding industri lainnya) akibat paparan radiasi dalam operasi normal dan tidak ada perubahan dramatis diperlukan dalam instalasi SEN.

Apabila instalasi SEN ditempatkan dekat dengan daerah permukiman yang padat (misal instalasi pemanasan kawasan lokal), maka pengurangan dosis mungkin diperlukan, misal dengan daur ulang aliran limbah, konsisten dengan praktik pada industri lain.

**Kebijakan bertetangga secara baik.** Instalasi harus didesain untuk menjadi tetangga yang baik terhadap lingkungan dan populasi di sekitarnya dengan meminimalkan lepasan radioaktif dan kimia sampai tingkatan yang dapat diterima. Laju lepasan untuk operasi normal dan insiden, “sasaran dan batasan utilitas” harus sesuai dengan persyaratan nasional dan internasional dan merupakan bagian penerapan konsep ALARA. Target lepasan untuk kecelakaan terparah digunakan sebagai “batas lepasan”. Nilai batas lepasan diarahkan sedemikian rendah sehingga konsekuensi sosial sebagai hasil dari efek kesehatan masyarakat dan kontaminasi tanah serta air akan menjadi terbatas. Realisasi sasaran ini berimplikasi :

- Tidak ada tindakan proteksi kedaruratan di luar 1 km dari reaktor selama pelepasan dini dari sungkup,
- Tidak ada perpindahan orang sementara pada setiap saat sekitar 3 km di luar dari reaktor, dan
- Tidak ada tindakan jangka panjang, termasuk pemindahan penduduk secara permanen (lebih lama dari 1 tahun), pada suatu jarak 1 km di luar reaktor.

Dasar teknis untuk penyederhanaan rencana kedaruratan di luar tapak harus tersedia. Pada dasarnya tidak ada evakuasi di luar radius 1 km (untuk SEN) yang diperlukan. Sebagai tambahan, selain itu dituntut bahwa pembatasan pada konsumsi bahan makanan dan hasil pertanian harus dibatasi berdasarkan skala waktu dan luasan bidang tanah.

**Proteksi menghadapi sabotase.** Instalasi SEN harus didesain mempunyai proteksi yang baik terhadap sabotase dengan menggunakan prinsip proteksi fisik yang mempertimbangkan pengaruh kebakaran, ledakan kimia, tumbukan kapal terbang dan rudal. Gedung dan tata ruang tapak harus menjamin isolasi lingkungan dengan akses yang terkendali ketat, serta pengawasan dari penjaga terhadap orang dan barang yang tidak berizin.

PK.4.1. *Basis keselamatan instalasi SEN harus ditetapkan secara meyakinkan lebih dahulu sebelum dikembangkan secara komersil.*

Terminologi “basis keselamatan” dipahami sebagai persyaratan keselamatan yang terdokumentasi dan kajian keselamatan desain instalasi sebelum instalasi tersebut dikonstruksi dan dioperasikan.

Basis keselamatan meliputi konsep yang ditetapkan secara baik untuk pencapaian keselamatan dengan proses yang logis dan dapat diaudit untuk menentukan dan mendokumentasikan semua persyaratan desain dan keselamatan untuk fasilitas. Iterasi antara desain, RD & D dan analisis keselamatan merupakan sebuah bagian yang penting dari proses ini. Sekali persyaratan telah ditetapkan, hal itu harus ditunjukkan dan di dokumen tasikan bahwa persyaratan tersebut terpenuhi.

Teknologi yang dipadukan dalam desain harus terbukti atau terkualifikasi berdasarkan pengalaman atau pengujian atau kedua-duanya.

PK.4.2. *Penelitian, pengembangan dan demonstrasi pada keandalan komponen dan sistem, termasuk karakteristik keselamatan melekat, harus dilakukan untuk mencapai pemahaman yang menyeluruh semua fenomena fisik dan keteknikan yang diperlukan untuk mendukung kajian keselamatan.*

Praktik yang umum untuk mengkaji perilaku sistem atau komponen berdasar pada perhitungan kode komputer, pengalaman operasi dan praktik keteknikan yang diterima secara umum. Pengembangan desain SEN mungkin menggunakan material teras baru, menggunakan fluida dalam rejim termohidraulika yang baru, dan menggunakan pendingin dan bahan bakar yang berbeda secara radikal. Pengembangan kode komputer untuk memodelkan desain seperti itu harus dilakukan paralel. Kode komputer seperti itu harus secara formal diverifikasi dan divalidasi di daerah keberlakuannya, menggunakan teknik terkini yang ditetapkan dalam standar internasional (matrik yang syah, kuantifikasi ketidakpastian, pembuktian mampu diskala, alat verifikasi yang terotomatisasi, laporan kualifikasi kode, dan lain sebagainya) dan harus dijelaskan dengan baik (spesifikasi persyaratan perangkat lunak, manual teori, manual pengguna, diagram alir, dan sebagainya).

Sekurang-kurangnya persyaratan berikut harus dipenuhi:

- Semua fenomena penting, yang mempengaruhi keselamatan, serta dimasukkan dalam desain dan operasi instalasi daya nuklir atau instalasi daur bahan bakar harus dipahami, dimodelkan dan disimulasikan (termasuk pengetahuan ketidakpastian, dan pengaruh penskalaan dan lingkungan); dan
- Perilaku komponen atau sistem terkait keselamatan harus dimodelkan dengan keakuratan yang dapat diterima, yang melibatkan pengetahuan dari semua parameter dan fenomena yang berkaitan dengan keselamatan, dan divalidasi dengan menggunakan basis data yang andal.

PK.4.3. *Instalasi skala pilot atau fasilitas demonstrasi berskala besar harus dibuat untuk reaktor dan atau pemroses daur bahan bakar, yang menggambarkan kebiasaan utama dan pengalaman pengoperasian yang ada.*

Demonstrasi teknologi baru biasanya berasal dari eksperimen skala meja, ke pengujian skala kecil industri, ke pengujian skala besar, sampai (kalau mungkin) instalasi pilot skala kecil, instalasi demonstrasi skala besar, sampai ke komersialisasi penuh. Kebutuhan untuk instalasi pilot atau instalasi demonstrasi akan tergantung pada derajat kebaruan proses dan risiko potensial yang terkait terhadap pemilik dan masyarakat.

Diketahui bahwa instalasi pilot kecil hanya dapat dipergunakan untuk mendemonstrasikan fitur keselamatan yang memadai untuk kejadian sesuai tingkat 1 dan 2 dari konsep pertahanan berlapis (kegagalan dan operasi abnormal). Perilaku yang aman dari SEN selama kecelakaan (dengan potensial lepasan radioaktif) tidak dapat dipelajari dengan instalasi pilot dan didemonstrasikan seperti didefinisikan di persyaratan PK.4.2 di atas, penggunaan kode komputer atau analisis tervalidasi dengan misalnya uji efek ganda terintegrasi. Metode ini dicakup dalam persyaratan PK.4.4. Namun instalasi pilot harus mampu mendemonstrasikan kemampuan mengatasi pemicu kecelakaan yang potensial.

Penting bahwa fasilitas instalasi pilot adalah dengan skala yang memadai, sehingga hasil dan pengalaman yang diperoleh dari fasilitas seperti itu dapat diekstrapolasikan dengan derajat ketelitian yang layak pada instalasi skala penuh, misalnya untuk instalasi konversi dan pabrikasi akan dikonstruksi untuk memproses 100 ton bahan bakar nuklir setiap tahun, hal itu mungkin cocok untuk mempunyai sebuah instalasi percobaan yang dapat memproses 1-10 ton per tahun, bukannya fasilitas yang hanya memproses beberapa kg.

PK.4.4. *Untuk analisis keselamatan, metode deterministik dan probabilistik harus dipergunakan, bilamana layak, untuk menjamin pengkajian keselamatan yang mendalam dan memadai dibuat. Bila teknologi sudah matang, maka pendekatan "estimasi terbaik" (plus analisis ketidakpastian) berguna untuk menentukan bahaya yang sesungguhnya, khususnya untuk membatasi kecelakaan terparah.*

Analisis keselamatan harus dilakukan dengan menggunakan kombinasi evaluasi deterministik dan probabilistik yang cocok. Analisis harus mencakup semua mode operasi instalasi untuk memperoleh kajian lengkap mengenai kesesuaian dengan pertahanan berlapis. Untuk instalasi yang sederhana, terutama terkait dengan daur bahan bakar, mungkin hanya diperlukan analisis deterministik, sepanjang skenario dipilih untuk mendemonstrasikan cakupan seluruh tingkatan pertahanan berlapis.

Jangkauan penggunaan tiap metode harus konsisten dengan kepercayaan terhadap metode untuk aplikasi tertentu, dalam lingkup keterbatasan data keandalan, mode kegagalan dan fenomena fisik. Dalam beberapa sistem inovatif, penerapan metode probabilistik lebih terbatas dibandingkan dengan metode deterministik untuk tipe reaktor yang ada, sebagai akibat perubahan teknologi dan keterbatasan data.

Derajat konservatisme dalam analisis keselamatan deterministik harus dalam proporsi yang tepat dengan ketidakpastian teknologi yang dievaluasi; bilamana fenomena diketahui dengan baik dan kode tervalidasi, hipotesis yang realistis (perkiraan terbaik) dapat dipertimbangkan dalam

analisis. Analisis perkiraan terbaik harus diikuti dengan perhitungan ketidakpastian dari eksperimen, model dan instalasi yang mempengaruhi hasil. Bila teknologi itu sendiri tidak pasti, pendekatan yang lebih tradisional harus dilakukan, sebagai contoh, bila metal cair berbeda dengan yang dipergunakan dalam reaktor saat ini, kode komputer yang ada tidak mampu mensimulasikan semua fenomena. Sampai perangkat tersebut tersedia dan terbukti cukup akurat, maka batas keselamatan dan konservatisme harus diterapkan dalam simulasi yang runtut.

