



**LAPORAN REKOMENDASI KEBIJAKAN
PENGAWASAN PLTN**

**LAPORAN REKOMENDASI KEBIJAKAN
KESELAMATAN DESAIN PLTN MULTI-MODUL
TERHADAP BAHAYA EKSTERNAL**

TAHUN ANGGARAN 2025

BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR

Jalan Gajah Mada No. 8 Jakarta 10120

Telepon (62-21) 63858269-70 Faksimile (62-21) 63858275

Document ini ditandatangani secara elektronik yang diterbitkan BSR/E
Jl. Gajah Mada No. 8 Jakarta Pusat 10120. Telp. (+62-21) 6385 8269-70, 630 2164, 630 2485 Fax. (+62-21) 6385 8275 Po Box. 4005 Jkt 10040

Homepage : www.bapeten.go.id, E-mail: info@bapeten.go.id

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman : Judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

LEMBAR PENGESAHAN

LAPORAN REKOMENDASI KEBIJAKAN

KESELAMATAN DESAIN PLTN MULTI-MODUL TERHADAP BAHAYA

EKSTERNAL

TAHUN ANGGARAN 2025

Disusun oleh:	Pelaksana Kegiatan,  Daddy Setyawan, S.Si, MT NIP 197904062005011002
Tanggal	23 Desember 2025
Diperiksa oleh:	Penanggung Jawab Kegiatan, Pengelola Kegiatan KF Pengkajian Reaktor Daya  Ir. Bintoro Aji, M.T NIP 196609261990121001
Tanggal	29 Desember 2025
Disahkan oleh:	Kepala P2STPIBN, #
Tanggal	31 Desember 2025

No. Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : i dari xiii

Dokumen ini ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat elektronik yang diterbitkan BSR E

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman : Judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

KONTRIBUTOR

- | | |
|-------------------------|------------------|
| 1. Gede Ardana Mandala | P2STPIBN Bapeten |
| 2. Imron | P2STPIBN Bapeten |
| 3. Tino Sawaldi | P2STPIBN Bapeten |
| 4. Zulfiandri | DP2IBN Bapeten |
| 5. Dedi Hermawan | DP2IBN Bapeten |
| 6. Bhakti Dwi Yoga | DPIBN Bapeten |
| 7. Muhammad Tahril Aziz | DKKN Bapeten |

NARASUMBER

- | | |
|---------------------------------------|-------------|
| 1. Dr. Agus Budi Santoso, S.Si. M.Sc. | BPPTKG ESDM |
| 2. Dr. Supartoyo, ST. MT. | PVMBG ESDM |
| 3. Ir. D. T. Sony Tjahyani, M.Eng. | PRTRN BRIN |
| 4. Dr. Erly Bahsan, S.T., M.Kom. | DTSL FTU |

REVIEWER

- | | |
|-------------------------------------|--------------------|
| 1. Ir. Bintoro Aji, M.T. | P2STPIBN – Bapeten |
| 2. Dr. Ir. Djoko Hari Nugroho, M.T. | P2STPIBN – Bapeten |

No. Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : ii dari xiii

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman : Judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

LEMBAR DISTRIBUSI

No. Salinan Dokumen	Nama Jabatan
4	Deputi Bidang Pengkajian Keselamatan Nuklir
4.4	Direktur Pengaturan Pengawasan Instalasi dan Bahan Nuklir
3.2	Direktur Perizinan Instalasi dan Bahan Nuklir
3.4	Direktur Inspeksi Instalasi dan Bahan Nuklir
2.1	Kepala Biro Perencanaan
2.4	Kepala Inspektorat
4.2.1	TU Pusat Pengkajian Sistem dan Teknologi Pengawasan Instalasi dan Bahan Nuklir

No. Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : iii dari xiii

Dokumen ini ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat elektronik yang diterbitkan BSR/E

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman : Judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

KATA PENGANTAR

Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Bapeten) merupakan lembaga pemerintah yang memiliki wewenang dalam melakukan pengawasan pemanfaatan tenaga nuklir di Indonesia. Bapeten memiliki 3 (tiga) pilar utama dalam melakukan pengawasan, yakni pengaturan, perizinan, dan inspeksi. Dalam melakukan ketiga pilar utama kegiatan pengawasan, Bapeten juga didukung oleh unit kerja pengkajian yang berperan sebagai dukungan teknis internal Bapeten terhadap ketiga pilar utama kegiatan pengawasan. Dalam hal pengkajian, kajian akan bidang instalasi bahan nuklir dilakukan oleh unit kerja Pusat Pengkajian Sistem dan Teknologi Pengawasan Instalasi dan Bahan Nuklir (P2STPIBN).

Dalam melakukan tugasnya, P2STPIBN senantiasa menyelaraskan pengawasan bidang instalasi dan bahan nuklir dengan perkembangan teknologi PLTN sehingga produk regulasi yang dihasilkan Bapeten dapat senantiasa relevan dengan perkembangan teknologi. Pada perkembangan teknologi PLTN, PLTN dibuat kecil, modular, dan efisien dalam kategori reaktor kecil, menengah, dan modular (SMR) dengan desain reaktor multi-modul. Dalam desain multi-modul ini, unit reaktor untuk PLTN terdiri atas beberapa modul yang berada pada satu lokasi yang berdekatan dengan konfigurasi kompak dengan adanya struktur, sistem, dan komponen yang digunakan bersama oleh beberapa modul.

Desain multi-modul ini kemudian digunakan oleh kandidat-kandidat pengembang PLTN yang memiliki rencana pembangunan di Indonesia. Kandidat ini antara lain PT. *Thorcon Power Indonesia* dengan desain TMSR-500 dan *NuScale Power, LLC*. Dengan perkembangan desain multi-modul PLTN SMR dan kandidat PLTN yang mengusung desain tersebut, mengakibatkan munculnya beberapa implikasi yang mempengaruhi keselamatan sehingga membutuhkan pemahaman dan identifikasi.

No. Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : iv dari xiii

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman : Judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

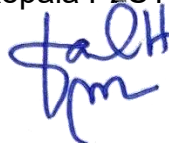
Pemahaman dan identifikasi ini dibutuhkan untuk mengetahui implikasinya terhadap regulasi.

Penyusunan Rekomendasi Teknis Keselamatan Desain PLTN Multi-Modul Aspek Tapak dilatarbelakangi oleh perkembangan teknologi PLTN SMR yang mengadopsi desain multi-modul dalam satu unit PLTN. Dalam hal ini unit reaktor terdiri atas beberapa modul-modul reaktor yang berada pada satu lokasi yang berdekatan dengan konfigurasi kompak dengan adanya struktur, sistem, dan komponen yang terbagi dalam beberapa modul. Hal ini tentunya mengakibatkan adanya perbedaan pendekatan yang harus dilakukan oleh badan pengawas dalam melakukan evaluasi izin pembangunan reaktor.

Kegiatan ini diharapkan dapat menghasilkan kajian yang dapat membantu proses evaluasi yang nantinya akan dilakukan Direktorat Perizinan Instalasi dan Bahan Nuklir (DPIBN) serta membantu proses penyusunan peraturan yang dilakukan oleh Direktorat Pengaturan Pengawasan Instalasi dan Bahan Nuklir (DP2IBN). Selain itu, melalui kajian ini diharapkan dapat meningkatkan kapabilitas dan kompetensi staf P2STPIBN dalam melakukan evaluasi dan *benchmarking* antara peraturan perundang-undangan yang berlaku terhadap pedoman internasional dan standar-standar yang berlaku di negara lain untuk reaktor kecil, menengah, dan modular (SMR).

Jakarta, 30 Desember 2025

Kepala P2STPIBN,



Dra. Taruniyati Handayani, M.Sc.
NIP 196605311991032001

No. Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : v dari xiii

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman : Judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

RINGKASAN EKSEKUTIF

Laporan ini menyajikan kajian menyeluruh terkait keselamatan desain Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Multi-Modul dari tiga bahaya eksternal utama: geoteknik, vulkanologi, dan kejadian akibat ulah manusia (KAUM). Kajian dilakukan untuk mendukung kesiapan regulasi dan perizinan PLTN berbasis *Small Modular Reactors (SMR)* di Indonesia, seiring semakin berkembangnya desain multi-modul seperti NuScale dan TMSR-500 yang berpotensi dibangun pada masa mendatang.

Konsep multi-modul membawa implikasi keselamatan baru, terutama karena penggunaan bersama struktur, sistem, dan komponen (*shared SSC*), potensi interaksi antar modul, serta kemungkinan kecelakaan berantai dalam satu lokasi tapak. Atas dasar itu, P2STPIBN melakukan telaah mendalam terhadap peraturan nasional (PP 54/2012, PP 2/2014, PerBa 4/2018, PerBa 4/2008, PerBa 5/2015, PerBa 6/2019), standar IAEA (SSG-68, SSR-2/1, SSR-2/2), dan standar teknis lainnya untuk mengidentifikasi kesenjangan regulasi serta merumuskan kriteria keberterimaan desain multi-modul.

Kajian menemukan bahwa meskipun regulasi nasional telah memadai untuk desain reaktor tunggal, belum ada ketentuan yang secara eksplisit mengatur karakteristik multi-modul, terutama dalam aspek *multi-hazard*, independensi modul, struktur bersama, dan kesiapsiagaan ganda antar modul. Oleh karena itu, penyempurnaan kebijakan dan pedoman teknis diperlukan agar evaluasi keselamatan PLTN multi-modul dapat dilakukan secara konsisten dan selaras dengan praktik internasional.

Isu keselamatan penting yang dapat diidentifikasi meliputi:

1. kestabilan geoteknik tapak terhadap penurunan tanah, likuifaksi, dan kegempaan;
2. paparan bahaya vulkanik seperti abu, piroklastik, dan rudal vulkanik;
3. risiko KAUM seperti jatuhnya pesawat, ledakan, tabrakan kapal, dan lepasan bahan berbahaya;
4. potensi kecelakaan berantai dan interaksi antar modul;
5. kebutuhan akan kesiapsiagaan darurat multi-modul, di mana setiap modul dapat masuk kelas kedaruratan yang berbeda.

No. Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : vi dari xiii

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman : Judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Berdasarkan kajian tersebut, rekomendasi kebijakan utama dirumuskan untuk dua direktorat Bapeten:

A. Untuk Direktorat Perizinan Instalasi Bahan Nuklir (DPIBN):

1. evaluasi tapak terintegrasi khusus multi-modul;
2. penetapan parameter desain khusus multi-modul (PGA, bahaya vulkanik, KAUM);
3. penetapan PIE dan kategori kecelakaan multi-modul;
4. pembuktian independensi dan redundansi SSC bersama;
5. kewajiban pemantauan tapak berkelanjutan;
6. penguatan perencanaan kesiapsiagaan darurat multi-modul.

B. Untuk Direktorat Pengaturan Pangawasan Instalasi Bahan Nuklir (DP2IBN):

1. penyusunan regulasi khusus evaluasi desain PLTN multi-modul;
2. integrasi *multi-hazard approach* dalam regulasi;
3. penetapan acceptance criteria yang terukur untuk bahaya eksternal dan interaksi antar modul.

Kesimpulan dari kajian ini menghasilkan kerangka rekomendasi kebijakan yang dapat menjadi dasar penyusunan atau revisi regulasi nasional, sekaligus memperkuat kapasitas teknis Bapeten dalam menghadapi era teknologi PLTN modular dan multi-modul di Indonesia.

No. Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : vii dari xiii

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman : Judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

DAFTAR ISI

	H
	al
LEMBAR PENGESAHAN	i
KONTRIBUTOR, NARASUMBER, DAN REVIEWER	ii
LEMBAR DISTRIBUSI	iii
KATA PENGANTAR	iv
RINGKASAN EKSEKUTIF	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Maksud dan Tujuan.....	3
1.3. Sasaran dan Manfaat.....	3
1.4. Ruang Lingkup.....	4
1.5. Sistematika	4
BAB II METODOLOGI DAN STUDI PUSTAKA.....	6
2.1. Peraturan Perundang-undangan Nasional.....	7
2.1.1. Peraturan Pemerintah Nomor 54 Tahun 2012 Tentang Keselamatan dan Keamanan Instalasi Nuklir.....	7
2.1.2. Peraturan Pemerintah Nomor 2 Tahun 2014 Tentang Perizinan Instalasi Nuklir dan Pemanfaatan Bahan Nuklir.....	8
2.1.3. Peraturan Kepala Bapeten Nomor 3 Tahun 2011 Tentang Ketentuan Keselamatan Desain Reaktor Daya.....	10
2.1.4. PerBa Nomor 4 Tahun 2018 Tentang Ketentuan Keselamatan Evaluasi Tapak Instalasi Nuklir.....	12
2.1.5. PerBa Nomor 4 Tahun 2008 Tentang Evaluasi Tapak Reaktor Daya Untuk Aspek Geoteknik Dan Pondasi Reaktor Daya.....	14
2.1.6. PerBa Nomor 5 Tahun 2015 Tentang Evaluasi Tapak Instalasi Nuklir Untuk Aspek Keganungupan.....	17

No. Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : viii dari xiii

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman : Judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

2.1.7. Peraturan Kepala Bapeten Nomor 6 Tahun 2019 Tentang Evaluasi Tapak Instalasi Nuklir untuk Aspek Kejadian Eksternal Akibat Ulah Manusia.....	19
2.1.8. Peraturan Kepala Bapeten No 1 Tahun 2010 Tentang Kesiapsiagaan dan Penanggulangan Kedaruratan Nuklir.....	21
2.2. Desain Multi-Modul dan Multi-Unit.....	24
2.2.1. Desain dan Karakteristik Keselamatan Reaktor Modular Kecil NuScale.....	24
2.2.2. Perbandingan Desain Modul dan Unit.....	28
2.3. Standar Nasional Indonesia.....	30
2.3.1. SNI 1726:2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung.....	30
2.3.2. SNI 8460:2017 tentang Persyaratan perancangan geoteknik.....	32
2.4. Dokumen Internasional.....	35
2.4.1. IAEA SSR-1 Site Evaluation for Nuclear Installations.....	35
2.4.2. IAEA SSG-89 Evaluation of Seismic Safety for Nuclear Installations.....	37
2.4.3. IAEA SSR-2/1 (Rev. 1) Safety of Nuclear Power Plants: Design.	39
2.4.4. IAEA SSG-34 (Rev. 1) Design of Electrical Power Systems for Nuclear Power Plants.....	42
2.4.5. IAEA SSR-2/2 (Rev. 1) Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation.....	44
2.4.6. IAEA GSR Part 4 (Rev. 1) Safety Assessment for Facilities and Activities.....	47
2.4.7. IAEA SRS Nomor 110 Multi-Unit Probabilistic Safety Assessment	49
2.4.8. IAEA SSG-3 (Rev. 1) Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants.....	51
2.4.9. IAEA SSG-4 (Rev. 1) Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants.....	54
2.4.10. IAEA SSG-12 Licensing Process for Nuclear Installations.....	56
BAB III PEMBAHASAN.....	58

No. Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : ix dari xiii

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman : Judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

3.1. Evaluasi Potensi Bahaya Geoteknik.....	58
3.1.1 Likuifaksi Tanah Di Lokasi Instalasi Nuklir.....	58
3.1.2. Peluang Likuifaksi Tanah Di Lokasi Instalasi Nuklir.....	67
3.1.3. Probabilitas Likuifaksi Dapat Mengganggu Gardu Induk.....	68
3.1.4. Studi Kasus Referensi.....	69
3.1.5. Rekomendasi Mitigasi.....	69
3.1.6. Kesimpulan.....	69
3.2. Evaluasi Potensi Bahaya Vulkanologi.....	70
3.2.1 Bahaya Abu Tephra Di Lokasi Instalasi Nuklir.....	72
3.2.2 Bahaya gunung api dari produk abu Tephra Misil terhadap SSK yang digunakan bersama.....	72
3.2.3 Bahaya gunung api dari produk gas gunung api terhadap SSK yang digunakan bersama.....	73
3.2.4 Bahaya gunung api dari produk Lahar terhadap SSK yang digunakan bersama.....	73
3.2.5 Nilai peluang abu Tephra.....	74
3.2.6 Beberapa studi kasus terkait abu tephra.....	75
3.2.7 Perkiraan Probabilitas (berdasarkan literatur).....	75
3.2.8 Nilai Probabilitas Abu Tephra mengganggu aliran listrik.....	76
3.2.9 Kesimpulan.....	77
3.3. Evaluasi Potensi Bahaya KAUM/Jatuhnya pesawat terbang.....	77
3.3.1. Penapisan Pendekatan Jarak.....	77
3.3.2. Penapisan Pendekatan Probabilistik.....	79
3.3.2.1. Perhitungan frekuensi jatuhnya pesawat terbang menurut DOE-STD-3014-96.....	81
3.3.2.2. Perhitungan kebolehjadian jatuhnya pesawat terbang menurut NUREG-0800.....	81
3.3.2.3. Perhitungan kebolehjadian jatuhnya pesawat terbang menurut Kobayashi (1988).....	82
3.3.2.4. Perhitungan kebolehjadian jatuhnya pesawat terbang menurut Berg.....	86
3.3.3. Membangun data statistik kecelakaan pesawat di Indonesia....	88

No. Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : x dari xiii

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman : Judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

3.3.4. Evaluasi Rinci.....	91
3.3.4.1. Faktor Penentu Peluang Jatuhnya Pesawat ke Gardu Induk....	92
3.3.4.2. Estimasi Probabilitas (berdasarkan studi dan data statistik)....	93
3.3.4.3. Beberapa Contoh Studi Kasus.....	93
3.3.4.4. Mitigasi.....	93
3.4. Analisis Risiko Probabilistik Multi-Unit.....	94
3.4.1 Perbandingan antara Unit dan Modul.....	95
3.4.2 Pohon Kejadian dan Pohon Kegagalan.....	98
3.4.3 Metrik Risiko dan Ukuran Kepentingan (<i>Importance Measures</i>)	10
	1
3.4.3.1 Frekuensi Kerusakan Bahan Bakar dan Inti Reaktor (<i>Fuel and Core Damage Frequency</i>).....	10
	2
3.4.3.2 Frekuensi Pelepasan Besar atau Dini (<i>Large or Early Release Frequency</i>).....	10
	4
3.4.3.3 Ukuran Kepentingan (<i>Importance Measures</i>).....	10
	5
3.4.4 Pemodelan Kegagalan Penyebab Umum (<i>Common Cause Failure / CCF</i>).....	10
	6
BAB IV SIMPULAN DAN REKOMENDASI.....	10
	9
4.1. Simpulan.....	10
	9
4.2. Rekomendasi.....	11
	0
DAFTAR PUSTAKA.....	11
	4

No. Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : xi dari xiii

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman : Judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Nuclear Steam Supply System (NSSS)</i>	24
Gambar 2.2 Skema Pembangkit Listrik Tenaga nuklir 1 (satu) Modul NuScale.....	26
Gambar 2.3 Skema Pembangkit Listrik Tenaga nuklir 12 (dua belas) Modul NuScale.....	27
Gambar 2.4 Ilustrasi Tapak dengan Multi-Unit Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir...	28
Gambar 2.5 Ilustrasi Tapak dengan Multi-Modul Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir.....	29
Gambar 3. 1 Kegiatan penerbangan lepas landas, mendarat, dalam fasa berputar putar dan terbang.....	77
Gambar 3. 2 Tahapan dalam penentuan nilai kebolehtahanan jatuhnya pesawat terbang (digambar ulang dari FANC, 2015).....	80
Gambar 3.3 Sudut yang terbentuk antara landasan pacu dengan tapak (Kobayashi, 1988).....	83
Gambar 3.4 Fungsi distribusi kecelakaan pesawat pada koridor penerbangan.....	84
Gambar 3.5 Zona penerbangan bebas.....	85
Gambar 3.6 Korelasi jarak pesawat melepas dari pacuan landas terhadap banyaknya kecelakaan pesawat (Berg, 2011).....	87
Gambar 3.7 Laju kecelakaan per keberangkatan pesawat terbang beberapa negara.....	89
Gambar 3.8 Jumlah kecelakaan pesawat terbang dan banyak pergerakan pesawat pada 2008-2016.....	89
Gambar 3.9 Kecelakaan pesawat terbang di Indonesia (2008-2017) berdasarkan fasa terbang.....	90
Gambar 3.10 Area jatuh pesawat terbang di Indonesia (2008-2016).....	91
Gambar 3.11 Ilustrasi “ <i>situs multi-unit</i> ” dan “ <i>unit-unit</i> ”.....	97
Gambar 3.12 Ilustrasi situs dengan satu “ <i>unit multi-modul</i> ” dan beberapa “ <i>modul SMR</i> ”.....	97
Gambar 3.13 Contoh sebuah pohon kejadian dan ilustrasi urutan kejadian.....	99
Gambar 3.14 Contoh <i>Fault Tree</i> Sederhana.....	101

No. Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : xii dari xiii

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman : Judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Peluang Terjadinya Likuifaksi.....	68
Tabel 3.2 Probabilitas Gangguan Abu Thepra.....	75
Tabel 3.3 Estimasi Probabilitas Tahunan Gangguan oleh Abu Tephra.....	76
Tabel 3.4 Kriteria Nilai Jarak Penapisan menurut IAEA.....	78
Tabel 3.5 Kriteria Nilai Jarak Penapisan menurut NUREG-0800.....	78
Tabel 3.6 Kebolehjadian jatuhnya pesawat terbang pada PLTN (Wall, 1972).....	92
Tabel 3.7 Kebolehjadian jatuhnya pesawat terbang.....	93
Tabel 3.8 Contoh simbol dari <i>Fault Tree</i>	10
	1

No. Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : xiii dari xiii

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Teknologi PLTN terus berkembang khususnya kualitas dan keandalan fitur-fitur keselamatan terus meningkat untuk mencegah dan memitigasi kecelakaan. Selain itu, PLTN juga mulai berekspansi ke tingkat daya yang lebih rendah dari skala PLTN besar, seperti daya 300 MWe untuk daya kecil dan 5 MWe untuk daya mikro. Beberapa keuntungan reaktor daya kecil/mikro adalah mempercepat proses konstruksi yang dilakukan. Seiring perkembangan tersebut, muncul kategorisasi PLTN berdasarkan daya yang dihasilkan dan kemudahan konstruksinya, yaitu reaktor kecil, menengah, dan modular (SMR). Perkembangan teknologi PLTN ini disebutkan di dokumen *Advanced Reactor Information System* IAEA [ARIS, 2024].

Bagi Indonesia, pengembangan dan implementasi tenaga nuklir merupakan pilihan bauran energi baru dan terbarukan. Hal ini ditunjukkan dengan dikeluarkannya Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Nomor: 85.K/TL.01/MEM.L/2025 tentang Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional yang di dalamnya memasukkan energi nuklir sebagai penyediaan tenaga listrik di Kalimantan [KepMen ESDM, 2025]. Selain itu, juga mulai munculnya pihak-pihak pengembang yang tertarik untuk melakukan investasi pembangunan PLTN di Indonesia. Beberapa contoh pengembang seperti PT. *Thorcon Power* Indonesia, *NuScale Power-LLC*, dan *Seaborg Technologies* sudah memiliki keinginan untuk melakukan investasi pembangunan PLTN tipe Kecil, Menengah, dan Modular (SMR) di Indonesia.

Pusat Pengkajian Sistem dan Teknologi Pengawasan Instalasi dan Bahan Nuklir (P2STPIBN) sebagai internal *Technical Support Organisation* (TSO) di Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Bapeten) terus melakukan upaya-upaya kongkrit guna memastikan keselamatan, keamanan, dan garda aman nuklir dalam

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 1 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

implementasinya terhadap pembangunan PLTN jenis SMR. P2STPIBN dalam hal ini melakukan kajian terkait Rekomendasi Kebijakan Pengawasan Pembangunan PLTN sebagai judul besar kajian. Sementara itu, di dalam kajian ini terdapat *suboutput* kajian yang berjudul Rekomendasi Teknis Keselamatan Desain PLTN Multi-Modul Terhadap Bahaya Eksternal. Kajian ini sendiri akan berfokus pada identifikasi bahaya eksternal pada aspek geoteknik, vulkanologi dan kejadian akibat ulah manusia (KAUM).

P2STPIBN sudah melakukan penyusunan Rekomendasi Teknis Keselamatan Desain PLTN Multi-Modul Aspek Tapak tahun 2023. Pemilihan kajian ini dilatarbelakangi oleh perkembangan teknologi PLTN SMR yang mengadopsi desain multi-modul dalam satu unit PLTN. PLTN multi-modul terdiri atas beberapa modul reaktor yang berada pada satu lokasi dan menggunakan beberapa struktur, sistem, dan komponen secara bersama/berbagi (*sharing*). Hal ini mengakibatkan adanya perbedaan pendekatan yang harus dilakukan oleh badan pengawas dalam melakukan evaluasi izin pembangunan PLTN multi-modul.

Oleh sebab itu, pada tahun 2025 dilanjutkan penyusunan rekomendasi teknis Keselamatan Desain PLTN Multi-Modul Terhadap Bahaya Eksternal yang akan difokuskan untuk melakukan identifikasi bahaya eksternal pada aspek geoteknik, vulkanologi dan kejadian akibat ulah manusia (KAUM). Dari bahaya eksternal yang sudah teridentifikasi kemudian dilakukan identifikasi kriteria keberterimaan desain PLTN Multi-Modul terhadap bahaya eksternal tersebut. Dengan diperolehnya kriteria keberterimaan ini, PLTN diharapkan dapat digunakan untuk penyusunan pedoman evaluasi desain PLTN multi-modul.

Kajian ini dilakukan dengan mempelajari dan meresume dokumen terkait aspek bahaya eksternal pada aspek geoteknik, vulkanologi dan kejadian akibat ulah manusia (KAUM) di dokumen *IAEA SSG-68 Design of Nuclear Installations Against External Events* [IAEA, SSG-68], PerBa Nomor 4 Tahun 2018 tentang Ketentuan Keselamatan Evaluasi Tapak Instalasi Nuklir [PerBa 4/2018], PerBa Nomor 4

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 2 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Tahun 2008 tentang Evaluasi Tapak Reaktor Daya Untuk Aspek Geoteknik Dan Pondasi Reaktor Daya [PerBa 4/2008], PerBa Nomor 5 Tahun 2015 Tentang Evaluasi Tapak Instalasi Nuklir Untuk Aspek Kegunungapian [PerBa 5/2015], dan PerBa Nomor 6 Tahun 2019 Tentang Evaluasi Tapak Instalasi Nuklir Untuk Aspek Kejadian Eksternal Akibat Ulah Manusia[PerBa 6/2019]. Selain itu, dipelajari juga desain PLTN multi-modul dan kriteria desain untuk aspek bahaya eksternal pada aspek geoteknik, vulkanologi dan kejadian akibat ulah manusia (KAUM) dari beberapa dokumen lainnya.