Selain kajian kerentanan instalasi terhadap kecelakaan terparah dan lepasan dalam jumlah besar, analisis keselamatan probabilistik harus digunakan mulai dari tahap desain untuk:

- Menentukan kondisi dan beban yang lebih realistik untuk sistem mitigasi termasuk sungkup;
- Mengkaji keseimbangan desain dan kelemahan yang mungkin;
- Mengintegrasikan faktor manusia ke dalam analisis keselamatan;
- Mengidentifikasi batas keselamatan;
- Membantu mendefinisikan persyaratan keselamatan operasional; dan
- Mengidentifikasi sensitivitas dan ketidakpastian.

PK.5.1. *Sistem manajemen mutu harus memenuhi persyaratan terbaru standar International, standar Nasional Indonesia dan standar keselamatan mutu IAEA.*

Organisasi yang terlibat dalam proyek SEN harus menetapkan persyaratan sistem manajemen mutu melalui lima tahapan mencakup:

- Sistem Manajemen Mutu
- Tanggung Jawab Manajemen
- Manajemen Sumber Daya
- Realisasi Produk
- Pengukuran, Analisis dan Perbaikan

### 5.2.3 Beberapa Pertimbangan untuk Keselamatan Fasilitas Daur Bahan Bakar Nuklir (FDBBN)

#### a. Umum

1. Bahaya terhadap keselamatan yang khas dalam FDBBN antara lain meliputi lepasan radioaktivitas, kontaminasi dan paparan terhadap pekerja, kekritisitas, dan lepasan bahan kimia dan energi tersimpan (misal: pemanasan dari peluruhan radioaktif, reaksi kimia termasuk kebakaran, dan kegagalan sistem bertekanan). Teknik dan metode yang mirip dengan yang digunakan dalam FDBBN yang ada saat ini harus digunakan dalam FDBBN – SEN untuk membatasi bahaya tersebut, dan FDBBN harus memanfaatkan dari desain teknis yang teruji. Keunggulan dari ciri keselamatan melekat harus dimanfaatkan, dan sistem keselamatan pasif harus digunakan semaksimal mungkin. Otomatisasi pada tingkat yang lebih maju dari fasilitas fabrikasi bahan bakar lebih disukai dalam kurun waktu 50 tahun ke depan. Sementara waktu, pengoperasian secara manual tidak bisa dihilangkan seluruhnya sehingga masih lebih ditekankan pada prosedur administratif, termasuk kejelasan tanggung-jawab dan pelatihan yang memadai untuk kendali operasi.
2. Terdapat pengertian bersama bahwa strategi PB juga harus digunakan dalam FDBBN, tetapi dalam penerapannya harus mempertimbangkan adanya perbedaan mendasar antara FDBBN dengan reaktor, antara lain:
  - Rapat daya di FDBBN jauh lebih kecil dibandingkan rapat daya di teras reaktor;
  - Total energi tersimpan dalam struktur padatan dan entalpi dari fluida atau gas selama operasi FDBBN lebih rendah bila dibandingkan dengan yang ada pada reaktor;
  - Dibanding reaktor, material radioaktif di FDBBN sering dalam keadaan lebih mudah terdispersi, aliran masuk-keluar material radioaktif (volumedana masa) dari FDBBN lebih tinggi, dan penghalang (*barrier*) terhadap lingkungan lebih sedikit karena

- Beberapa FDBBN menggunakan banyak bahan reaktif atau bahan kimia mudah terbakar/meledak, seperti *hidrazine*, asam nitrat, hidrogen, dll.
3. Perbedaan tersebut menghasilkan beberapa konsekuensi berikut :
    - Risiko pekerjaan dalam FDBBN perlu mendapat perhatian khusus sebab kedekatan operator dengan material yang diproses;
    - Lepas rutin material berbahaya dari FDBBN seperti pada tambang uranium mungkin lebih besar akibat proses mekanik atau kimia;
    - Kebolehjadian lepasan energi kimia (seperti kebakaran, ledakan) dalam FDBBN adalah lebih besar;
    - Potensi dampak kecelakaan kekritisitas dalam FDBBN jauh lebih kecil dibandingkan dengan kecelakaan kekritisitas di reaktor karena energi yang terlepas jauh lebih rendah.
  4. Perbedaan tersebut menyebabkan perlunya modifikasi pendekatan terhadap keselamatan. Seperti disebutkan di atas, penekanan pada FDBBN yang ada saat ini adalah pada kendali operasi dengan menggunakan kendali administratif dan operator untuk menjamin keselamatan, berbeda dengan sistem keselamatan teknis (*engineered safety features*) yang digunakan di reaktor. Penekanan yang lebih ditujukan pada pencegahan kekritisitas mengingat mobilitas (distribusi dan pemin-dahan) bahan fisil di FDBBN jauh lebih besar.
  5. Oleh karena kedekatan antara operator dengan bahan nuklir dalam proses, yang mungkin meliputi penanganan dan pemindahan bahan nuklir secara terbuka dalam proses rutin, perhatian khusus harus ditujukan bagi keselamatan pekerja. Potensi masuknya material radio aktif ke dalam tubuh mensyaratkan pengendalian untuk mencegah dan meminimalkan kontaminasi dan menjamin selalu tetap berada dalam batas dosis operational. Selain itu, lepasan material radioaktif ke dalam daerah kerja fasilitas, baik melalui lintasan yang termonitor maupun tidak, akan menyebabkan paparan meningkat secara signifikan, terutama dari isotop radiotoksis berumur panjang.
  6. Jumlah penghalang fisik dalam fasilitas nuklir yang diperlukan untuk melindungi lingkungan dan masyarakat tergantung pada potensi

bahaya internal dan eksternal, dan potensi konsekuensi kegagalannya; oleh karena itu, jumlah dan kekuatan penghalang untuk berbagai jenis reaktor (misal: teras daya rendah dengan teras daya tinggi) dan untuk FDBBN berbeda. Sebagai contoh, untuk ujung depan daur bahan bakar uranium alam, keselamatan difokuskan pada pencegahan penyebaran kontaminasi material radioaktif tingkat-rendah. Pada penambangan uranium, fokus utamanya adalah mencegah kontaminasi pada air tanah dan air permukaan akibat lepasan atau buangan sisa penambangan (*mining tails*).

Produk samping uranium dan bahan kimia adalah bahaya yang potensial dari pengoperasian fasilitas konversi. Pada fasilitas fabrikasi bahan bakar, keselamatan difokuskan pada pencegahan kekritisitas disamping penyebaran kontaminasi material radioaktif tingkat-rendah.

7. Penerapan lima (5) tingkat PB pada FDBBN mungkin tidak sama persis seperti pada instalasi reaktor. Akan tetapi, strategi dasarnya adalah sama, yaitu bahwa semua tingkatan proteksi harus diterapkan. Selain itu, mengandalkan aksi manusia dalam penjaminan tak saling gayut pada tingkatan yang berbeda PB harus dikurangi.

#### **b. Fasilitas Fabrikasi Bahan Bakar Uranium Pengayaan Rendah (FFBBU)**

1. Fungsi keselamatan FFBBU, yaitu fungsi yang mencegah kegagalan dengan konsekuensi/dampak radiologik atau kimia terhadap pekerja dan lingkungan, meliputi : (i) pencegahan kekritisitas, (ii) pengungkungan paparan internal dan bahaya kimia, dan (iii) proteksi terhadap penyinaran/iradiasi eksternal.
2. Pendekatan kontingensi ganda dipilih untuk mencegah kekritisitas melalui desain. Pendekatan ini mensyaratkan bahwa sebelum kekritisitas terjadi harus diawali oleh sekurang-kurangnya ada dua kejadian, tak saling gayut dan perubahan secara bersamaan dalam proses. Sistem harus selalu dalam batas sub-kritis selama operasi normal, dan selama kejadian operasional terantisipasi, dan pada kondisi kecelakaan dasar desain.
3. Pengungkung bahaya kimia harus meliputi pengendalian terhadap setiap lintasan ke daerah kerja dan lingkungan. Pengungkungan

harus menjadi dasar utama proteksi terhadap penyebaran debu yang terkontaminasi, misalnya pada area/ruangan dimana ditangani serbuk uranium atau bahan berbahaya berupa gas dalam jumlah yang signifikan. Apabila dapat dilaksanakan dan dalam rangka meningkatkan efektifitas pengungkungstatis, pengungkung dinamis harus digunakan untuk membuat aliran udara ke arah peralatan/area yang memiliki potensi kontaminasi lebih besar. Cara ini, pengurangan tekanan absolut dapat ditetapkan antara kondisi lingkungan di luar dengan tempat bahan berbahaya di dalam gedung.

4. Dosis eksternal dapat dikendalikan melalui kombinasi jarak, waktu dan perisai. Oleh karena bahan uranium memiliki aktivitas jenis relatif rendah, perisai yang sudah tersedia di FFBBU seperti dinding bejana/peralatan dan dinding pipa sudah cukup untuk mengendalikan dosis. Pemasangan perisai harus dipertimbangkan pada area yang menyimpan uranium dalam bentuk curah (*bulk*). Apabila bahan yang diproses adalah uranium selain uranium alam, atau uranium diperkaya, perisai mungkin diperlukan untuk melindungi pekerja akibat meningkatnya laju paparan radiasi gamma.
5. Kecelakaan spesifik berikut harus dipertimbangkan sebagai kecelakaan dasar desain (KDD) bila melaksanakan analisis keselamatan instalasi (FFBBU):
  - Kecelakaan kritikalitas nuklir, misal: dalam area proses basah;
  - Lepas uranium, misal: meledaknya tangki pereaksi dalam proses konversi;
  - Lepas  $UF_6$  dari tangki panas yang robek/pecah;
  - Lepas HF dari tangki penyimpanan yang robek/pecah.

Tiga kecelakaan yang pertama akan menimbulkan konsekuensi radiologik pada pekerja di tapak dan juga menimbulkan dampak serius di luar tapak dan lingkungan. Sedangkan satu kecelakaan yang terakhir akan membawa dampak kimia, baik di dalam tapak maupun di luar tapak.

6. Kebolehjadian suatu KDD harus diminimalkan, dan konsekuensinya harus dikendalikan melalui penggunaan struktur, sistem dan komponen.

7. Penyebaran tak terkendali bahan radioaktif ke lingkungan akibat kecelakaan dapat terjadi apabila barrier pengungkung rusak. Barrier meliputi antara lain peralatan proses sendiri, atau ruangan atau struktur bangunan. Selain itu, ventilasi dari sistem pengungkung, sistem yang melepaskan gas buang melewati proses pembersihan gas seperti filter, sebelum dibuang ke lingkungan melalui cerobong pada kondisi operasi normal mengurangi lepasan material radioaktif ke lingkungan hingga jumlahnya sangat rendah. Dalam hal ini, sistem ventilasi juga dapat dipertimbangkan sebagai barrier pengungkung.
8. Untuk memfasilitasi dekontaminasi dan dekomisioning nantinya, dinding, lantai dan langit-langit ruangan FFBBU dimana mungkin terdapat kontaminasi harus menggunakan bahan tak berpori dan mudah didekontaminasi. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan pelapis khusus pada permukaannya dan menghindari adanya area yang sulit dijangkau. Selain itu, setiap permukaan yang berpotensi terkontaminasi harus mudah diakses untuk dekontaminasi periodik dan pada kondisi tertentu.
9. FFBBU seperti halnya fasilitas industri lainnya harus didesain dapat mengendalikan bahaya kebakaran dan bahaya ledakan untuk melindungi pekerja dan masyarakat. Kebakaran dan ledakan dapat menimbulkan penyebaran bahan radioaktif atau bahan beracun lainnya melalui kerusakan barrier pengungkung, atau menyebabkan kecelakaan kritikalitas akibat berubahnya kondisi selamat (geometri, sistem kontrol moderasi). Pencegahan yang tepat harus dilakukan untuk meyakinkan bahwa kebolehdjian kebakaran dan ledakan diminimalkan. Bahaya kebakaran dan ledakan harus dipertimbangkan karena banyak ditemui di FFBBU bahan seperti amoniak *anhydrous* (mudah meledak dan terbakar), asam sulfat atau asam nitrat (pemanik bila di dalam bahan organik), zirkonium (bahan logam mudah terbakar khususnya dalam bentuk serbuk), hidrogen harus dipertimbangkan.
10. Banjir internal di FFBBU dapat menyebabkan penyebaran bahan radioaktif dan perubahan kondisi moderasi. Dalam instalasi dimana terdapat bejana/tanki atau pipa berisi air, analisis kekritisian harus mempertimbangkan jumlah maksimum volume air terbesar di

dalam ruang yang ditinjau begitu pula ruang lain yang berhubungan.

11. Kebocoran pada komponen seperti pompa, katup dan pipa dapat menyebabkan penyebaran bahan radioaktif (misalnya larutan uranyl nitrat) maupun bahan kimia toksik (misalnya  $F_2$  dan HF). Bocoran fluida berhidrogen (misalnya air, oli, dll) dapat mengubah moderasi dalam bahan fisil dan mengurangi keselamatan kritikalitas. Bocoran gas ( $H_2$ , gas alam, propan) atau cairan mudah terbakar dapat menimbulkan ledakan dan atau kebakaran. Dalam kasus tersebut, sistem deteksi kebocoran harus digunakan.
12. Struktur, sistem dan komponen harus mampu melakukan fungsi keselamatannya dalam kondisi kehilangan daya listrik normal, atau item tersebut harus mencapai konfigurasi gagal selamat berdasarkan desain. Sebagai contoh, penyedia daya darurat harus diperuntukkan bagi:
  - Sistem peringatan kecelakaan kritikalitas;
  - Kipas ventilasi bila diperlukan untuk pengungkungan bahan fisil;
  - Komponen yang digunakan untuk menjaga proses agar tetap terkendali (misal : elemen pemanas dan katup)
13. Kejadian pemicu dari luar, seperti gempa bumi, banjir, kebakaran, kondisi cuaca, dll., harus dipertimbangkan juga dalam desain FFBBU.

## **5.3 Lingkungan dan Kondisi Tapak**

### **5.3.1 Prinsip Dasar:**

PDLT.1. Dampak negatif yang diperkirakan (estimasi terbaik) dari SEN terhadap lingkungan harus masih berada di dalam batasan kinerja SEN terkini yang menghasilkan produk energi yang serupa.

PDLT.2. SEN harus mampu memberikan kontribusi dalam memenuhi kebutuhan energi nasional pada abad ke-21, sejalan dengan penggunaan sumber daya tak terbarukan seefisien mungkin.

PDLT.3. SEN harus dirancang dan dioptimalkan dengan memperhitungkan data utama tapak dan lingkungan.

### 5.3.2 Persyaratan

PLT.1.1. *Pemicu dampak lingkungan dari tiap bagian SEN selama siklus hidupnya harus dapat dikendalikan ke tingkat setara atau lebih baik dari standar yang berlaku saat ini.*

Semua sistem energi pasti mengakibatkan pemicu dampak lingkungan, seperti radionuklida atau bahan-bahan kimia nonradioaktif dan penggunaan sumber daya, yang berpotensi memberikan dampak negatif pada lingkungan dalam skala lokal, regional, atau global. Operator fasilitas nuklir bertanggung jawab dalam mengendalikan pemicu dampak lingkungan ini. Fungsi desain SEN yang inovatif, seperti kriteria desain, adalah menyediakan pengendalian untuk semua pemicu dampak lingkungan pada SEN. Semua pemicu dampak lingkungan harus dikendalikan ke tingkat setara, lebih baik dari standar yang berlaku atau standar yang diberlakukan pada saat desain SEN tersebut dikaji. Tiap standar dapat bersifat setara, kurang atau lebih ketat daripada persyaratan standar yang berlaku saat ini, tergantung pemahaman ilmiah terhadap dampak lingkungan dan persepsi pihak pemangku kepentingan terkait.

PLT.1.2. *Dampak buruk terhadap lingkungan akibat SEN harus serendah mungkin sesuai praktik yang masuk akal, dengan mempertimbangkan faktor sosial dan ekonomi.*

SEN harus dibangun berdasarkan standar lingkungan yang lebih baik dari yang ada saat ini. Namun demikian perlu diketahui bahwa pada beberapa kasus tertentu peningkatan unjuk lingkungan dari fasilitas atau proses tertentu mungkin menyebabkan dampak yang lebih parah pada bagian lain di sistem energi tersebut. Karena itu, persyaratan ini (i) menerapkan falsafah pencapaian kinerja terbaik yang dapat dipraktikkan terhadap keseluruhan SEN, (ii) memperluas penerapan filosofi itu terhadap semua dampak lingkungan yang merugikan, bukan hanya dampak radiologis terhadap manusia,

dan (iii) tetap menyadari bahwa biaya yang ditanggung untuk meningkatkan unjuk lingkungan harus sebanding dengan manfaatnya.

Falsafah dasar adalah bahwa SEN harus dirancang menurut prinsip rekayasa moderen. Kemudian, desain harus dievaluasi untuk verifikasi bahwa risiko terhadap lingkungan seminimal mungkin (ALARP=*As Low As Reasonably Practicable*) dengan mempertimbangkan faktor sosial dan ekonomi. Analisis ALARP meliputi evaluasi kerugian dan keuntungan dalam mengurangi tingkat pemicu dampak lingkungan yang signifikan. Evaluasi ini akan mengarahkan pada pelaksanaan metode reduksi atau penolakan terhadap reduksi ke tingkat terendah karena biaya reduksi secara signifikan jauh lebih tinggi ketimbang manfaatnya.

PLT.2.1. *SEN harus dapat memberikan kontribusi dalam pemenuhan kebutuhan energi nasional pada abad ke-21 tanpa mengalami pengurasan material fisil/fertil dan material lain yang tak-terbarukan, dengan mempertimbangkan prakiraan pemakaian material tersebut di luar penggunaan untuk SEN. Di samping itu, SEN harus dapat mendukung pemakaian sumber daya tak-terbarukan secara efisien.*

SEN memerlukan sumberdaya (listrik atau lainnya) untuk operasi, konstruksi fasilitas, dan sebagainya. Daya yang tersedia pada suatu saat untuk digunakan oleh SEN dari semua sumber, internal dan eksternal, pada setiap saat dalam siklus hidupnya harus sama dengan atau melampaui daya yang dibutuhkan SEN pada waktu tertentu. Pada awal siklus hidup SEN, semua daya harus tersedia dari sumber eksternal, selanjutnya pada saat tertentu, sebagian besar atau keseluruhan sumber daya untuk operasi sistem dan/atau peningkatan kebutuhannya dapat dipenuhi secara internal oleh SEN.