Hasil resume dari dokumen-dokumen terkait tersebut kemudian direviu oleh beberapa narasumber yang kompeten baik dari internal maupun eksternal Bapeten. Hasil reviu ini menjadi rekomendasi kebijakan yang akan disampaikan ke Direktorat Perizinan Instalasi dan Bahan Nuklir (DPIBN) dan Direktorat Pengaturan Pengawasan Instalasi dan Bahan Nuklir (DP2IBN) untuk digunakan dalam mendukung pembuatan/revisi peraturan dan kegiatan perizinan untuk desain untuk PLTN multi-modul terkait aspek bahaya eksternal pada aspek geoteknik, vulkanologi dan kejadian akibat ulah manusia (KAUM).

1.2. Maksud dan Tujuan

Secara umum kajian ini bertujuan memberikan pedoman terhadap kegiatan evaluasi desain PLTN multi-modul terhadap bahaya eksternal aspek geoteknik, vulkanologi dan kejadian akibat ulah manusia (KAUM). Berdasarkan tujuan umum tersebut, kajian ini secara khusus memiliki sasaran untuk melakukan identifikasi kriteria keselamatan desain PLTN Multi-Modul dalam menghadapi bahaya eksternal dari aspek geoteknik, vulkanologi dan kejadian akibat ulah manusia (KAUM).

1.3. Sasaran dan Manfaat

Sasaran dari Rekomendasi Teknis Keselamatan Desain PLTN Multi-Modul Terhadap Bahaya Eksternal ini adalah sebagai berikut.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 3 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

- Direktorat Perizinan Instalasi Bahan Nuklir (DPIBN) yang menggunakan hasil rekomendasi dari kegiatan ini untuk membuat pedoman dalam memberikan izin terkait perizinan PLTN Multi-Modul;
- Direktorat Pengaturan Pengawasan Instalasi Bahan Nuklir (DP2IBN) yang menggunakan hasil rekomendasi dari kegiatan ini untuk Menyusun peraturan terkait PLTN Multi-Modul;
- Vendor PLTN Multi-Modul yang akan mengajukan perizinan ke Bapeten;
- Masyarakat secara umum yang ingin mengetahui teknis keselamatan dari PLTN Multi-Modul terkait dengan bahaya eksternal vulkanologi, geoteknik dan kejadian akibat ulah manusia (KAUM).

Manfaat dari penyusunan Rekomendasi Kebijakan ini sebagai berikut.

- Tersedianya rekomendasi kebijakan untuk persyaratan evaluasi tapak khusus PLTN Multi-Modul;
- Menetapkan parameter dasar desain spesifik PLTN multi-modul;
- Menetapkan persyaratan analisis kategori kecelakaan PLTN multi-modul;
- Mendukung penyusunan peraturan khusus evaluasi desain PLTN multi-modul.

1.4. Ruang Lingkup

Kajian ini melingkupi telaah referensi dan identifikasi pengaruh bahaya eksternal aspek geoteknik, vulkanologi dan kejadian akibat ulah manusia terhadap desain PLTN Multi-Modul yang terdapat di dalam dokumen peraturan perundang-undangan dan standar nasional yang berlaku di Indonesia serta referensi internasional lainnya seperti dokumen dari IAEA, *SSG-68 Design of Nuclear Installations Against External Events*.

1.5. Sistematika

Kajian ini disusun berdasarkan kaidah penulisan karya ilmiah yang umum berlaku sebagai berikut:

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 4 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Bab I memberikan pendahuluan kajian berupa latar belakang dilaksanakannya kajian, tujuan dan sasaran kajian, ruang lingkup dan sistematika dari Laporan Rekomendasi Teknis.

Bab II kemudian menyampaikan studi literatur yang digunakan seperti dokumen Peraturan Perundang-undangan, Standar Nasional Indonesia, dan dokumen *IAEA SSG-68 Design of Nuclear Installations Against External Events*, serta pengumpulan data.

Bab III menyampaikan hasil telaah kajian dan pembahasan. Pembahasan yang dibahas antara lain resume dari dokumen dokumen Peraturan Perundang-undangan dan Standar Nasional Indonesia, resume dan pembahasan dokumen *IAEA SSG-68 Design of Nuclear Installations Against External Events*, dan pembahasan rekomendasi teknis terkait kriteria keberterimaan desain keselamatan dalam evaluasi keselamatan desain PLTN multi-modul terkait bahaya eksternal akibat aspek geoteknik, vulkanologi dan kejadian akibat ulah manusia.

Bab IV kemudian menyajikan kesimpulan dan rekomendasi yang dapat diberikan terkait hasil analisis keberterimaan kriteria desain terhadap bahaya eksternal akibat aspek geoteknik, vulkanologi dan kejadian akibat ulah manusia.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 5 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

BAB II

METODOLOGI DAN STUDI PUSTAKA

Kajian ini dilaksanakan dengan menggunakan metode deskriptif-kualitatif dan komparatif-analitik. Metode deskriptif-kualitatif digunakan dalam melakukan pembahasan dan telaah yang dilakukan pada referensi utama. Metode komparatif-analitik digunakan dalam mengevaluasi kesenjangan yang terdapat pada pembahasan dan telaah referensi utama yang dilakukan secara deskriptif-kualitatif. Hasil evaluasi kemudian dianalisis lebih jauh untuk merumuskan solusi dan rekomendasi pengayaan atau penyusunan terhadap peraturan perundang-undangan dan standar nasional yang berlaku.

Informasi referensi yang digunakan merupakan data sekunder yang andal dan kredibel, yakni peraturan perundang-undangan nasional, standar industri nasional, terbitan internasional oleh IAEA, dan regulasi badan pengawas negara lain. Selain data sekunder tersebut, digunakan juga materi pemaparan presentasi oleh pakar dan narasumber, serta jurnal-jurnal ilmiah pendukung terkait untuk memahami lebih jauh kriteria keselamatan desain dari bahaya eksternal desain multi-modul yang diakibatkan oleh bahaya eksternal aspek geoteknik, vulkanologi dan kejadian akibat ulah manusia.

Tahap pertama kajian diawali dengan mengevaluasi peraturan perundang-undangan nasional dan standar industri nasional terkait kriteria desain PLTN terhadap bahaya eksternal aspek geoteknik, vulkanologi dan kejadian akibat ulah manusia. Dalam tahap ini kemudian dibahas dan dievaluasi terkait beberapa kriteria desain keselamatan bahaya eksternal apa saja yang sudah diatur baik dalam peraturan perundang-undangan internasional maupun standar industri nasional.

Tahap berikutnya kemudian mengevaluasi standar IAEA dan standar internasional lainnya terkait kriteria desain keselamatan bahaya eksternal aspek geoteknik, vulkanologi, kejadian akibat ulah manusia pada PLTN Multi-Modul.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 6 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Dalam tahap ini dievaluasi terkait kriteria-kriteria desain bahaya eksternal aspek geoteknik, vulkanologi dan KAUM apa saja yang telah diterapkan untuk mencegah dan memitigasi bahaya eksternal yang diakibatkan oleh aspek tersebut.

Tahap berikutnya dilakukan penyusunan dan pembahasan terkait kriteria-kriteria desain bahaya eksternal yang telah diidentifikasi baik dari peraturan perundang-undangan nasional, standar industri nasional, standar IAEA, serta referensi tambahan yang terkait lainnya. Kriteria-kriteria desain ini kemudian dilakukan reviu dan pembahasan oleh narasumber dan tim kajian guna merumuskan rekomendasi-rekomendasi untuk memperkaya atau menyusun regulasi terkait kriteria desain PLTN terhadap bahaya eksternal akibat aspek geoteknik, vulkanologi dan kejadian akibat ulah manusia.

Berikut di bawah ini beberapa referensi yang bisa digunakan terkait aspek geoteknik, vulkanologi dan kejadian akibat ulah manusia.

2.1. Peraturan Perundang-undangan Nasional

2.1.1 Peraturan Pemerintah Nomor 54 Tahun 2012 Tentang Keselamatan dan Keamanan Instalasi Nuklir [PerBa 54/2012]

Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 54 Tahun 2012 tentang Keselamatan dan Keamanan Instalasi Nuklir ini memberi perhatian besar terhadap keselamatan manusia dan perlindungan lingkungan hidup dari bahaya radiasi. PP Nomor 54 Tahun 2012 terdiri atas empat pondasi utama yaitu: teknis keselamatan, teknis keamanan, manajemen keselamatan dan keamanan, dan kesiapsiagaan darurat.

- 1) Teknis Keselamatan ini memberikan penjelasan bagaimana keselamatan harus tersedia pada saat sebuah instalasi nuklir seharusnya didesain, dibangun, dioperasikan, hingga didekomisioning. Pada semua tahapan tersebut harus memenuhi prinsip-prinsip keselamatan modern, seperti sistem redudansi (cadangan) dan meskipun terjadi kegagalan instalasi nuklir tetap selamat (*fail-safe*);

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 7 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

- 2) Teknis Keamanan ini memastikan bahwa bahan nuklir tidak disalahgunakan untuk kegiatan diluar dari tujuan Instalasi nuklir ketika dibangun, seperti untuk senjata, dll. Selain itu, sistem proteksi fisik juga diatur secara ketat untuk mencegah sabotase dan pencurian bahan nuklir;
- 3) Manajemen Keselamatan dan Keamanan, pemegang izin wajib punya sistem manajemen yang jelas, personel terlatih, serta budaya kerja yang mengutamakan keselamatan;
- 4) Kesiapsiagaan Darurat, pemerintah dan pemegang izin harus siap siaga dalam menghadapi insiden nuklir. Mulai dari latihan darurat hingga koordinasi lintas instansi telah diatur secara rinci. Bahkan skenario darurat ditetapkan dalam tiga tingkat: instalasi, provinsi, dan nasional.

Berdasarkan 4 pondasi utama PP 54 tahun 2012 khususnya bidang teknis keselamatan, maka kegiatan Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi-Modul Terhadap Bahaya Eksternal harus bisa menjelaskan teknis keselamatan dalam rangka mengantisipasi bahaya eksternal yang terjadi pada PLTN khususnya tipe Multi-Modul.

2.1.2. Peraturan Pemerintah Nomor 2 Tahun 2014 Tentang Perizinan Instalasi Nuklir dan Pemanfaatan Bahan Nuklir[PerBa 2/2014]

Pemanfaatan energi nuklir sering kali mengundang pro dan kontra. Di satu sisi, nuklir menjanjikan sumber energi besar dan berkelanjutan. Namun, di sisi lain risiko yang ditimbulkan, baik bagi manusia maupun lingkungan, menuntut pengawasan yang sangat ketat. Inilah yang menjadi dasar utama diterbitkannya Peraturan Pemerintah Nomor 2 Tahun 2014 tentang Perizinan Instalasi Nuklir dan Pemanfaatan Bahan Nuklir.

Energi nuklir bukanlah sembarang teknologi. Salah penanganan bisa berakibat fatal. Oleh karena itu, PP Nomor 2 Tahun 2014 mengatur perizinan dari awal hingga akhir-mulai dari penentuan lokasi pembangunan reaktor (tapak),

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 8 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

konstruksi, pengoperasian, hingga proses penutupan atau dekomisioning reaktor. Setiap tahap memiliki syarat yang rinci, meliputi aspek administratif, teknis, dan finansial. Tahapan Perizinan Nuklir sendiri terdiri atas 5 tahap:

- 1) Izin Tapak, lokasi reaktor harus terlebih dahulu melalui proses evaluasi tapak. Penilaiannya mencakup potensi bahaya gempa, banjir, hingga aktivitas manusia di sekitar lokasi;
- 2) Izin Konstruksi, setelah lokasi disetujui, pemohon wajib menyusun desain rinci dan analisis keselamatan. Tanpa ini, pembangunan fisik tidak boleh dimulai.
- 3) Izin Komisioning, ini adalah tahap uji coba sebelum reaktor dioperasikan secara penuh. Segala sistem harus bekerja dengan aman, dan bahan bakar nuklir mulai dimasukkan;
- 4) Izin Operasi, setelah lulus uji coba, reaktor bisa dioperasikan dengan izin resmi. Namun, pemegang izin tetap diawasi ketat oleh Bapeten;
- 5) Izin Dekomisioning, saat masa operasi selesai atau ada kerusakan serius, instalasi harus dihentikan dan dibongkar dengan cara aman.

Tidak semua pihak bisa membangun reaktor. Hanya BATAN, BUMN, koperasi, atau badan hukum swasta yang memenuhi syarat yang diperbolehkan. Untuk reaktor komersial seperti PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir) diperlukan persetujuan dari DPR. Selain menentukan siapa yang bisa membangun Instalasi Nuklir, PP Nomor 2 Tahun 2014 ini juga mewajibkan pemohon memiliki jaminan finansial, baik berupa deposito, asuransi, maupun cadangan akuntansi. Ini penting untuk menjamin kegiatan dekomisioning dan pertanggungjawaban atas kecelakaan nuklir.

Berdasarkan tahapan perizinan Nuklir di PP Nomor 2 tahun 2014 ini, kegiatan Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi-Modul Terhadap Bahaya Eksternal sangat penting dilakukan untuk mendukung tahapan perizinan

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 9 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Tapak, mengingat di tahapan ini evaluasi tapak yang melingkupi potensi bahaya eksternal dari aspek geoteknik, vulkanologi dan kegiatan akibat ulah manusia (KAUM).

2.1.3. Peraturan Kepala Bapeten Nomor 3 Tahun 2011 Tentang Ketentuan Keselamatan Desain Reaktor Daya[PerKa 3/2011]

Dalam era kebutuhan energi yang terus meningkat, nuklir seringkali disebut sebagai salah satu sumber energi masa depan. Namun, di balik teknologi canggih ini, ada satu hal yang tidak bisa ditawar, yaitu keselamatan. Pemerintah Indonesia melalui Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Bapeten) telah mengatur hal ini secara khusus dalam Peraturan Kepala Bapeten Nomor 3 Tahun 2011 tentang Ketentuan Keselamatan Desain Reaktor Daya.

Reaktor daya adalah instalasi nuklir yang menghasilkan energi panas untuk pembangkitan listrik atau keperluan lainnya. Karena melibatkan bahan radioaktif dan potensi kecelakaan besar, desainnya harus mengikuti prinsip keselamatan ketat mulai dari tahap perencanaan hingga dekomisioning (penutupan).

Berdasarkan PerKa Nomor 3 Tahun 2011 ini, ada tiga fungsi keselamatan utama yang harus selalu dijaga dalam reaktor:

- 1) Mengendalikan reaktivitas, yaitu menjaga agar reaksi nuklir tetap stabil;
- 2) Membuang panas dari teras reaktor, yaitu mencegah panas berlebih yang bisa menyebabkan pelelehan;
- 3) Mengungkung zat radioaktif, yaitu menjaga zat radioaktif agar tidak menyebar ke lingkungan.

Selain itu teknologi nuklir tidak hanya mengandalkan satu sistem pengaman. Reaktor harus dirancang dengan prinsip pertahanan berlapis, yaitu beberapa

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 10 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

tingkatan perlindungan, dari pencegahan kecelakaan, mitigasi jika kecelakaan terjadi, hingga penanggulangan darurat radiasi.

Terdapat 5 pertahanan berlapis sebagai berikut.

- 1) Pencegahan kegagalan dan kejadian operasi terantisipasi;
- 2) Pencegahan terhadap berkembangnya kejadian operasi terantisipasi menjadi kecelakaan;
- 3) Pengendalian kecelakaan dasar desain untuk membawa kondisi reaktor ke keadaan terkendali;
- 4) Pengendalian terhadap kondisi yang parah untuk menjaga agar pelepasan zat radioaktif serendah mungkin;
- 5) Tindakan penanggulangan kedaruratan nuklir baik di dalam maupun luar tapak.

Selain itu, peraturan ini juga memperkenalkan konsep PIE (*Postulated Initiating Event*), yaitu kejadian yang bisa memicu kecelakaan, seperti gempa bumi, kebakaran, atau kegagalan sistem. Reaktor harus dirancang untuk tetap aman meskipun PIE terjadi. Terdapat tiga kategori kecelakaan sebagai berikut.

- 1) AOO (Kejadian Operasi Terantisipasi): gangguan ringan, seperti gangguan listrik;
- 2) DBA (Kecelakaan Dasar Desain): skenario kecelakaan besar yang harus bisa diatasi;
- 3) BDBA (Kecelakaan Melampaui Dasar Desain): skenario terburuk, seperti pelelehan teras reaktor.

Untuk menghindari kegagalan sistem, peraturan ini menekankan desain dengan redundansi (cadangan sistem), keragaman (berbagai jenis sistem), dan independensi (sistem tidak saling bergantung). Semuanya dirancang agar bila satu sistem gagal, masih ada sistem lain yang bisa bekerja. Selain faktor teknis, desain

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 11 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

juga harus mempertimbangkan faktor manusia, seperti kemudahan pengoperasian dan ergonomi ruang kendali. Bahkan, reaktor harus dirancang sejak awal agar mudah dibongkar (dekomisioning) di masa depan dan tidak menghasilkan limbah radioaktif berlebih.

Berdasarkan Peraturan Kepala Bapeten Nomor 3 Tahun 2011 tentang Ketentuan Keselamatan Desain Reaktor Daya, maka kegiatan Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi-Modul Terhadap Bahaya Eksternal ini harus bisa menjelaskan bahwa ketika bahaya eksternal aspek geoteknik, vulkanologi dan KAUM terjadi maka fungsi keselamatan utama dari desain reaktor harus tetap terjaga dengan mempertahankan sistem pertahanan berlapis. Selain itu kejadian yang bisa memicu kecelakaan dari aspek geoteknik, vulkanologi dan KAUM harus didefinisikan secara jelas di awal. Setelah didefinisikan secara jelas, pemicu kejadian tersebut harus dikelompokkan ke dalam 3 kategori kecelakaan (Kejadian Operasi Terantisipasi, Kecelakaan Dasar Desain, dan Kecelakaan Melampaui Dasar Desain)

2.1.4. PerBa Nomor 4 Tahun 2018 Tentang Ketentuan Keselamatan Evaluasi Tapak Instalasi Nuklir[PerBa 4/2018]

Pemilihan tapak instalasi nuklir merupakan langkah strategis yang menentukan tingkat keselamatan jangka panjang sebuah fasilitas nuklir. Regulasi nasional menekankan bahwa tapak harus dinilai berdasarkan potensi bahaya geologi, hidrometeorologi, ulah manusia, serta potensi paparan radiasi terhadap masyarakat. Peraturan Bapeten Nomor 4 Tahun 2018 memperluas cakupan regulasi terdahulu agar mencakup seluruh jenis instalasi nuklir, tidak hanya reaktor. Dengan demikian, regulasi ini menjadi rujukan utama dalam menetapkan kesesuaian tapak dengan prinsip-prinsip keselamatan nuklir modern.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 12 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Metodologi evaluasi tapak menetapkan enam aspek evaluasi utama, masing-masing dengan parameter ilmiah dan teknis yang jelas. Keenam aspek tersebut adalah sebagai berikut.

1) Aspek Kegempaan

Analisis dilakukan melalui pengumpulan data geologi-seismologi, pemodelan seismotektonik, dan evaluasi bahaya gerakan tanah hingga radius 300 km. Regulasi menetapkan batas percepatan tanah puncak periode ulang 10.000 tahun sebesar maksimum 0,6 G, yang berfungsi sebagai batas desain kritis bagi struktur keselamatan.

2) Aspek Kegunungapian

Evaluasi meliputi karakterisasi gunung api aktif maupun purba, penapisan produk vulkanik (piroklastik, lava, lahar, abu, gas, longsor), hingga penilaian probabilistik. Tapak dinyatakan tidak layak apabila berada dalam kawasan rawan bencana (KRB) yang tidak memenuhi syarat geologi nasional.

3) Aspek Geoteknik

Penilaian mencakup stabilitas tanah, potensi likuifaksi, penurunan tanah, dan kondisi hidrogeologi. Bahaya geoteknik yang tidak dapat direkayasa mengakibatkan tapak ditolak.

4) Aspek Meteorologi dan Hidrologi

Pemantauan dilakukan minimal dua tahun untuk mendapatkan data representatif mengenai pola angin, suhu, hujan, serta fenomena ekstrem. Hidrologi dianalisis terkait banjir, tsunami, gelombang tegak, dan perubahan muka air tanah.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 13 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

5) Aspek Kejadian Akibat Ulah Manusia

Pendekatan deterministik (berbasis jarak/NJP) dan probabilistik diterapkan untuk menilai bahaya pesawat jatuh, ledakan, industri kimia, serta sumber bahaya buatan manusia lain. Kejadian dengan probabilitas $>10^{-7}$ per tahun harus dianalisis rinci.

6) Aspek Dispersi Zat Radioaktif

Model atmosferik dan hidrologis digunakan untuk memprediksi penyebaran radionuklida dan dosis radiasi pada masyarakat dalam kondisi normal dan kecelakaan. Batas keselamatan mengikuti pembatas dosis masyarakat dan standar kesiapsiagaan darurat nasional.

Pendekatan bertingkat dalam regulasi memungkinkan penilaian tapak yang proporsional dengan tingkat bahaya radiologis. Setiap instalasi wajib menyampaikan Program Evaluasi Tapak, Sistem Manajemen, dan Laporan Pelaksanaan Evaluasi Tapak untuk memperoleh izin tapak. Selain itu, pemantauan tapak wajib dilakukan sepanjang umur fasilitas. Ketidakmampuan mengurangi bahaya signifikan melalui rekayasa teknis mengharuskan tapak dinyatakan tidak layak sebagai upaya mempertahankan prinsip *defence-in-depth*.

Peraturan Bapeten Nomor 4 Tahun 2018 memberikan landasan ilmiah dan regulatif yang komprehensif dalam menilai kelayakan tapak instalasi nuklir. Hal ini selaras dengan kegiatan Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi-Modul Terhadap Bahaya Eksternal khususnya aspek Geoteknik, kegunungapian dan kejadian akibat ulah manusia. Dengan memperhitungkan ketiga aspek bahaya eksternal yaitu geoteknik, kegunungapian dan kejadian akibat ulah manusia, kegiatan ini memperkuat pendekatan keselamatan nasional dan memastikan bahwa instalasi nuklir dibangun pada tapak yang aman, terverifikasi, dan sesuai standar keselamatan nasional.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 14 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

2.1.5. PerBa Nomor 4 Tahun 2008 Tentang Evaluasi Tapak Reaktor Daya Untuk Aspek Geoteknik Dan Pondasi Reaktor Daya[PerBa 4/2008]

Keselamatan merupakan unsur utama dalam pengembangan dan pengoperasian instalasi nuklir, termasuk reaktor daya. Salah satu aspek fundamental dalam menjamin keselamatan tersebut adalah evaluasi tapak, khususnya dari sisi geoteknik dan pondasi. Menyadari pentingnya hal ini, Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Bapeten) menerbitkan Peraturan Nomor 4 Tahun 2008 sebagai pedoman teknis dalam melaksanakan evaluasi tapak reaktor daya.

Peraturan ini memberikan kerangka evaluasi menyeluruh terhadap kondisi geoteknik dan sistem pondasi yang mendukung struktur reaktor. Evaluasi tersebut mencakup berbagai tahapan, mulai dari investigasi awal hingga tahap operasional reaktor. Tujuan utamanya adalah memastikan bahwa tapak yang dipilih mampu mendukung struktur reaktor dengan aman, baik terhadap beban statik maupun dinamik, termasuk beban akibat gempa bumi.

Berdasarkan tujuan dari PerBa 4 tahun 2008 ini, maka Kegiatan Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi-Modul Terhadap Bahaya Eksternal aspek geoteknik harus bisa memberikan rekomendasi terkait pemilihan tapak yang bisa mendukung struktur reaktor dengan baik khususnya PLTN Multi-Modul.

Proses evaluasi diawali dengan tahap pemilihan tapak yang didasarkan pada penilaian terhadap kondisi geologi, geomorfologi, dan sejarah kegempaan wilayah. Pada tahap ini, informasi diperoleh melalui dokumen historis, survei awal, dan pengamatan lapangan. Tapak yang tidak memenuhi kriteria keselamatan geoteknik akan dieliminasi sejak dini.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 15 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Selanjutnya, dilakukan tahap karakterisasi dan verifikasi yang melibatkan investigasi lebih dalam terhadap struktur bawah permukaan tanah dan batuan. Teknik seperti pengeboran, pengujian geofisik dan laboratorium digunakan untuk mendapatkan data parameter geoteknik. Tujuannya adalah membentuk profil geoteknik yang akurat, yang kemudian digunakan dalam analisis pondasi dan interaksi tanah-struktur.

Tahap konfirmasi memperkuat hasil investigasi sebelumnya dengan pendekatan eksplorasi yang lebih rapat dan pengujian mendalam. Pada tahap ini, risiko seperti rongga bawah tanah, batuan lemah, serta potensi likuifaksi dinilai secara rinci. Jika ditemukan kondisi bawah permukaan yang rumit, maka tindakan perbaikan atau modifikasi tanah harus dilakukan demi menjaga integritas pondasi.

Dalam konteks kegempaan, evaluasi respon geoteknik menjadi bagian vital dari analisis. Reaktor daya harus mampu bertahan terhadap skenario gempa terburuk, oleh karena itu, dilakukan simulasi spektra respon spesifik tapak dan analisis interaksi tanah-struktur yang memperhitungkan efek non-linieritas material tanah. Hal ini juga berkaitan erat dengan penilaian potensi likuifaksi yang dapat menurunkan daya dukung tanah secara drastis saat gempa terjadi.

Peraturan ini juga mengatur pengkajian terhadap struktur bangunan tanah seperti lereng, tanggul, dan dinding penahan. Semua elemen tersebut harus dirancang berdasarkan parameter geoteknik yang andal agar tidak menimbulkan bahaya tambahan terhadap keselamatan fasilitas nuklir.

Aspek penting lainnya adalah pemantauan geoteknik selama fase operasi. Parameter seperti penurunan struktur, pergerakan tanah, dan muka air tanah harus dipantau secara berkala untuk memastikan tidak terjadi degradasi kondisi yang berisiko bagi keselamatan reaktor. Data dari pemantauan ini juga digunakan untuk menyesuaikan dan memperbarui model analisis geoteknik.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 16 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Berdasarkan PerBa 4 tahun 2008 ini, di dalam kegiatan Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi-Modul Terhadap Bahaya Eksternal aspek geoteknik harus bisa memberikan model analisis geoteknik yang bisa memberikan gambaran resiko bagi keselamatan reaktor khususnya untuk PLTN Multi-Modul.