Dalam penerapan dan pengembangan SEN, harus dipertimbangkan aspek pengurasan sumberdaya oleh industri lain dan kepentingannya.

PLT.2.2. *Luaran energi SEN harus melebihi energi yang diperlukan untuk melaksanakan dan mengoperasikan SEN dalam jangka waktu pendek yang dapat diterima.*

Luaran energi neto dari SEN adalah energi dapat pakai yang dihasilkan oleh sistem melebihi dan di atas jumlah energi yang dibutuhkan untuk mewujudkan dan mengoperasikan sistem tersebut selama siklus hidupnya. Kesetimbangan luaran energi neto harus menjadi positif dalam waktu pendek yang dapat diterima, semakin pendek semakin baik. Konsensus pemangku kepentingan harus menentukan target jangka waktu (dalam batas yang dapat diterima) sehingga kesetimbangan energi menjadi positif.

PLT.3.1. *SEN harus dibangun pada tapak yang dipilih yang memiliki karakteristik teknis sesuai persyaratan teknis IAEA mengenai tapak PLTN yang tercantum di dalam dokumen teknis mengenai pemilihan tapak.*

Pemilihan tapak harus mempertimbangkan fitur terkait yang mungkin mempengaruhi keselamatan SEN, atau sebaliknya, serta kelayakan pelaksanaan rencana kedaruratan. Semua aspek harus dievaluasi untuk masa bakti SEN yang diproyeksikan dan bila diperlukan dievaluasi ulang untuk memastikan penerimaan yang kontinyu terhadap keselamatan faktor-faktor tapak terkait.

Tapak potensial perlu dilakukan evaluasi terhadap akibat faktor alam dan ulah-manusia; khususnya untuk faktor alam seperti gempa, geologi, geofisik dan geoteknik, vulkanologi, oseanografi, geofisik lepas-pantai, dan banjir pantai, hidrologi dan hidrogeologi, yang dapat memberikan dampak negatif terhadap keselamatan SEN. Pengaruh SEN terhadap penduduk dan lingkungan sekitar harus dievaluasi, misalnya topografi, geografi, demografi, ekologi, meteorologi, aspek sosial-ekonomi dan sosial-budaya, kajian dosis, tata guna tanah dan kelautan, rencana kedaruratan dan studi perbandingan harus juga dievaluasi. Faktor terkait tapak yang relevan harus diperhitungkan dalam desain SEN dan kecukupan dalam desain perlu didemonstrasikan sebelum penerimaan tapak dapat dikonfirmasi. Evaluasi dari seluruh faktor terkait tapak harus dibuat oleh organisasi pengelola sebagai bagian dari pengajuan

perizinan dan ditinjau ulang oleh badan pengawas. Kepadatan dan distribusi penduduk selama masa bakti SEN adalah bagian penting dan perlu evaluasi berkala untuk memastikan kelayakan berkelanjutan dari rencana kedaruratan.

## **5.4. Pengelolaan Limbah**

### **5.4.1. Prinsip Dasar**

- PDL.1. Produksi limbah radioaktif di dalam SEN harus diupayakan serendah yang dapat dilakukan.
- PDL.2. Limbah radioaktif di dalam SEN harus dikelola sedemikian rupa sehingga menjamin tingkat perlindungan yang dapat diterima (akseptabel) baik untuk kesehatan manusia maupun lingkungan, terlepas waktu atau tempat dimana dampak tersebut mungkin timbul.
- PDL.3. Limbah radioaktif di dalam SEN harus dikelola sedemikian rupa sehingga tidak membebani generasi yang akan datang.
- PDL.4. Interaksi dan hubungan antar semua limbah yang timbul dan tahapan pengelolaan harus diperhitungkan di dalam desain SEN, sedemikian sehingga seluruh operasi dan keselamatan jangka panjang dapat dioptimalkan.

### **5.4.2. Persyaratan**

- PL.1.1. *SEN harus didesain untuk meminimalkan timbulnya limbah pada semua tahapan, dengan penekanan pada limbah yang mengandung unsur beracun berumur panjang yang kemungkinan dapat menyebar (mobile) di lingkungan repositori.*

Tahapan desain memberi peluang tertinggi untuk minimalisasi limbah karena tahap ini mempunyai fleksibilitas maksimum dalam mengatur sifat sistem untuk tujuan tersebut. Minimalisasi limbah melalui desain secara melekat lebih aman daripada bergantung pada tahap operasional. Adalah sangat penting untuk mengurangi unsur-unsur limbah yang beracun dan

PLT.2.2. *Luaran energi SEN harus melebihi energi yang diperlukan untuk melaksanakan dan mengoperasikan SEN dalam jangka waktu pendek yang dapat diterima.*

Luaran energi neto dari SEN adalah energi dapat pakai yang dihasilkan oleh sistem melebihi dan di atas jumlah energi yang dibutuhkan untuk mewujudkan dan mengoperasikan sistem tersebut selama siklus hidupnya. Kesetimbangan luaran energi neto harus menjadi positif dalam waktu pendek yang dapat diterima, semakin pendek semakin baik. Konsensus pemangku kepentingan harus menentukan target jangka waktu (dalam batas yang dapat diterima) sehingga kesetimbangan energi menjadi positif.

PLT.3.1. *SEN harus dibangun pada tapak yang dipilih yang memiliki karakteristik teknis sesuai persyaratan teknis IAEA mengenai tapak PLTN yang tercantum di dalam dokumen teknis mengenai pemilihan tapak.*

Pemilihan tapak harus mempertimbangkan fitur terkait yang mungkin mempengaruhi keselamatan SEN, atau sebaliknya, serta kelayakan pelaksanaan rencana kedaruratan. Semua aspek harus dievaluasi untuk masa bakti SEN yang diproyeksikan dan bila diperlukan dievaluasi ulang untuk memastikan penerimaan yang kontinyu terhadap keselamatan faktor-faktor tapak terkait.

Tapak potensial perlu dilakukan evaluasi terhadap akibat faktor alam dan ulah-manusia; khususnya untuk faktor alam seperti gempa, geologi, geofisik dan geoteknik, vulkanologi, oseanografi, geofisik lepas-pantai, dan banjir pantai, hidrologi dan hidrogeologi, yang dapat memberikan dampak negatif terhadap keselamatan SEN. Pengaruh SEN terhadap penduduk dan lingkungan sekitar harus dievaluasi, misalnya topografi, geografi, demografi, ekologi, meteorologi, aspek sosial-ekonomi dan sosial-budaya, kajian dosis, tata guna tanah dan kelautan, rencana kedaruratan dan studi perbandingan harus juga dievaluasi. Faktor terkait tapak yang relevan harus diperhitungkan dalam desain SEN dan kecukupan dalam desain perlu didemonstrasikan sebelum penerimaan tapak dapat dikonfirmasi. Evaluasi dari seluruh faktor terkait tapak harus dibuat oleh organisasi pengelola sebagai bagian dari pengajuan

perizinan dan ditinjau ulang oleh badan pengawas. Kepadatan dan distribusi penduduk selama masa bakti SEN adalah bagian penting dan perlu evaluasi berkala untuk memastikan kelayakan berkelanjutan dari rencana kedaruratan.

## **5.4. Pengelolaan Limbah**

### **5.4.1. Prinsip Dasar**

- PDL.1. Produksi limbah radioaktif di dalam SEN harus diupayakan serendah yang dapat dilakukan.
- PDL.2. Limbah radioaktif di dalam SEN harus dikelola sedemikian rupa sehingga menjamin tingkat perlindungan yang dapat diterima (akseptabel) baik untuk kesehatan manusia maupun lingkungan, terlepas waktu atau tempat dimana dampak tersebut mungkin timbul.
- PDL.3. Limbah radioaktif di dalam SEN harus dikelola sedemikian rupa sehingga tidak membebani generasi yang akan datang.
- PDL.4. Interaksi dan hubungan antar semua limbah yang timbul dan tahapan pengelolaan harus diperhitungkan di dalam desain SEN, sedemikian sehingga seluruh operasi dan keselamatan jangka panjang dapat dioptimalkan.

### **5.4.2. Persyaratan**

- PL.1.1. *SEN harus didesain untuk meminimalkan timbulnya limbah pada semua tahapan, dengan penekanan pada limbah yang mengandung unsur beracun berumur panjang yang kemungkinan dapat menyebar (mobile) di lingkungan repositori.*

Tahapan desain memberi peluang tertinggi untuk minimalisasi limbah karena tahap ini mempunyai fleksibilitas maksimum dalam mengatur sifat sistem untuk tujuan tersebut. Minimalisasi limbah melalui desain secara melekat lebih aman daripada bergantung pada tahap operasional. Adalah sangat penting untuk mengurangi unsur-unsur limbah yang beracun dan

berumur panjang dan yang mudah bergerak di lingkungan repositori. Metode untuk mengurangi limbah radio-aktif meliputi:

- Pemisahan aliran limbah untuk menghindari kontaminasi silang, serta untuk meningkatkan proporsi limbah yang sesuai untuk dikendalikan atau dilepas ke lingkungan, serta untuk menurunkan volume limbah yang berbahaya dalam jangka panjang;
- Daur ulang dan pemanfaatan ulang material yang jika tidak dilakukan akan menjadi limbah radioaktif;
- Optimalisasi desain untuk memudahkan *dekomisioning* dan pembongkaran (*dismantling*) fasilitas yang ada;
- Ekstraksi hasil peluruhan berumur panjang di dalam operasi penambangan dan pengolahan bijih (*mining and milling*); dan
- Reduksi limbah sekunder dari sistem pengelolaan limbah.