2.1.6. PerBa Nomor 5 Tahun 2015 Tentang Evaluasi Tapak Instalasi Nuklir Untuk Aspek Kegunungapian[PerBa 5/2015]

Peraturan ini berisi pedoman yang diperbarui untuk mengevaluasi lokasi instalasi nuklir mengenai bahaya gunung berapi, sesuai dengan standar internasional saat ini. Peraturan ini memiliki ruang lingkup yang meliputi reaktor non-daya dan instalasi nuklir non-reaktor sebagai berikut.

- 1) Peraturan ini ditetapkan oleh Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Bapeten) dan menggantikan peraturan sebelumnya dari tahun 2008;
- 2) Peraturan ini mendefinisikan istilah-istilah kunci seperti Gunung Berapi Aktif, Gunung Berapi Sumber, Bahan Piroklastik, dan Evaluasi Lokasi;
- 3) Peraturan ini mengamanatkan bahwa Pemohon Evaluasi Tapak (PET) harus melakukan evaluasi tapak secara menyeluruh untuk aspek vulkanik selama konstruksi, pengoperasian, dan penutupan instalasi nuklir.

Proses evaluasi lokasi Instalasi Nuklir terdiri dari beberapa tahapan untuk menilai bahaya vulkanik secara efektif. Tahapan ini meliputi pengumpulan data, penilaian potensi produk vulkanik, dan evaluasi bahaya. Tahapan-tahapannya antara lain pengumpulan data vulkanik, mempelajari potensi produk vulkanik, dan mengevaluasi bahaya vulkanik. Pengumpulan data berfokus pada aktivitas vulkanik selama 10 juta tahun terakhir dan mencakup informasi geologis, geofisika, dan vulkanik. Sedangkan penilaian produk vulkanik melibatkan penilaian awal,

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 17 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

karakterisasi aktivitas vulkanik, dan penyaringan produk vulkanik yang dapat mempengaruhi lokasi.

Pengumpulan data dan informasi vulkanik ini merinci metode pengumpulan data vulkanik yang diperlukan untuk mengevaluasi potensi bahaya. Hal ini menekankan pentingnya data geologi dan geofisika sebagai berikut.

- 1) Pengumpulan data harus mencakup aktivitas vulkanik selama 10 juta tahun dan aktivitas yang lebih baru, dengan fokus pada radius 150 km di sekitar tapak;
- 2) Data geologi dan vulkanik meliputi riwayat letusan, distribusi spasial, dan karakteristik produk vulkanik;
- 3) Data geofisika dan geokimia sangat penting untuk menilai bahaya vulkanik, termasuk pemantauan aktivitas seismik dan emisi gas.

Penilaian potensial produk vulkanik ini bertujuan untuk mengidentifikasi gunung berapi aktif dan mengevaluasi potensi produk vulkanik untuk mencapai lokasi tapak nuklir. Ini melibatkan pendekatan sistematis untuk memahami risiko gunung berapi sebagai berikut.

- 1) Penilaian tersebut meliputi evaluasi awal, karakterisasi sumber vulkanik, dan penyaringan produk vulkanik;
- 2) Jika aktivitas vulkanik diidentifikasi, analisis lebih lanjut dilakukan untuk menentukan potensi dampak pada tapak tersebut;
- 3) Penilaian menggunakan metode deterministik dan probabilistik untuk mengevaluasi kemungkinan produk vulkanik yang mempengaruhi tapak.

Bagian evaluasi bahaya vulkanik adalah menguraikan metode untuk mengevaluasi bahaya yang ditimbulkan oleh produk vulkanik terhadap instalasi nuklir. Ini menekankan perlunya penilaian bahaya yang komprehensif sebagai berikut.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 18 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

- 1) Evaluasi mencakup berbagai produk vulkanik, termasuk abu tephra, rudal, gas vulkanik, dan lava;
- 2) Metode deterministik dan probabilistik digunakan untuk mengukur potensi bahaya dan dampaknya terhadap instalasi nuklir;
- 3) Hasilnya menginformasikan parameter desain yang diperlukan untuk memastikan keselamatan fasilitas nuklir di daerah vulkanik.

Berdasarkan PerBa Nomor 5 Tahun 2015 Tentang Evaluasi Tapak Instalasi Nuklir Untuk Aspek Kegunungapian ini, kegiatan Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi-Modul Terhadap Bahaya Eksternal aspek geoteknik harus mampu menguraikan sebuah metode untuk mengevaluasi bahaya yang ditimbulkan oleh produk vulkanik terhadap PLTN Multi-Modul. Penilaian bahaya secara komprehensif yang bisa dilakukan adalah melakukan evaluasi terhadap berbagai produk vulkanik seperti abu tephra, rudal, gas vulkanik, dan lava. Kemudian menggunakan metode deterministik dan probabilistik untuk mengukur potensi bahaya dan dampaknya terhadap PLTN Multi-Modul dan hasil akhirnya adalah memberikan rekomendasi kebijakan terkait parameter desain yang diperlukan untuk memastikan keselamatan PLTN Multi-Modul.

2.1.7 Peraturan Kepala Bapeten Nomor 6 Tahun 2019 Tentang Evaluasi Tapak Instalasi Nuklir untuk Aspek Kejadian Eksternal Akibat Ulah Manusia[PerBa 6/2019]

Keselamatan instalasi nuklir tidak hanya dipengaruhi oleh faktor internal, tetapi juga oleh potensi bahaya eksternal yang disebabkan oleh ulah manusia. Peraturan Bapeten Nomor 6 Tahun 2019 hadir sebagai respons terhadap kebutuhan untuk memperbaharui dan memperluas cakupan regulasi sebelumnya, yaitu Peraturan Kepala Bapeten Nomor 6 Tahun 2008, agar mencakup seluruh jenis

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 19 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

instalasi nuklir dan menyesuaikan dengan perkembangan teknologi serta kebutuhan masyarakat. Peraturan ini bertujuan sebagai berikut.

- 1) Menyediakan pedoman dalam melakukan evaluasi tapak instalasi nuklir terkait potensi kejadian eksternal akibat ulah manusia;
- 2) Menjamin bahwa semua jenis instalasi nuklir, termasuk reaktor daya, fasilitas pengolahan bahan bakar nuklir, dan fasilitas penyimpanan limbah radioaktif, memiliki tingkat keselamatan yang memadai terhadap potensi bahaya eksternal;
- 3) Memastikan bahwa evaluasi tapak mempertimbangkan perkembangan terbaru dalam teknologi, tata guna lahan, dan aktivitas manusia di sekitar tapak.

Peraturan ini berlaku untuk semua tahapan siklus hidup instalasi nuklir, mulai dari perencanaan, konstruksi, operasi, hingga dekomisioning. Kejadian eksternal akibat ulah manusia yang perlu dievaluasi meliputi:

- 1) jatuhnya pesawat terbang;
- 2) lepasan fluida berbahaya dan beracun;
- 3) ledakan;
- 4) kebakaran;
- 5) tabrakan kapal laut; dan
- 6) kejadian eksternal lain yang diakibatkan oleh aktivitas manusia.

Dalam melakukan metodologi evaluasi tapak, ada beberapa tahapan yang perlu dilakukan sebagai berikut.

- 1) Pengumpulan Data dan Informasi Sumber Potensial yang melibatkan identifikasi sumber bahaya potensial, baik yang tidak bergerak (misalnya instalasi industri, fasilitas militer) maupun yang bergerak (misalnya jalur transportasi bahan berbahaya, zona bandar udara);

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 20 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

- 2) Evaluasi Bahaya Sumber Potensial yang meliputi penapisan awal untuk menentukan relevansi sumber bahaya dan evaluasi rinci terhadap sumber yang dianggap signifikan;
- 3) Penentuan Parameter Dasar Desain untuk menetapkan parameter desain instalasi nuklir berdasarkan hasil evaluasi bahaya untuk memastikan ketahanan terhadap potensi kejadian eksternal.

Implementasi dari PerBa Nomor 6 Tahun 2019 ini memiliki beberapa implikasi penting sebagai berikut.

- 1) Peningkatan Keselamatan. Dengan mengidentifikasi dan mengevaluasi potensi bahaya eksternal sejak tahap perencanaan, risiko terhadap instalasi nuklir dapat diminimalkan;
- 2) Perencanaan Tata Guna Lahan, Informasi dari evaluasi tapak dapat digunakan untuk merencanakan tata guna lahan di sekitar instalasi nuklir, menghindari pembangunan fasilitas yang berpotensi menimbulkan bahaya;
- 3) Kesiapsiagaan dan Penanggulangan Kedaruratan. Data dari evaluasi tapak dapat digunakan untuk merancang sistem kesiapsiagaan dan penanggulangan kedaruratan yang efektif;

Berdasarkan Perba 6 Tahun 2019 Tentang Evaluasi Tapak Instalasi Nuklir untuk Aspek Kejadian Eksternal Akibat Ulah Manusia ini, maka kegiatan Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi-Modul Terhadap Bahaya Eksternal aspek KAUM ini harus mampu mengevaluasi Kejadian eksternal akibat ulah manusia seperti jatuhnya pesawat terbang, lepasan fluida berbahaya dan beracun, ledakan, kebakaran, tabrakan kapal laut dan kejadian eksternal lain yang diakibatkan oleh aktivitas manusia. Setelah dilakukan penapisan terhadap sumber bahaya yang mungkin untuk PLTN Multi-Modul. Kemudian menggunakan metode deterministik dan probabilistik untuk mengukur potensi bahaya dan dampaknya

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 21 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

terhadap PLTN Multi-Modul dan hasil akhirnya adalah memberikan rekomendasi kebijakan terkait parameter desain yang diperlukan untuk memastikan keselamatan PLTN Multi-Modul.

2.1.8. Peraturan Kepala Bapeten Nomor 1 Tahun 2010 Tentang Kesiapsiagaan dan Penanggulangan Kedaruratan Nuklir[Perka 1/2010]

Dalam menghadapi risiko yang melekat pada pemanfaatan tenaga nuklir, kesiapsiagaan dan penanggulangan terhadap kedaruratan nuklir merupakan komponen vital dalam sistem keselamatan nasional. Menyadari pentingnya perlindungan terhadap manusia dan lingkungan dari bahaya radiasi, Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Bapeten) menerbitkan Peraturan Kepala Bapeten Nomor 1 Tahun 2010. Peraturan ini bertujuan menyediakan kerangka hukum dan teknis bagi semua pemegang izin instalasi nuklir dalam merancang dan melaksanakan kesiapsiagaan serta respons terhadap keadaan darurat nuklir. Kedaruratan nuklir didefinisikan sebagai kondisi bahaya akibat kecelakaan nuklir atau radiasi yang dapat mengancam keselamatan manusia dan lingkungan. Untuk mengantisipasi kondisi tersebut, kesiapsiagaan nuklir meliputi kegiatan terencana dan sistematis guna memastikan fungsi penanggulangan dapat dilakukan secara cepat, tepat, dan efektif.

Ruang lingkup peraturan mencakup kewajiban pemegang izin untuk menyusun program kesiapsiagaan berdasarkan kategori bahaya radiologi, mengelola organisasi tanggap darurat, serta menyediakan fasilitas, peralatan, dan prosedur yang mendukung. Pemegang izin wajib membentuk organisasi penanggulangan kedaruratan yang mencakup ketua penanggulangan, pengendali operasi, pelaksana lapangan, dan pengkaji radiologi. Setiap peran memiliki tanggung jawab yang jelas, mulai dari pelaporan awal, koordinasi lapangan, hingga kajian dampak radiologi dan rekomendasi proteksi. Koordinasi lintas lembaga juga

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 22 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

sangat ditekankan, terutama jika kedaruratan berdampak di luar tapak. Kerja sama antara Bapeten, BNPB, BPBD, rumah sakit, pemadam kebakaran, dan pihak keamanan menjadi bagian integral dari sistem penanggulangan nasional. Fasilitas dan peralatan yang wajib disediakan meliputi detektor radiasi, sistem alarm, perlindungan radiasi, jalur evakuasi, pusat kendali tanggap darurat, dan tempat berkumpul yang aman bagi masyarakat.

Penanggulangan kedaruratan terdiri dari berbagai tahapan: identifikasi, pelaporan, pengaktifan tim respons, tindakan mitigasi, perlindungan segera, dan pengelolaan dampak jangka panjang. Tindakan mitigasi bertujuan menghentikan eskalasi kecelakaan, sementara tindakan perlindungan seperti evakuasi dan penyediaan tablet yodium ditujukan untuk melindungi kesehatan masyarakat dan pekerja. Untuk menjamin kesiapan sistem, pemegang izin wajib melakukan pelatihan dan gladi tanggap darurat minimal setahun sekali, serta gladi nasional setiap empat tahun. Hal ini bertujuan memastikan semua komponen, baik manusia maupun alat, selalu berada dalam kondisi siap tanggap.