Pilihan teknologi yang patut dipertimbangkan untuk pengembangan lebih lanjut meliputi:

- Aplikasi bahan maju, seperti baja tanpa-kobalt, untuk mengurangi aktivasi;
- Meningkatkan efisiensi daur bahan-bakar;
- Meningkatkan efisiensi proses konversi energi pada reaktor; dan
- Meningkatkan teknologi dekontaminasi.

PL.2.1. *Paparan radiasi dan kimia terhadap manusia yang berasal dari sistem pengelolaan limbah SEN harus di bawah ambang yang dapat diterima terkini dan proteksi kesehatan manusia dari paparan radiasi dan bahan kimia beracun harus dioptimalkan.*

SEN harus didesain dengan pertimbangan bahwa efek radiologik yang ditimbulkan akan di bawah tingkat yang dapat diterima terkini. Walaupun kemungkinan bahwa radiasi tingkat rendah lebih tidak berbahaya terhadap manusia dibandingkan yang dituangkan dalam kebijakan peraturan terkini, prinsip pencegahan menetapkan bahwa desain proteksi radiologik harus lebih mengutamakan aspek keselamatan.

Optimasi desain sistem pengelolaan limbah harus dipandang dalam konteks kajian SEN secara holistik dan optimasi tiap komponen tunggal bersifat sekunder. Faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan meliputi:

- Radiotoksitas limbah yang dihasilkan sebagai fungsi waktu;
- Kemampuan formasi/bentuk limbah (*waste form*) untuk menahan radionuklida pada kondisi normal dan kecelakaan;
- Mobilitas unsur toksik dalam jalur lingkungan;
- Jangka waktu limbah yang mengandung radionuklida berumur panjang berada di tempat penyimpanan sementara;
- Derajat keselamatan bahwa limbah dapat disimpan secara pasif; dan Paparan radiasi pekerja (*occupational exposure*) dalam fasilitas pengelolaan limbah.

PL.2.2. *Penglepasan kumulatif radionuklida dan racun kimia dari komponen pengelolaan limbah SEN harus diminimalkan.*

Penglepasan kumulatif terhadap waktu dan ruang, tanpa memperhatikan batas negara, harus dipertimbangkan. Penglepasan nonradioaktif dari pengelolaan limbah radioaktif juga harus diperhitungkan. Sebagai prioritas pertama adalah meminimalkan timbulnya limbah melalui desain. Prioritas selanjutnya adalah menyempurnakan proses dalam sistem pengelolaan limbah. Strategi pengelolaan limbah untuk meminimalkan bahaya dari limbah radioaktif harus diimplementasikan pada setiap bagian SEN meliputi : metode penambangan dan pengolahan bijih uranium, konversi dan fabrikasi bahan bakar, reaktor, daur bahan bakar maju serta pengolahan limbah.

*Metode penambangan dan pengolahan bijih.* Penambangan dan pengolahan bijih disertai dengan penglepasan beberapa induk radioaktif ke lingkungan dan inilah yang menimbulkan risiko bahaya radiologik jangka panjang dari sisa proses

pengolahan (*tailing*). Metode separasi kimia radionuklida umur panjang seperti  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  harus dipertimbangkan dalam mendesain proses penambangan dan pengolahan bijih untuk SEN.

*Metode konversi dan fabrikasi bahan bakar.* Fasilitas konversi dan fabrikasi elemen bahan nuklir dapat membahayakan keselamatan secara khusus karena menimbulkan banyak efluen atau berpotensi besar menimbulkan limbah amat berbahaya ke lingkungan. Timbulnya efluen dalam bentuk aktivitas dan volume harus dipertahankan pada tingkat minimum yang dapat dicapai dalam praktik oleh tindakan desain dan operasi yang tepat. Penanganan efluen dan penyimpanan sementara harus dikendalikan secara ketat konsisten dengan persyaratan untuk pembuangan limbah akhir yang selamat. Efluen dalam bentuk cair dan gas yang ditimbulkan oleh fasilitas konversi dan fabrikasi harus diproses untuk mereduksi dampak pada kesehatan dan lingkungan akibat penglepasannya. Sistem untuk memproses efluen dapat mencakup sistem ventilasi dilengkapi dengan sistem filter untuk mencegah dispersi zat-zat aerosol yang tidak diinginkan di dalam instalasi, atau untuk mengendalikan penglepasan zat-zat berbahaya keluar. Untuk memulihkan cairan dan mendaur ulang produk-produk terpilih dengan suatu sistem penyaringan yang tepat terpasang dapat disatukan dalam desain fasilitas konversi dan fabrikasi sehingga timbulnya material limbah dapat dibuat minim. Instalasi Konversi dan Fabrikasi Bahan Bakar harus dioperasikan demikian rupa sehingga mengendalikan dan membuat seminim mungkin, sejauh masuk akal dalam praktik, produksi segala macam efluen, untuk menjamin agar penglepasan efluen ke lingkungan serendah ayng masuk akal dapat dicapai, dan guna mempermudah penanganan dan pembuangan efluen.

*Daur Bahan bakar maju.* Daur bahan bakar nuklir maju yang mampu mengurangi munculnya limbah aktivitas tinggi, serta mengurangi limbah penambangan dan pengolahan bijih, sekaligus memiliki sifat resisten terhadap proliferasi yang lebih baik serta mengikuti prinsip *safeguards bahan nuklir* harus dipertimbangkan.

*Reaktor.* Semua aspek desain dan operasi reaktor harus ditelaah dalam rangka identifikasi kemungkinan mengurangi volume limbah. Peningkatan efisiensi dalam proses konversi energi dapat mengurangi timbulnya limbah per unit energi bagi pemakai akhir energi.

Peningkatan pemanfaatan U dan Th hasil tambang oleh reaktor dapat mengurangi dampak penambangan dan pengolahan bijih. Dekontaminasi dengan metode lebih baik harus lebih sering digunakan. Sebagai contoh, logam teraktivasi dapat didekontaminasi sebagian dengan pelelehan, hal ini memanfaatkan beda sifat leleh antara produk fisi (PF) dan aktinida. Pemisahan aliran limbah yang datang dari berbagai tempat di reaktor harus digunakan untuk mencegah kontaminasi-silang limbah.

*Pengolahan limbah.* Tahapan pengelolaan limbah pra-disposal harus menjamin bahwa kemasan limbah memenuhi kriteria penerimaan limbah (*waste acceptance criteria*) daripada keadaan final yang selamat secara permanen. Limbah sekunder dan emisi gas atau cair dari fasilitas pengolahan limbah harus dipertimbangkan pada saat mengevaluasi metode penyiapan kondisi limbah. Pendekatan terbaik dalam pengurangan limbah adalah dengan melakukan pengurangan di sumber timbulnya limbah; walaupun demikian ada keterbatasan seberapa besar reduksi dapat diperoleh pada sumbernya, sementara operasi tetap harus berjalan secara efektif dan ekonomis. Limbah yang ditimbulkan dapat diolah untuk mengurangi volume pembuangan. Teknik reduksi ini sudah diterapkan pada berbagai fasilitas dengan menggunakan teknologi terkini yang meliputi:

- Kompaksi, super kompaksi, insinerasi, sintering dan pelelehan (untuk limbah padat);
- Presipitasi kimia, evaporasi, pertukaran ion dan separasi membran (untuk limbah cair); dan
- Solidifikasi konsentrat cair (sementasi, bituminisasi, vitrifikasi, pengeringan).

Teknologi baru untuk pengurangan volume juga dalam penyelidikan seperti:

- *Cold crucible melting* dan *plasma melting*; dan
- Teknologi tanpa-nyala seperti *steam reforming*, berkas elektron, foto oksidasi UV dan oksidasi limbah superkritis.

PL.3.1. *Keadaan akhir (final state)/pembuangan yang dapat dicapai harus dispesifikasikan untuk setiap jenis limbah, dan dapat memberi keselamatan yang permanen tanpa melakukan modifikasi lanjut. SEN yang direncanakan sedemikian rupa sehingga limbah yang timbul diproses ke keadaan akhir*

*sesegera mungkin sejauh yang dapat dilakukan. Keadaan akhir mesti sedemikian rupa sehingga setiap pelepasan bahan berbahaya ke lingkungan akan lebih rendah dari pada yang saat ini dibolehkan.*

*Formasi dan kemasan limbah.* Idealnya, bentuk dan kemasan limbah harus didesain mampu menahan zat radioaktif hingga meluruh ketingkat yang memenuhi persyaratan untuk dilepaskan/dibuang ke lingkungan. Bila hal ini tidak dapat direalisasikan, sistem pengelolaan limbah harus mengandalkan cara lain. Sesuai tidaknya bentuk dan kemasan limbah harus dibuktikan terhadap kondisi lingkungan yang bakal dialaminya di dalam skema pengelolaan limbah.

*Tempat penyimpanan akhir yang berisi limbah terkemas.* Pada akhirnya, komponen limbah yang berumur panjang harus diwujudkan dalam bentuk limbah akhir yang dikemas dan kemasan ini diletakkan di suatu tempat penyimpanan akhir. Sistem yang terintegrasi harus dibuktikan selamat secara permanen menurut standar peraturan terkini. Upaya terbesar saat ini dalam program di tingkat nasional bertumpu pada tempat penyimpanan akhir bawah tanah. Desain dan operasi fasilitas ini beragam, sebagai contoh pada kedalaman kemasan diletakkan, pemilihan media lapisan geologi, dan periode pemantauan sebelum penutupan tempat penyimpanan akhir tersebut.

*Safety case* didefinisikan sebagai jumlah total semua bukti baik kuantitatif maupun kualitatif, yang menunjang penetapan bahwa sistem pengelolaan limbah selamat dalam tingkatan yang dapat diterima (*acceptable*). Persyaratan minimumnya adalah peraturan perundangan yang terkait terpenuhi. Kondisi akhir yang ditetapkan harus selamat secara permanen dalam artian bahwa generasi mendatang tidak akan terpapar dengan risiko yang saat ini tidak dapat diterima. *Safety case* perlu meliputi analisis semua risiko yang berkaitan dengan kegagalan kontrol institusional. Diharapkan *safety case* ini dapat dibuat lebih mudah untuk kondisi akhir yang didasarkan pada keselamatan pasif, yaitu kontrol keselamatan institusional jangka panjang tidak perlu. Jika kontrol keselamatan institusional jangka panjang diperlukan, seperti dalam hal penyimpanan (*storage*) abadi maka risiko yang terkait dengan potensi kegagalan kontrol ini harus diperhitungkan dalam *safety case*. *Safety case* harus bersandar pada analisis teoritis yang dapat diterima secara umum, digabungkan dengan fakta unjuk kerja komponen sejauh mungkin dari operasi masa kini fasilitas yang relevan. Sebagai contoh, bentuk limbah yang memenuhi kriteria penerimaan limbah dari fasilitas disposal terkini akan menjadi dapat diterima.

- PL.3.2. *Biaya untuk pengelolaan seluruh limbah di dalam siklus SEN harus diperhitungkan ke dalam perkiraan biaya energi, sedemikian rupa sehingga meliputi semua akumulasi tanggung jawab pada setiap tahapan dari siklus.*

Tanggung jawab untuk menyediakan sumber daya, termasuk dana dan teknologi terbukti, dibebankan pada pihak penghasil limbah yang memperoleh keuntungan, dan biaya ini harus diperhitungkan dalam estimasi biaya energi. Internalisasi semua biaya merupakan persyaratan mendasar dari manajemen lingkungan yang baik. Aset yang terakumulasi untuk mengelola limbah harus mencakup seluruh pertanggungjawaban (*liability*). Hal ini bertentangan dengan praktik umum, yaitu "*underfunding*" pada pertanggungjawaban saat ini dan perencanaan nilai uang mendatang untuk kompensasi. Praktik semacam itu gagal dalam menginternalisasi dengan baik biaya yang terkait dengan timbulnya limbah. Hal yang lebih penting lagi, praktik ini menyediakan insentif *built-in* untuk menunda pemrosesan dan pembuangan limbah yang selamat. Suatu penilaian awam rasional harus digunakan untuk mendapatkan periode yang layak sesudah pengoperasian SEN yang ada. Hal ini berguna untuk mengimbangi aset dan pertanggungjawaban, karena, jika tidak, pertanggungjawaban yang terkait dengan pembentukan limbah yang pertama dalam jumlah sedikit akan terlampaui besar pembiayaannya. Biaya kontrol institusional jangka panjang apa pun yang terkait dengan pengelolaan limbah harus disertakan dalam estimasi biaya SEN.

- PL.4.1. *Limbah radioaktif yang ditimbulkan SEN harus diklasifikasi untuk memudahkan pengelolaan limbah pada semua bagian SEN.*

Proses pengelolaan limbah berkenaan dengan keseluruhan operasional dan keselamatan jangka panjang akan memerlukan skema klasifikasi limbah yang mempermudah pengelolaan optimal berbagai jenis limbah di dalam SEN.

Klasifikasi limbah radioaktif memberikan suatu keterkaitan antara sifat limbah dengan persyaratan keselamatan pengelolaan limbah di dalam SEN. Semua limbah di setiap kategori pada skema klasifikasi harus mempunyai kondisi akhir

yang sama, dan skema ini harus bisa diterapkan terhadap seluruh daur bahan bakar.

PL.4.2. *Langkah-langkah pra-disposal antara timbulnya limbah sampai keadaan akhir harus diambil sedini mungkin sesuai praktik yang masuk akal. Desain dari langkah tersebut harus memastikan bahwa semua hal teknis yang penting (misalnya pembuangan panas, kontrol kualitas, pengungkungan bahan radioaktif) telah ditangani. Proses ini harus tidak menghambat atau menyulitkan pencapaian keadaan akhir.*

*Rasional.* Prinsip dasar ke-empat adalah mengenai langkah-langkah pengelolaan limbah pra-disposal. Sesuai definisi, suatu keadaan limbah yang mampu memberikan keselamatan permanen tanpa modifikasi lanjut disebut sebagai kondisi akhir. Kondisi lain yang timbul selama operasi disebut kondisi pra-disposal yang mengarah ke keadaan akhir. Selanjutnya, limbah harus secara bertahap dibawa ke kondisi akhir. Membiarkan langkah ini untuk dilakukan oleh generasi mendatang tanpa suatu pembenaran kompensasi adalah tindakan yang melanggar prinsip dasar di mana limbah radioaktif harus dikelola sedemikian rupa sehingga tidak menjadi beban generasi yang akan datang. Langkah tersebut harus tidak membuat rumit tercapainya kondisi akhir. Hal yang perlu diperhatikan dalam tiap langkah pengelolaan limbah adalah tidak menjadikan limbah ke dalam bentuk yang tidak selaras dengan langkah berikutnya yang direncanakan. Di samping itu, dihindari bentuk limbah yang justru nantinya akan menambah kesulitan dalam mencapai kondisi akhir limbah yang direncanakan. Keselamatan tiap tahapan dan aktivitasnya (termasuk transportasi), baik dalam kondisi normal maupun kecelakaan harus dipertimbangkan dan seluruh aspek teknis yang terkait dengan keselamatan (misalnya, pembuangan panas dari sistem, penyimpanan dalam kondisi sub-kritis, pengungkungan bahan radioaktif secara tepat) harus ditangani.

*Waktu untuk mencapai kondisi akhir.* Faktor yang saling bersaing mempengaruhi seberapa cepat limbah dibawa ke kondisi akhir. Pemrosesan dini dapat mengabaikan penggunaan teknologi yang lebih maju di masa depan. Penundaan proses dan pengaturan akhir dapat menghasilkan penghematan biaya jangka menengah yang besar namun harus diberikan bobot

yang jauh lebih tinggi terhadap pengurangan faktor ketidakpastian dan meningkatkan keselamatan sebagai akibat dari pencapaian dini kondisi akhir yang tepat. Pengalaman masa lalu, yaitu menyimpan limbah radioaktif cair aktivitas tinggi di beberapa lokasi, adalah tidak layak dalam jangka panjang. Hal ini meninggalkan warisan limbah demikian dalam jumlah besar. Limbah tersebut sekarang harus menjadi subyek remediasi dengan biaya besar yang ditanggung generasi sekarang, dan berisiko terjadinya pelepasan ke lingkungan, seperti pernah beberapa kali terjadi di masa lalu. Dengan makin meningkatnya pemanfaatan energi nuklir, maka sangat mendesak bahwa limbah sesegera mungkin dibawa ke kondisi akhir yang sesuai lebih awal. Membiarkan limbah dalam bentuk dan kondisi yang tidak selamat secara permanen menimbulkan risiko bahwa limbah tersebut tidak akan mencapai kondisi akhir. Resep berbunyi "*as early as reasonably practicable*" (sedini mungkin sesuai praktik yang masuk akal) menekankan untuk menghindari penundaan yang tidak perlu.

*Pemrosesan yang diperlukan untuk membawa limbah ke bentuk akhir.* Kegiatan pemrosesan merupakan bagian dari daur bahan bakar nuklir secara keseluruhan, dan pengaruhnya terhadap kesehatan dan lingkungan perlu dipertimbangkan serta dibenarkan berdasarkan keuntungan bersih yang akan dicapai dalam tiap tahap pemrosesan tersebut. Kemampuan menghasilkan bentuk limbah serta kemasannya pada skala industri harus nyata, baik melalui peragaan atau konsep desain yang pasti, sebelum SEN dilaksanakan. Hal ini akan memberikan keyakinan bahwa daur bahan bakar nuklir inovatif tidak akan menimbulkan limbah yang tidak layak untuk mencapai kondisi akhir.

*Keselamatan proses dan kegiatan.* Seluruh persoalan teknis untuk keselamatan dari semua proses dan kegiatan pada kondisi normal dan kecelakaan harus diperhitungkan dan ditangani dengan tepat. Persoalan semacam itu sangat bergantung pada teknologi dan dapat berubah dari satu strategi pengelolaan limbah ke yang lain. Untuk beberapa proses, pembuangan panas peluruhan mungkin diperlukan, pada yang lain pencegahan kritikalitas bisa jadi merupakan persoalan utama, atau, dalam pengangkutan limbah radioaktif di antara dua proses berbeda, mungkin diperlukan desain wadah (*cask*) khusus. Faktor penting dalam mencapai keselamatan dan persyaratan pengelolaan limbah pra-disposal lain meliputi:

- Kuantitas dan potensi bahaya limbah;
- Derajat isolasi limbah yang diperlukan;
- Kemampuan dispersi dan mobilitas bentuk limbah yang ada;
- Pengalaman dan kematangan teknologi yang digunakan, serta potensi untuk kemajuan di masa mendatang;
- Keandalan peralatan dan fungsinya terkait keselamatan;
- Kerumitan dan derajat standardisasi kegiatan;
- Kebaruan dan kematangan kegiatan; dan
- Besarnya organisasi, jumlah dan kerumitan antarmuka dan budaya keselamatan.