Peraturan ini mengelompokkan kejadian kedaruratan ke dalam tiga kelas: waspada, kedaruratan area tapak, dan kedaruratan umum. Zona penanganan dibagi menjadi zona tindakan pencegahan, zona perencanaan, dan zona pengawasan bahan pangan, dengan radius yang ditetapkan berdasarkan kategori fasilitas dan tingkat bahaya. Setiap zona memiliki protokol yang berbeda dalam hal pemantauan, evakuasi, dan penyediaan informasi kepada masyarakat. Pemegang izin harus memiliki kemampuan komunikasi yang efektif, tidak hanya dalam hal teknis, tetapi juga dalam menyampaikan informasi yang akurat, tepat waktu, dan menenangkan kepada publik. Perhatian besar juga diberikan terhadap keselamatan petugas tanggap darurat, termasuk pembatasan dosis radiasi yang boleh diterima, penyediaan alat pelindung, serta pencatatan dan evaluasi dampak kesehatan

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 23 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

jangka panjang. Pemegang izin juga bertanggung jawab atas keselamatan pekerja dan masyarakat yang terdampak langsung maupun tidak langsung.

Berdasarkan PerKa Nomor 1 Tahun 2010 Tentang Kesiapsiagaan dan Penanggulangan Kedaruratan Nuklir, kegiatan Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi-Modul Terhadap Bahaya Eksternal aspek geoteknik, vulkanologi dan KAUM ini selain memberikan rekomendasi kebijakan terkait parameter desain yang diperlukan untuk memastikan keselamatan PLTN Multi-Modul tetapi apabila memungkinkan juga bisa memberikan rekomendasi kebijakan terkait Kesiapsiagaan dan penanggulangan kedaruratan Nuklir.

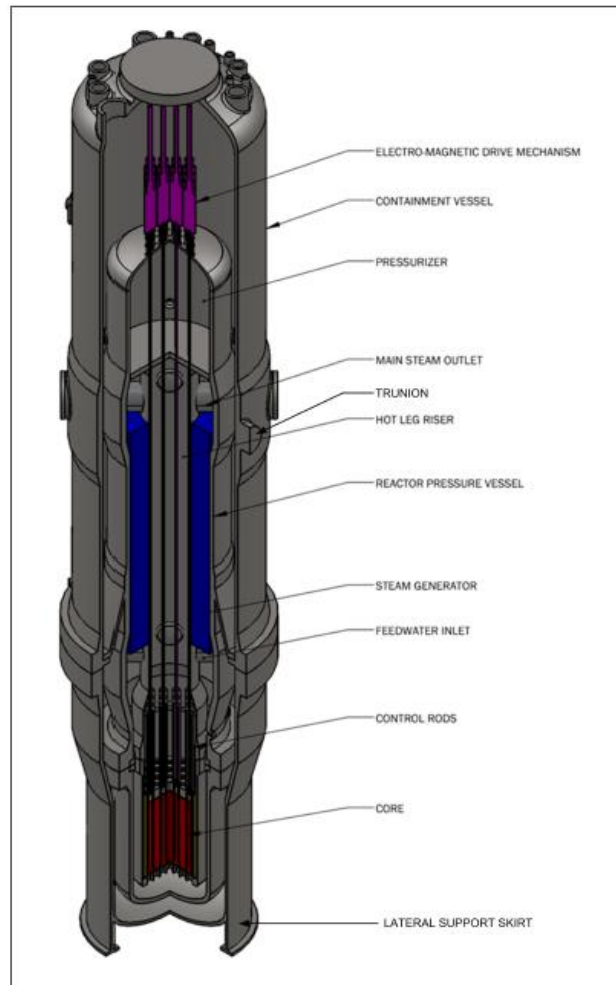
2.2. Desain Multi-Modul dan Multi-Unit

2.2.1. Desain dan Karakteristik Keselamatan Reaktor Modular Kecil NuScale

Dalam beberapa dekade terakhir, pengembangan teknologi reaktor nuklir ditujukan untuk meningkatkan keselamatan, mengurangi kompleksitas, dan mempercepat proses konstruksi. Reaktor NuScale adalah contoh inovatif dari reaktor modular kecil (SMR) yang dirancang untuk mengatasi tantangan pembangunan reaktor besar dengan tetap mempertahankan standar keselamatan tinggi. Setiap modul menghasilkan 45 MWe dan dapat dikombinasikan hingga 12 modul dalam satu lokasi untuk menghasilkan total 540 MWe.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 24 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal



Gambar 2.1 *Nuclear Steam Supply System (NSSS)* [Cederlof, 2024]

Setiap *Nuclear Steam Supply System (NSSS)* NuScale mencakup teras reaktor, steam generator tipe helikal, dan pressurizer yang terintegrasi dalam satu bejana tekan reaktor (*Reactor Pressure Vessel/RPV*) dan tertutup oleh kontainmen baja yang divakum dan terendam di kolam reaktor. Pendinginan primer dilakukan secara alami tanpa pompa karena mengandalkan sirkulasi alamiah.

Desain ini menghilangkan kebutuhan akan sistem pemipaan primer eksternal, sehingga meminimalkan potensi kecelakaan akibat kebocoran besar (*Large-Break Loss of Coolant Accident/LB-LOCA*). Modul-modul ini diproduksi di

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 25 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

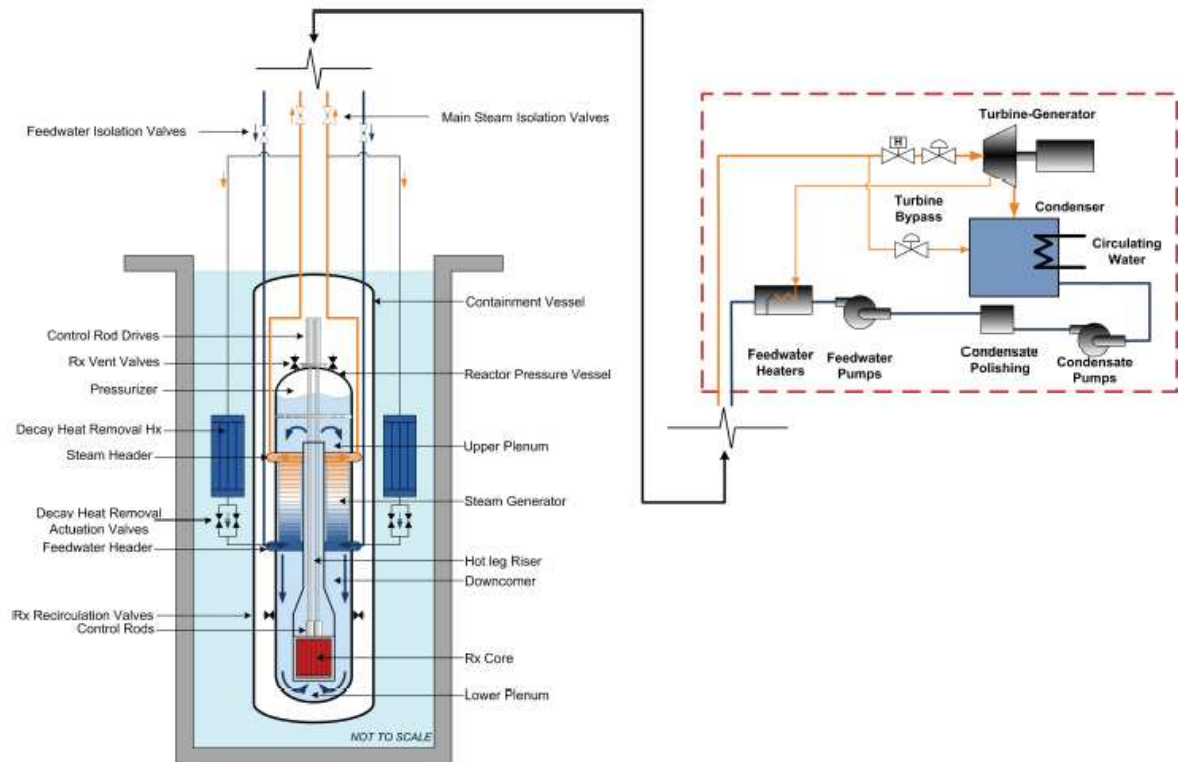
pabrik dan dikirim ke lokasi, mempercepat proses instalasi dan menekan biaya konstruksi. Karena hal tersebut, fitur keselamatan pasif merupakan pilar utama desain NuScale. Beberapa sistem utama tersebut sebagai berikut.

- 1) *Emergency Core Cooling System (ECCS)*: Menggunakan dua katup ventilasi dan dua katup resirkulasi untuk menciptakan sirkulasi alamiah dalam kondisi kehilangan pendinginan;
- 2) *Decay Heat Removal System (DHR)*: Sistem pendingin dua-fase yang mampu membuang panas peluruhan secara pasif;
- 3) *Shutdown Accumulator System (SAS)*: Menginjeksi air borat secara otomatis saat tekanan turun drastis untuk memastikan penghentian reaksi fisi;
- 4) *Control Room Habitability System*: Memastikan operator tetap aman selama 72 jam pasca kejadian melalui suplai udara terkompresi.

Semua sistem ini tidak membutuhkan aksi operator selama 72 jam pertama pasca-kecelakaan. Setelah itu, kolam reaktor menyediakan pendinginan tambahan melalui pendidihan dan ventilasi alami.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 26 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

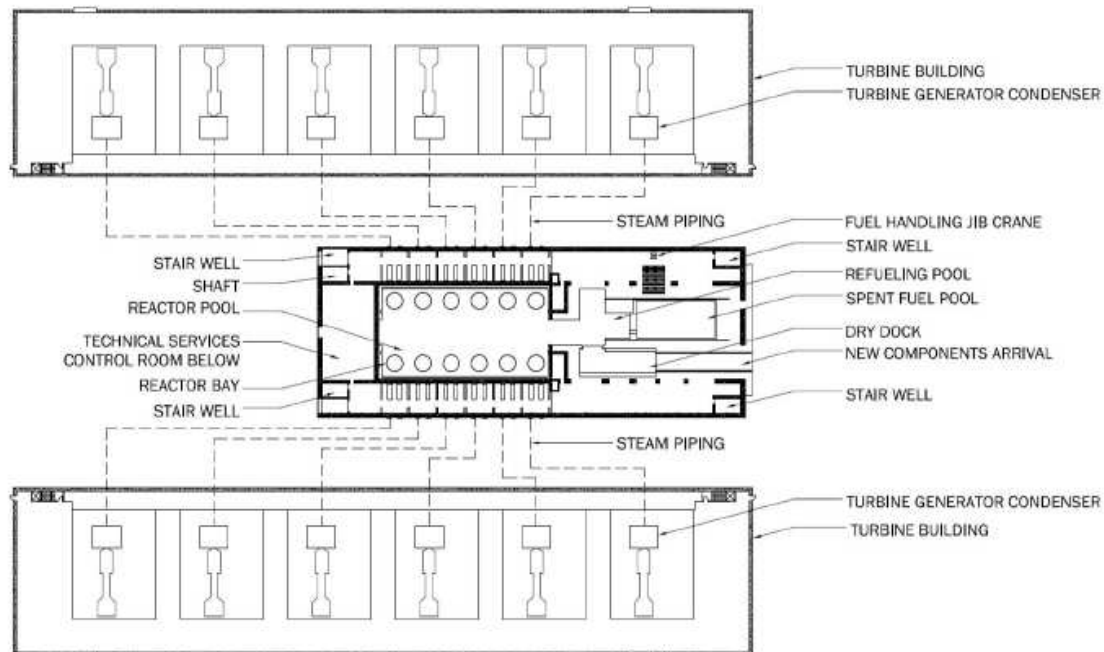


Gambar 2.2 Skema Pembangkit Listrik Tenaga nuklir 1 (satu) Modul NuScale [Cederlof, 2024]

Fasilitas NuScale mencakup gedung reaktor tahan gempa dan tabrakan pesawat, gedung turbin, ruang kontrol utama, serta gedung limbah radioaktif. Modul *Nuclear Steam Supply System (NSSS)* disusun dalam dua baris dalam kolam reaktor berlapis baja tahan bocor. Refueling dilakukan secara bergilir, satu modul dalam satu waktu, tanpa mematikan seluruh sistem. Kontrol terpusat memungkinkan pengawasan 12 modul oleh beberapa operator melalui sistem digital *Safety control and instrumentation system (SCIS)* dan *Non-safety control instrumentation system (NCIS)* yang sepenuhnya terpisah untuk fungsi keselamatan dan non-keselamatan.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 27 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal



Gambar 2.3 Skema Pembangkit Listrik Tenaga nuklir 12 (dua belas) Modul
NuScale[Cederlof, 2024]

NuScale tidak memerlukan sumber daya eksternal untuk mempertahankan kondisi aman. Tetapi menggunakan sistem pendingin berbasis menara pendingin dan air sirkulasi menjaga stabilitas termal dalam kondisi operasi normal maupun darurat. Selain itu Reaktor NuScale menawarkan beberapa keunggulan utama sebagai berikut.