*Kompatibilitas proses.* Bentuk limbah radioaktif pada akhir suatu langkah proses harus kompatibel dengan langkah berikutnya, maka upaya harus dibuat untuk menjamin hal ini dalam sistem yang besar dan rumit. Desain sistem pengelolaan limbah sepanjang SEN dan sepanjang umur setiap komponennya, harus dilihat sebagai suatu kesatuan yang utuh. Tidak ada yang merintang atau menyulitkan pencapaian kondisi akhir.

Fasilitas pengelolaan limbah terpusat harus dibangun dan dioperasikan sesuai dengan peraturan perundangan, dan harus diinspeksi secara rutin oleh badan pengawas. Kegiatan operasi fasilitas pengelolaan limbah terpusat meliputi:

- Kegiatan penyimpanan;
- Pengolahan dan pemeliharaan kondisi;
- Penyimpanan sementara limbah terkondisi.

Bahan bakar bekas perlu disimpan secara temporer “di reaktor” (DR) sebelum dipindahkan ke “fasilitas yang jauh dari reaktor” (FJDR). Teknologi penyimpanan basah dan kering perlu dipertimbangkan.

## 5.5. Resistensi Proliferasi

### 5.5.1. Prinsip Dasar:

- PDR.1. Fitur dan tindakan resistensi proliferasi wajib dilaksanakan pada keseluruhan daur hidup SEN untuk menjamin agar SEN secara kontinyu tidak menarik sebagai sarana memperoleh bahan fisil bagi program senjata nuklir.
- PDR.2. Fitur intrinsik dan tindakan ekstrinsik kedua-duanya perlu namun apabila hanya salah satu daripadanya maka harus dipandang tidak cukup.

### 5.5.2. Persyaratan

- PR.1.1 *Komitmen, kewajiban dan kebijaksanaan negara tentang non-proliferasi harus memadai.*

Contoh komitmen, kewajiban dan kebijakan yang relevan, antara lain:

- Persetujuan seifgard sebagai pelaksanaan *Non Proliferation Treaty* (NPT);
- Kebijakan kendali ekspor;
- Konvensi internasional yang relevan;
- Pengaturan komersial, legal atau kelembagaan yang mengendalikan akses pada bahan nuklir dan SEN;
- Pengaturan bilateral yang mengatur pasokan dan pengembalian bahan bakar nuklir;
- Perjanjian bilateral yang mengatur ekspor kembali komponen SEN;
- Kepemilikan multi-nasional, manajemen atau pengawasan SEN;
- Kegiatan verifikasi;
- Sistem nasional atau regional untuk akunting dan pengawasan;
- Pendekatan seifgard untuk SEN, yang mampu mendeteksi penyelewengan bahan atau produksi yang tidak dideklarasikan; dan
- Suatu mekanisme respons internasional yang efektif terhadap pelanggaran.

PR.1.2 *Daya tarik bahan nuklir dalam SEN untuk program senjata nuklir harus serendah mungkin, termasuk daya tarik bahan nuklir tidak dideklarasikan yang diyakini dapat dihasilkan atau diproses.*

Daya tarik bahan nuklir dalam suatu SEN harus serendah mungkin yang diperkirakan dapat dicapai. Dalam mengevaluasi persyaratan ini, harus disadari bahwa SEN dapat mengandung bahan nuklir dengan banyak ragam dan bahwa kualitas setiap bahan dapat berbeda. Dalam penentuan bagaimana menyajikan atau memadukan nilai kualitas bagi bahan yang berbeda, harus dilakukan secara seksama.

Beberapa skema pengelompokan bahan nuklir dapat digunakan sebagai dasar pertama untuk mengevaluasi daya tarik bahan. Satu contoh ialah memakai pengelompokan seifgard IAEA seperti diuraikan di dalam *Safeguards Glossary*, dengan memperhitungkan beberapa langkah proses yang diperlukan untuk mendapatkan bahan guna senjata.

Untuk mengevaluasi daya tarik bahan mungkin memerlukan pemeriksaan sifat bahan seperti berikut ini:

- Kandungan isotop;
- Bentuk kimiawi;
- Medan radiasi;
- Panas yang dibangkitkan; dan
- Laju pembangkitan neutron spontan.

PR.1.3 *Penyelewengan bahan nuklir harus cukup sulit dan dapat terdeteksi. Penyelewengan termasuk penggunaan fasilitas SEN untuk introduksi, produksi atau pengolahan ulang bahan nuklir yang tidak dideklarasikan.*

Hambatan utama proliferasi adalah kesulitan penyelewengan dan risiko terdeteksi. Hal terakhir ini mencakup pencegahan dan kesempatan untuk mendeteksi serta mengambil tindakan terhadap kegiatan proliferasi.

Item berikut ini mungkin berguna untuk mengevaluasi persyaratan diatas:

- Kandungan isotop setiap target bahan nuklir;
- Bentuk kimiawi setiap target bahan nuklir;
- Medan radiasi setiap target bahan nuklir;
- Panas yang dibangkitkan setiap target bahan nuklir;
- Laju pembangkitan neutron spontan setiap target bahan nuklir;
- Kerumitan dan waktu yang diperlukan untuk modifikasi dalam memakai SEN sipil untuk fasilitas produksi senjata;
- Massa dan banyaknya setiap target bahan nuklir;
- Ketrampilan, keahlian dan pengetahuan yang diperlukan untuk menyalahgunakan atau menghasilkan bahan nuklir dan mengubahnya menjadi bahan yang dapat digunakan untuk senjata;
- Waktu yang diperlukan untuk menyalahgunakan atau menghasilkan bahan nuklir dan mengubahnya menjadi bahan yang dapat digunakan untuk senjata;
- Fitur desain yang membatasi akses pada bahan nuklir; dan
- Timbunan dan aliran bahan.

PR.2.1. *SEN harus memiliki fitur dan tindakan berganda yang resisten terhadap proliferasi.*

SEN harus dilengkapi dengan seperangkat hambatan yang tangguh menutupi jalur pengambil alihan. Untuk menembus hambatan yang tangguh memerlukan waktu dan upaya yang signifikan, dan karena itu meningkatkan kemungkinan deteksi.

Dalam mengevaluasi ketangguhan seperangkat hambatan yang menutupi jalur pengambil alihan, maka penting untuk memperhitungkan saling gayutan antara berbagai hambatan yang tersedia dalam fitur intrinsik. Dalam beberapa kasus, tindakan yang diperlukan untuk mengatasi satu hambatan akan mengatasi hambatan ganda. Misalnya, medan radiasi tinggi, bentuk kimiawi, massa dan volume dapat diperkirakan sebagai hambatan yang mencegah pemisahan plutonium (Pu) dari bahan bakar bekas, tetapi pelarutan bahan bakar bekas yang berhasil dapat sekaligus mengatasi atau mengurangi semua hambatan tersebut. Jadi, evaluasi persyaratan ini memerlukan pemeriksaan yang seksama atas semua hambatan dalam konteks jalur-jalur pengambilalihan.

PR.2.2. *Kombinasi fitur intrinsik dan tindakan ekstrinsik yang serasi dengan pertimbangan desain lain, harus dioptimasi (dalam tahap desain/keteknikan) supaya menghasilkan resistensi proliferasi yang efisien dari segi biaya.*

Tergantung kerjasama internasional dan sumberdaya yang cukup, setiap SEN dapat diseifgard dengan layak tetapi upaya yang diperlukan untuk pelaksanaan tindakan verifikasi bervariasi. Persyaratan ini mengenal adanya imbal balik biaya antara fitur intrinsik dan tindakan ekstrinsik. Persyaratan ini lebih jauh lagi mengenal bahwa fitur dan tindakan harus serasi dan tidak bertentangan dengan pertimbangan desain lain seperti keselamatan dan ekonomi, dan bahwa biaya verifikasi harus masuk akal.

Pada persyaratan ini, istilah "dioptimasi" mengacu pada proses optimasi dan yang bukan hasil optimal secara matematika. Selama pengembangan SEN, fitur desain intrinsik yang dapat mengurangi biaya tindakan ekstrinsik, khususnya verifikasi, harus dipertimbangkan. Fitur intrinsik yang ditujukan untuk meningkatkan Resistensi Proliferasi (RP) dari SEN harus dimasukkan ke dalam desain yang serasi dengan pertimbangan desain yang lain, dan di mana penghematan yang diperkirakan diperoleh dalam penerapan tindakan ekstrinsik selama masa manfaat SEN lebih tinggi dari pada biaya pemaduan fitur intrinsik.

Indikator untuk mengkaji persyaratan ini dapat berupa biaya untuk memadukan fitur intrinsik dan tindakan ekstrinsik, yang diperlukan untuk menyediakan resistensi proliferasi. Beberapa fitur teknis yang menyediakan RP dapat dipadukan dalam desain SEN dengan tujuan utama lain seperti keselamatan atau fungsinya. Dalam mengevaluasi indikator ini amat penting untuk hanya memasukkan tambahan biaya dalam melakukan pemilihan teknis untuk menyediakan RP. Bila ada dua pilihan, dan yang lebih tinggi biayanya terpilih, karena menyediakan resistensi proliferasi lebih tinggi, maka selisih biaya antara kedua pilihan harus diakui sebagai biaya untuk memadukan fitur intrinsik.

Indikator lain yang dapat digunakan untuk mengkaji persyaratan ini adalah bahwa SEN harus memiliki pendekatan verifikasi dengan suatu tingkat tindakan ekstrinsik yang disepakati antara otoritas verifikasi dan Negara. Indikator ini menetapkan batas yang luwes terhadap upaya verifikasi maksimal bagi SEN, batas yang ditetapkan oleh otoritas verifikasi selama pengembangannya dengan pendekatan verifikasi melalui konsultasi dengan Negara.

## **5.6. Infrastruktur**

### **5.6.1. Prinsip Dasar**

PDI.1. Pengaturan terkait harus menyediakan opsi yang memungkinkan pemanfaatan SEN untuk pasokan energi dan produk terkait dengan tanpa mengusahakan investasi yang berlebihan dalam infrastruktur nasional.

### **5.6.2. Persyaratan**

PI.1.1. *Sebelum digunakannya instalasi SEN, harus dibuat sebuah kerangka kerja hukum nasional mencakup pertanggungjawaban nuklir, keselamatan dan proteksi radiasi, pengendalian operasi dan keamanan dan resistensi proliferasi. Peraturan Nasional. Peraturan perundang-undangan tertinggi di bidang nuklir adalah Undang-Undang No. 10 Tahun 1997 mengenai Ketenaganukliran, yang dilengkapi dengan Peraturan Pemerintah tentang Perizinan Reaktor Nuklir, Keputusan*

Presiden dan peraturan yang lebih rinci dalam bentuk Keputusan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN). Peraturan ini mencakup izin tapak, izin konstruksi, izin komisioning dan izin operasi, dan juga kepastian tentang dekomisioning instalasi.

Indonesia mengutamakan penerapan aturan dan peraturan perundang-undangan nasionalnya sendiri. Dalam hal tidak adanya sesuatu peraturan yang khas, yang diterapkan adalah pedoman dan dokumen teknis IAEA yang relevan dan juga aturan yang berkenaan dengan kode dan standard dari negara asal pemasok.

*Persyaratan Perizinan.* SEN harus mendapat izin dari BAPETEN sebelum didirikan dan diaplikasikan di Indonesia. Guna memenuhi persyaratan ini, calon pemegang izin harus mengajukan permohonan izin kepada BAPETEN. Izin diberikan setelah Badan Pelaksana, Badan Usaha Milik Negara, Koperasi, dan/atau Badan Swasta memenuhi persyaratan administrasi dan teknis, seperti yang dipersyaratkan pada Peraturan Pemerintah tentang Perizinan Reaktor Nuklir. Peraturan Pemerintah ini bertujuan untuk mengatur perizinan pembangunan, pengoperasian dan dekomisioning reaktor dalam rangka menjamin keselamatan dan kesehatan pekerja dan masyarakat serta perlindungan terhadap lingkungan hidup, dan keamanan SEN serta bahan nuklir.

*Sertifikasi desain dan izin operasi gabungan.* Khusus untuk reaktor nuklir desain modular yang telah mendapatkan sertifikasi desain dari Badan Pengawas negara pemasok, pemohon dapat mengajukan permohonan izin operasi gabungan setelah memperoleh izin tapak. Sesuai dengan Peraturan Pemerintah tentang Perizinan Reaktor Nuklir yang dimaksud izin operasi gabungan adalah merupakan gabungan dari izin konstruksi, izin komisioning dan izin operasi.

*Pedoman dan dokumen teknik internasional.* Sebagai bahan dasar untuk penyusunan peraturan kebijakan dan prosedur nasional, Pedoman keselamatan IAEA dan dokumen teknik terkait dapat digunakan. Dengan demikian SEN yang direncanakan harus di-desain dan dioperasikan sesuai dengan dokumen IAEA.

*Dukungan perizinan.* Pemasok SEN harus menyediakan dokumen informasi yang diperlukan mengenai desain, prestasi kerja dan keselamatan perangkat keras dan perangkat lunak yang dipasoknya sebagai dukungan kepada pengguna dalam permohonan perizinan dan proses evaluasi serta untuk keperluan informasi dan edukasi masyarakat.

PI.1.2. *Infrastruktur industri dan ekonomi harus memadai untuk mendukung proyek selama konstruksi, operasi dan dekomisioning.*

*Infrastruktur dan partisipasi nasional.* Penggunaan secara maksimal bahan yang tersedia dalam negeri, kemampuan manufaktur dan produk mudah dibuat, demikian pula sumber daya manusia (SDM) Indonesia untuk buruh, pekerja trampil dan pelayanan pengawasan, dianjurkan untuk digunakan dalam pekerjaan konstruksi, operasi, perawatan dan dekomisioning, sejauh memenuhi kualitas yang ditetapkan. Pengerahan buruh lokal lebih diutamakan kepada penduduk terdekat dengan lokasi tapak proyek.

Produk lokal berarti segala macam barang yang dibuat atau dihasilkan oleh perusahaan industri lokal. Dalam proses menciptakan barang atau melaksanakan jasa, dapat pula menggunakan masukan atau elemen impor.

kontraktor lokal yang dijadikan sub-kontraktor (oleh pemasok utama) harus perusahaan yang berstatus perusahaan Indonesia. Dalam kelompok ini termasuk:

- perusahaan industri yang berstatus penanaman modal asing menurut perundangan yang berlaku dan sudah menanam modal di Indonesia (mendirikan pabrik di Indonesia), dan
- perusahaan jasa (seperti konsultan) berupa perusahaan patungan dengan perusahaan jasa Indonesia dan menggunakan sebanyak mungkin SDM Indonesia.

*Alih teknologi.* Para pemasok yang potensial harus menyatakan di dalam penawarannya rencana untuk melaksanakan alih teknologi melalui aneka kegiatan: misalnya pelatihan, pelatihan di tempat kerja, partisipasi desain, melibatkan perusahaan lokal

dalam kegiatan konstruksi dan instalasi sebagai sub-kontraktor, supervisi, inspeksi jaminan dan kendali mutu, serta fabrikasi komponen.

- PI.1.3. *Diperlukan langkah yang tepat untuk memperoleh proses pengambilan keputusan yang efektif dalam program SEN dengan melibatkan para pemangku kepentingan.*

Dalam penyebaran informasi kepada masyarakat, fakta bahwa program nuklir itu sangat diperlukan dan bermanfaat bagi pertumbuhan ekonomi dan pelestarian lingkungan, harus disampaikan secara jelas. Informasi yang diberikan harus terbuka, sesuai kenyataan, dan disajikan dalam kerangka seluruh sumber daya energi.

Melalui pertimbangan yang seksama agar dicapai upaya yang berhasil-guna, sasaran informasi dan edukasi masyarakat harus dipelajari dan disempurnakan melalui pengalaman secara bertahap. Substansi informasi yang disebarakan harus bervariasi agar memenuhi berbagai harapan masyarakat dan harus di dalam bahasa yang sesuai dengan para pendengarnya.

Kegiatan informasi dan edukasi masyarakat harus lebih sering dilakukan di kawasan dekat tapak, dan juga di daerah tertentu yang dihadiri oleh para pengambil keputusan, seperti Dewan Perwakilan Rakyat dan Dewan Perwakilan Rakyat Daerah, Pemerintah Pusat dan Daerah.

- PI.1.4. *Sumberdaya manusia harus memungkinkan sebuah organisasi operasi mampu mempertahankan budaya keselamatan untuk mencapai operasi yang selamat pada instalasi SEN. Organisasi operasi harus memiliki pengetahuan yang memadai atas instalasinya agar menjadi pengguna yang cerdas dan harus melakukan pembinaan kader staf terlatih.*

Pengembangan SDM pada tahap desain, konstruksi dan pengoperasian SEN secara aman dan selamat harus menjadi bagian tak terpisahkan dari paket pengadaan. Pendidikan dan pelatihan harus diberikan kepada sejumlah personil yang cukup sampai mencapai kualifikasi yang dibutuhkan. Mereka harus memiliki spesialisasi dalam aspek keselamatan operasi dan

pengaturan, rekayasa proyek dan manajemen, manajemen operasi dan perawatan SEN.

Hanya personil berkualifikasi yang dipercaya untuk tugas penting seperti pengawasan keselamatan, operasi dan perawatan SEN. Untuk setiap kategori personil, perlu adanya persyaratan untuk pengembangan dan pembinaan kompetensi yang sesuai melalui pendidikan, pengalaman dan pelatihan formal.

Tujuan utama suatu program pengembangan SDM yang berdayaguna dan berhasilguna adalah:

- Mengembangkan sejumlah personil terkualifikasi memadai yang diperlukan untuk program SEN.
- Memastikan tersedianya tenaga kerja pada waktunya.
- Memastikan waktu yang cukup untuk pelatihan yang layak.
- Menggunakan teknik seleksi yang memastikan keseimbangan tenaga kerja menyeluruh dalam hal usia, kematangan, inisiatif, pengambilan keputusan, dll.
- Memastikan bahwa program yang dilaksanakan mendorong perbaikan dalam infrastruktur nasional keseluruhan untuk pendidikan, teknologi dan industri.
- Memanfaatkan secara berdayaguna dan berhasilguna semua kesempatan pelatihan nasional yang tersedia.
- Memastikan retensi tenaga kerja.

Program pelatihan, harus dilaksanakan berdasarkan kebutuhan organisasi dan karyawan dengan tujuan untuk pengembangan dan pemeliharaan pengetahuan teknis dan ketrampilan semua karyawan. Suatu pendekatan sistematis terhadap pelatihan harus digunakan agar memungkinkan program pelatihan karyawan SEN dapat disiapkan, dianalisis, didesain, dikembangkan dan dilaksanakan berdasarkan analisis tanggung jawab dan tugas pekerjaan.