- 1) Fleksibilitas modular memungkinkan penambahan bertahap sesuai kebutuhan energi;
- 2) Waktu konstruksi lebih singkat dan lebih hemat biaya karena fabrikasi dilakukan di luar lokasi;
- 3) Keselamatan pasif yang mengurangi ketergantungan pada daya eksternal dan intervensi manusia;

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 28 dari 119

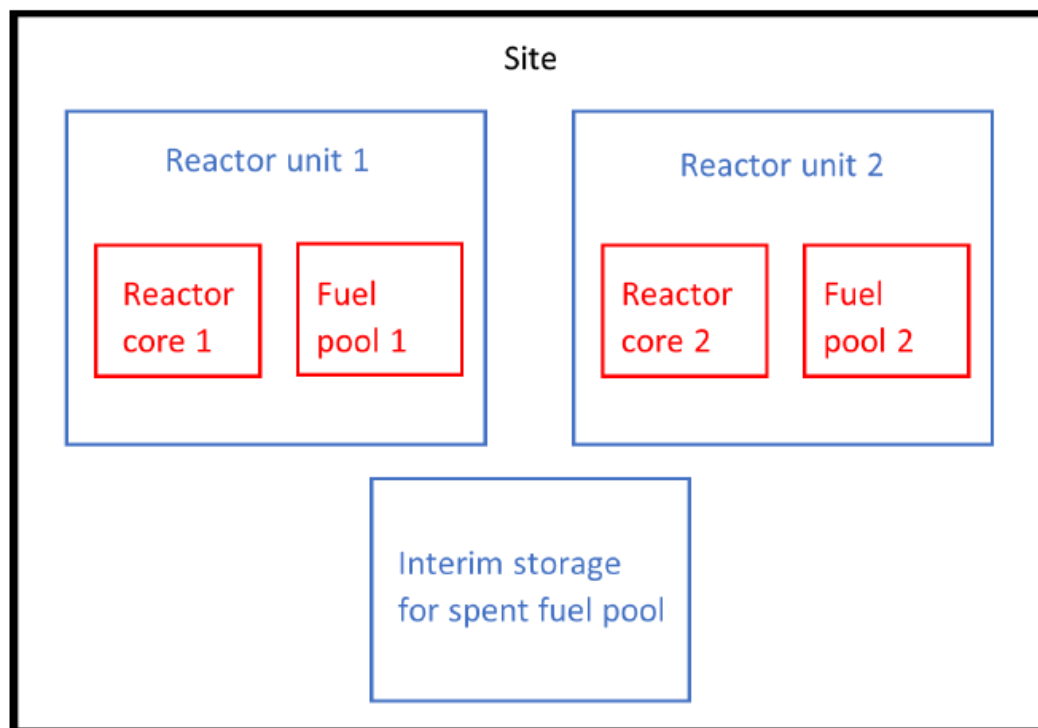
	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

- 4) Dampak lingkungan dan radiologis lebih kecil karena inventori bahan bakar rendah dan menggunakan sistem pertahanan berlapis.

Dengan frekuensi kerusakan inti (*Core Damage Frequency/CDF*) yang jauh lebih rendah dari reaktor besar konvensional, NuScale menjadi solusi menarik bagi penyedia energi masa depan yang mengutamakan keselamatan dan keberlanjutan.

2.2.2. Perbandingan Desain Modul dan Unit

Unit adalah fasilitas nuklir pembangkit listrik tunggal di pembangkit listrik tenaga nuklir. Biasanya, satu unit mencakup reaktor dan kolam bahan bakar bekas. Dalam kebanyakan kasus, satu unit memiliki lisensi operasinya sendiri.

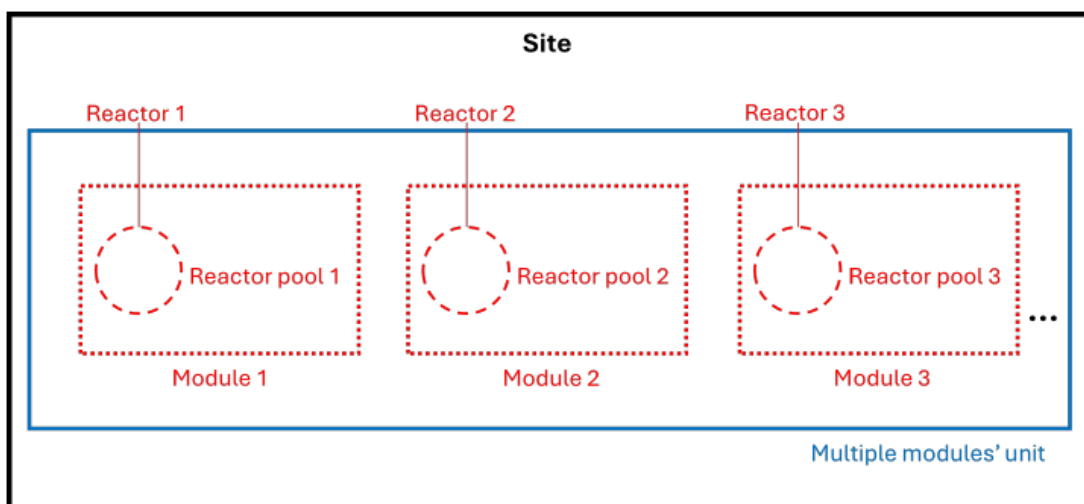


Gambar 2.4 Ilustrasi Tapak dengan Multi-Unit Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir[Cederlof, 2024]

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 29 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Sebuah *modul* adalah reaktor nuklir kecil beserta seluruh struktur, sistem, dan komponennya yang merupakan bagian dari satu kesatuan. Sedangkan *multiple modules' unit* mengacu pada konfigurasi di mana beberapa modul reaktor ditempatkan berdekatan satu sama lain dan berbagi infrastruktur yang sama (seperti bangunan, sistem pendingin, jaringan listrik, dll). Modul-modul dalam satu unit ini mungkin saling berbagi struktur, sistem, dan komponen (*Structures, Systems, and Components / SSCs*) lebih banyak dibandingkan dengan reaktor tunggal tradisional (satu unit reaktor konvensional).



Gambar 2.5 Ilustrasi Tapak dengan Multi-Modul Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir[Cederlof, 2024]

Setiap modul dapat dioperasikan secara hampir mandiri, tidak bergantung pada apakah modul lain dalam unit tersebut sudah selesai dibangun atau sedang beroperasi. Selain itu, semua modul pada dasarnya memiliki desain yang identik. Sehingga hal ini akan mengakibatkan proses perizinan untuk modul reaktor kecil (*Small Modular Reactor / SMR*) ini mungkin berbeda dengan reaktor besar konvensional.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 30 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

2.3 Standar Nasional Indonesia

2.3.1 SNI 1726:2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung[BSN, 2019]

Indonesia sebagai negara yang berada di wilayah cincin api Pasifik menghadapi risiko potensi bahaya aspek geoteknik dan kegungupain yang sangat tinggi. Konsekuensinya, diperlukan standar perencanaan bangunan PLTN Multi-Modul yang mampu menjamin keselamatan jiwa dan kelangsungan fungsi struktur saat terjadi potensi bahaya geoteknik dan kegungupain. Dalam konteks ini, SNI 1726:2019 hadir sebagai regulasi teknis yang menjadi fondasi utama dalam rekayasa struktur bangunan PLTN tahan gempa di Indonesia.

SNI 1726:2019 memberikan persyaratan minimum untuk perencanaan ketahanan gempa pada struktur bangunan gedung seperti PLTN dan struktur non-gedung. Tujuan utamanya adalah sebagai berikut.

- 1) Menentukan beban gempa rencana berdasarkan wilayah seismik dan karakteristik tanah;
- 2) Menetapkan kategori risiko struktur dan tingkat keandalan minimum terhadap kerusakan akibat gempa;
- 3) Menyediakan pedoman analisis dan desain seismik, baik untuk struktur utama maupun komponen nonstruktural.

Dokumen ini juga menyediakan prosedur berbasis kinerja (*performance-based design*) yang memungkinkan perencana menunjukkan keandalan bangunan melalui pengujian dan simulasi nonlinear, khususnya untuk proyek-proyek khusus atau inovatif.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 31 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Salah satu kekuatan utama standar ini adalah klasifikasi struktur berdasarkan kategori risiko dan penerapan pendekatan desain berdasarkan tingkat bahaya seismik (*Seismic Design Category/SDC*). Parameter tersebut seperti:

- a) spektrum respons percepatan gempa maksimum (MCER);
- b) percepatan tanah puncak (PGA); dan
- c) klasifikasi situs geoteknik.

digunakan untuk menghitung beban lateral seismik. Ini memungkinkan struktur dirancang tidak hanya tahan terhadap gempa ringan dari kegunungapian yang sering terjadi, tetapi juga gempa besar dari kegunungapian yang jarang, namun berpotensi merusak secara signifikan.

SNI 1726:2019 merinci prosedur dan ketentuan untuk berbagai jenis analisis seismik, termasuk:

- 1) metode gaya lateral ekuivalen (*static equivalent*);
- 2) analisis dinamik linier dan nonlinier (*response spectrum & time history*);
- 3) ketentuan khusus untuk elemen non struktural, sistem isolasi seismik, dan peredam energi.

Sistem struktur seperti rangka pemikul momen, rangka bresing, dan dinding geser mendapat perhatian khusus terkait kekakuan, ketidakberaturan, dan simpangan antar tingkat.

SNI ini juga mencakup perencanaan elemen non struktural seperti dinding partisi, sistem HVAC, hingga rak penyimpanan dan tangki. Elemen-elemen ini harus diperhitungkan karena dapat menjadi sumber bahaya atau kerusakan serius saat gempa terjadi, meskipun tidak menopang struktur utama.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 32 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

SNI 1726:2019 juga membuka ruang bagi penerapan sistem isolasi dasar yang dapat mengurangi gaya gempa secara signifikan melalui pelepasan gerak antara struktur dan tanah. Ini sangat penting untuk bangunan vital seperti rumah sakit atau pusat komando bencana.

Sebagai Standar Nasional Indonesia, SNI 1726:2019 memiliki kekuatan hukum mengikat, terutama dalam proses perizinan bangunan, sertifikasi desain, dan pengawasan konstruksi. Ini menjadikannya referensi utama bagi para:

- 1) insinyur struktur;
- 2) arsitek;
- 3) pengembang properti;
- 4) regulator teknis di pemerintah pusat maupun daerah.

Implementasi SNI ini juga menjadi indikator penting dalam mitigasi risiko bencana dan pembentukan kota yang tangguh (*resilient city*). Olehkarena itu di dalam kegiatan Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain Pltn Multi-Modul Terhadap Bahaya Eksternal ini, parameter seperti: spektrum respons percepatan gempa maksimum (MCER), percepatan tanah puncak (PGA), dan klasifikasi situs geoteknik yang ada di SNI 1726:2019 akan terpengaruh karena ada potensi bahaya dari aspek geoteknik, kegunungapian dan KAUM.

2.3.2. SNI 8460:2017 tentang Persyaratan perancangan geoteknik

Di tengah rencana pembangunan PLTN di Indonesia, pemahaman dan penerapan prinsip-prinsip geoteknik menjadi semakin penting. Fondasi bangunan, kestabilan lereng, keamanan terowongan, dan pengendalian tanah menjadi tantangan utama dalam memastikan ketahanan dan keandalan konstruksi. Dalam konteks ini, SNI 8460:2017 hadir sebagai rujukan utama dalam menetapkan standar teknis perancangan geoteknik dan kegempaan di Indonesia. Standar ini dirancang

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 33 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

untuk melindungi keselamatan publik, efisiensi biaya konstruksi, dan keberlanjutan lingkungan.

SNI 8460:2017 merupakan hasil kolaborasi antara Kementerian PUPR dan HATTI, yang mencakup 13 bab teknis. Tujuan utama standar ini adalah sebagai berikut.

- 1) Menetapkan persyaratan teknis dan metode analisis geoteknik;
- 2) Mewajibkan proses penyelidikan tanah dan batuan secara sistematis sebelum desain;
- 3) Memberikan kriteria perencanaan untuk fondasi, stabilitas lereng, terowongan, dinding penahan tanah, dan lainnya;
- 4) Menjamin keselamatan terhadap beban gempa, tekanan air tanah, dan keruntuhan hidraulik.

Standar ini mencakup seluruh siklus proyek, mulai dari penyelidikan geoteknik, perencanaan, desain, pemantauan selama konstruksi, hingga evaluasi kinerja pasca-konstruksi.

SNI ini memberikan perhatian besar pada penyelidikan tanah, termasuk hal berikut.

- 1) Penetapan jumlah titik bor minimum, kedalaman, dan interval pengambilan sampel;
- 2) Penggunaan berbagai uji lapangan seperti SPT, CPT, PMT, DMT, dan FVT;
- 3) Pengujian laboratorium untuk klasifikasi, kekuatan geser, konsolidasi, permeabilitas, dan kandungan organik.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 34 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Penyelidikan yang tidak memadai menjadi salah satu penyebab utama kegagalan struktur, dan standar ini memberi panduan rinci agar risiko tersebut dapat diminimalkan sejak awal. Bab-bab penting dalam SNI ini mencakup hal berikut.

- 1) Fondasi dangkal dan tiang, dengan kriteria daya dukung, penurunan, dan kestabilan lateral;
- 2) Stabilitas lereng, baik alami maupun buatan, yang mensyaratkan analisis numerik dan pertimbangan faktor likuifaksi serta aliran debris;
- 3) Dinding penahan tanah, termasuk metode klasik, *soil nailing*, *MSE walls*, dan sistem ankur, dengan pengujian dan monitoring sebagai bagian dari verifikasi desain.

Seluruh desain wajib mempertimbangkan beban statik dan dinamik, serta masa layan struktur.

SNI 8460:2017 juga membuka ruang untuk teknologi perbaikan tanah, seperti:

- a) *jet grouting*, *deep mixing*, *compaction grouting*, dan PVD dengan vakum;
- b) kriteria teknis dan parameter desain masing-masing metode;
- c) integrasi sistem *monitoring* deformasi dan tekanan pori saat dan setelah pelaksanaan.

Pendekatan ini relevan untuk menghadapi kondisi tanah lunak, gambut, atau daerah rawan likuifaksi yang sering dijumpai di wilayah Indonesia.

Mengingat kerentanan Indonesia terhadap gempa, SNI ini menyertakan bab khusus untuk desain seismik geoteknik, termasuk:

- a) spektrum respons desain berdasarkan jenis tanah dan struktur;

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 35 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

- b) persyaratan khusus untuk fondasi, dinding penahan, lereng, bendungan, dan struktur bawah tanah.

Sementara itu, keruntuhan hidraulik juga dibahas secara komprehensif, mencakup:

- a) *uplift, boiling, suffosion, dan hydraulic fracturing*; dan
b) desain sistem drainase internal, filter, dan proteksi terhadap erosi internal pada tanggul dan bendungan.

SNI 8460:2017 ini menjadi referensi yang sangat dibutuhkan dalam kegiatan Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi-Modul Terhadap Bahaya Eksternal khususnya dalam memberikan panduan rinci untuk meminimalisir potensi risiko dari bahaya eksternal aspek geoteknik.

2.4 Dokumen Internasional

2.4.1 IAEA SSR-1 Site Evaluation for Nuclear Installations

Evaluasi Tapak sebagai Fondasi Keselamatan Instalasi Nuklir. Dalam dunia teknologi nuklir, keselamatan merupakan prinsip utama yang tidak dapat ditawar. Instalasi nuklir, seperti pembangkit listrik tenaga nuklir dan reaktor riset, memiliki potensi risiko tinggi yang harus dikelola dengan ketat dan sistematis. Salah satu fondasi utama dalam menjamin keselamatan ini adalah melalui evaluasi tapak yang tepat. Dokumen IAEA SSR-1 (2019) menjadi rujukan internasional penting dalam menetapkan persyaratan evaluasi tapak yang bertujuan melindungi manusia dan lingkungan dari dampak berbahaya radiasi pengion. Evaluasi tapak memiliki peran vital dalam siklus hidup instalasi nuklir. Tujuannya adalah sebagai berikut.

- 1) Menilai kesesuaian suatu lokasi terhadap bahaya eksternal seperti gempa bumi, letusan gunung berapi, banjir, maupun potensi bahaya akibat ulah manusia;

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 36 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

- 2) Menentukan parameter desain tapak spesifik yang menjadi input bagi sistem proteksi dan struktur keselamatan instalasi;
- 3) Menilai karakteristik populasi dan lingkungan sekitar tapak untuk memastikan kemampuan pelaksanaan respons darurat secara efektif.

Evaluasi ini tidak hanya dilakukan pada tahap awal, tetapi berlanjut secara berkala sepanjang umur fasilitas untuk menyesuaikan terhadap perubahan kondisi dan data terbaru.

SSR-1 menekankan pentingnya prinsip "*defence in depth*", yaitu penerapan berlapis sistem keselamatan agar apabila satu lapisan gagal, lapisan lain masih dapat mencegah kecelakaan. Evaluasi tapak merupakan lapisan pertama dalam strategi ini. Pelaksanaan evaluasi sendiri juga harus mengikuti sistem manajemen mutu yang komprehensif, terdokumentasi, dan diverifikasi secara independen. Setiap proses, mulai dari pengumpulan data hingga analisis bahaya, harus dilakukan oleh personel yang kompeten dan mengikuti standar mutu yang tinggi.

Bahaya eksternal dibagi dalam dua kategori utama yaitu alami dan akibat ulah manusia. Evaluasi yang dilakukan mencakup identifikasi, kuantifikasi, dan pengkajian kombinasi kejadian yang mungkin terjadi hal berikut.

- 1) Bahaya seismik: Penilaian sesar aktif dan gerakan tanah untuk mendefinisikan parameter guncangan yang harus ditahan instalasi;
- 2) Bahaya vulkanik: Termasuk erupsi, jatuhnya abu, dan aliran piroklastik;
- 3) Bahaya meteorologis dan banjir: Seperti badai ekstrem, banjir sungai atau tsunami;
- 4) Bahaya buatan manusia: Termasuk kecelakaan industri, ledakan, atau kebakaran dari aktivitas manusia di sekeliling tapak.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 37 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Penilaian dilakukan secara deterministik maupun probabilistik, dan mencakup analisis ketidakpastian dalam data maupun model yang digunakan. Selain itu evaluasi tidak hanya mencermati bahaya terhadap instalasi, tetapi juga dampak instalasi terhadap masyarakat dan lingkungan. Ini meliputi estimasi pelepasan bahan radioaktif dalam kondisi operasi normal maupun kecelakaan, penyebarannya melalui udara dan air, serta identifikasi populasi yang mungkin terdampak. Elemen penting lainnya adalah kemampuan pelaksanaan tindakan darurat. Evaluasi tapak harus memastikan bahwa sistem peringatan dan evakuasi dapat diimplementasikan dengan efektif, mengingat distribusi populasi dan infrastruktur wilayah sekitar.

Keselamatan bukanlah kondisi statis. Oleh karena itu, SSR-1 menekankan pentingnya pemantauan berkelanjutan terhadap kondisi tapak dan bahaya eksternal, serta peninjauan ulang secara berkala untuk menyesuaikan desain dan respons terhadap perubahan kondisi seiring waktu, baik dari faktor alam, perubahan penggunaan lahan, atau pertumbuhan populasi.

Dokumen *SSR-1 IAEA* menjadi panduan utama bagi kegiatan Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi-Modul Terhadap Bahaya Eksternal khususnya aspek geoteknik, kegunungapian dan kejadian akibat ulah manusia.

2.4.2 IAEA SSG-89 Evaluation of Seismic Safety for Nuclear Installations

Dokumen ini memberikan rekomendasi praktis dalam rangka memenuhi standar keselamatan internasional, baik untuk instalasi yang sudah ada maupun yang baru dirancang. Tujuan utama dari dokumen ini adalah untuk memberikan panduan sistematis dalam mengevaluasi kapasitas seismik suatu instalasi nuklir. Evaluasi ini diperlukan tidak hanya dalam tahap desain, tetapi juga secara berkala selama umur operasi instalasi. Hal ini mencakup antisipasi terhadap gempa bumi yang melebihi parameter desain awal (*beyond design basis earthquake*) dan untuk

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 38 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

menghindari terjadinya efek "*cliff edge*", yaitu kegagalan mendadak dan parah akibat sedikit peningkatan intensitas gempa.

Beberapa jenis instalasi nuklir yang masuk di dalam SSG-89, antara lain: Pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN), reaktor riset dan fasilitas produksi radioisotop, fasilitas bahan bakar nuklir (pengayaan, fabrikasi, *reprocessing*), dan fasilitas penyimpanan bahan bakar bekas dan limbah radioaktif.

Pendekatan evaluasi akan berbeda tergantung dari skala risikonya, selain itu pendekatan bertingkat juga digunakan untuk menyesuaikan tingkat analisis dengan pentingnya keselamatan dari masing-masing instalasi. Tiga pendekatan utama yang direkomendasikan dalam dokumen SSG-89 ini meliputi hal berikut.

- 1) ***Seismic Margin Assessment (SMA)***: pendekatan deterministik yang menilai margin antara kapasitas aktual dan beban gempa yang ditentukan;
- 2) ***Seismic Probabilistic Safety Assessment (SPSA)***: analisis probabilistik yang mengukur risiko berdasarkan kemungkinan dan konsekuensi dari berbagai skenario gempa;
- 3) ***PSA-based SMA***: kombinasi dari dua pendekatan sebelumnya untuk memberikan gambaran risiko yang lebih komprehensif.

Masing-masing pendekatan ini bergantung pada data input gempa yang akurat dan kondisi terkini instalasi (*as-is condition*), termasuk hasil pemantauan umur pakai, modifikasi desain, dan kondisi aktual operasional.

Data yang digunakan dalam evaluasi seismik harus mencakup: Parameter dasar desain awal, data seismotektonik dan sejarah kegempaan lokal, kondisi geoteknik dan potensi deformasi permanen seperti likuifaksi, dan evaluasi bahaya

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 39 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

gabungan seperti tsunami atau tanah longsor akibat gempa. Keakuratan dan kelengkapan data sangat penting untuk memperoleh hasil evaluasi yang andal.

Meskipun fokus utama diberikan pada PLTN, evaluasi juga harus mencakup instalasi nuklir lain melalui penerapan pendekatan bertingkat. Penentuan target kinerja, klasifikasi seismik, dan persyaratan margin keselamatan ditentukan berdasarkan pentingnya fungsi keselamatan dari masing-masing sistem, struktur, dan komponen (SSK).

Hasil dari evaluasi keselamatan seismik tidak hanya menjadi dasar untuk: Penentuan kebutuhan modifikasi atau penguatan struktur, penyusunan prosedur operasional pasca-gempa, perencanaan respons darurat dan manajemen risiko, dan pengambilan keputusan berbasis risiko (*risk-informed decision making*). Namun juga sebagai dasar justifikasi teknis kepada badan pengawas dalam mendukung keselamatan publik dan lingkungan.

Evaluasi keselamatan seismik harus menjadi bagian dari sistem manajemen keselamatan yang terdokumentasi dengan baik. Hal ini mencakup: Proses revisi berkala terhadap hasil evaluasi, dokumentasi perubahan desain dan operasional, dan pemantauan berkelanjutan dan integrasi dalam program pemeliharaan. Dengan pendekatan sistematis ini, diharapkan organisasi pengelola dapat mempertahankan kapabilitas instalasi terhadap gempa sepanjang siklus hidupnya.

Tiga pendekatan utama *Seismic Margin Assessment*, *Seismic Probabilistic Safety Assessment* dan kombinasi antara keduanya yang direkomendasikan dalam dokumen SSG-89 ini menjadi dasar utama bagi kegiatan Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi-Modul Terhadap Bahaya Eksternal dalam melakukan analisis keselamatan probabilistik untuk perhitungan PLTN Multi-Modul.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 40 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

2.4.3 IAEA SSR-2/1 (Rev. 1) Safety of Nuclear Power Plants: Design

Keselamatan dalam pengoperasian Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) tidak hanya bergantung pada prosedur operasional dan pelatihan personel, tetapi juga bertumpu pada desain awal fasilitas yang memenuhi prinsip dan standar keselamatan internasional. Dokumen *SSR-2/1 (Rev.1)* dari International Atomic Energy Agency (IAEA) merupakan standar persyaratan keselamatan khusus yang menjadi rujukan global dalam perancangan PLTN. Revisi dokumen SSR-2/1 dilakukan pasca insiden Fukushima Daiichi pada 2011. Tragedi tersebut menjadi pelajaran penting bahwa desain PLTN harus mampu mengantisipasi kejadian ekstrem dan kecelakaan berat, termasuk kehilangan daya total dan pelepasan radioaktif. Oleh karena itu, dokumen ini memuat prinsip-prinsip keselamatan yang diperkuat dan diselaraskan dengan *Fundamental Safety Principles* IAEA di dokumen SF-1.

Tujuan utama SSR-2/1 adalah menetapkan persyaratan desain untuk struktur, sistem, dan komponen penting keselamatan, serta untuk prosedur dan proses organisasi yang mendukung pengoperasian PLTN yang aman. Dokumen ini mencakup semua tahapan siklus hidup PLTN – dari desain, konstruksi, operasi, hingga dekomisioning. Dokumen ini merujuk pada satu tujuan keselamatan fundamental yaitu melindungi manusia dan lingkungan dari bahaya radiasi pengion. Untuk mencapai tujuan tersebut, terdapat 10 prinsip keselamatan utama yang dijabarkan dalam bentuk persyaratan teknis. Beberapa prinsip penting tersebut adalah sebagai berikut.

1) Proteksi Radiasi dalam desain

Desain harus menjamin paparan radiasi selama operasi normal berada di bawah batas yang ditetapkan dan sedapat mungkin ditekan serendah mungkin

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 41 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

(*as low as reasonably achievable/ALARA*). Sistem juga harus mampu mengurangi dampak radiologis apabila terjadi kecelakaan;

2) Konsep Pertahanan Berlapis (*Defence in Depth*)

Desain harus menerapkan lima lapisan pertahanan yang independen: pencegahan deviasi, deteksi gangguan, pencegahan kecelakaan, mitigasi kecelakaan berat, dan respons darurat. Prinsip ini menjamin bahwa jika satu lapisan gagal, lapisan berikutnya dapat mengintervensi;

3) Praktik Rekayasa yang terbukti dan penilaian keselamatan

Setiap elemen dalam desain harus berdasarkan pengalaman teknis yang telah terbukti. Evaluasi keselamatan harus dilakukan secara komprehensif untuk mengidentifikasi sumber radiasi, mengevaluasi dosis yang mungkin diterima pekerja maupun publik, serta mengukur ketahanan terhadap skenario kecelakaan.

SSR-2/1 membagi persyaratan desain menjadi dua kategori utama adalah sebagai berikut.

- 1) Desain Umum PLTN: mencakup penetapan batas desain, pengklasifikasian kondisi operasi dan kecelakaan, pengendalian kegagalan tunggal, manajemen penuaan sistem, serta sistem pendukung dan pengendalian manusia;
- 2) Desain Sistem Spesifik: menyangkut sistem teras reaktor, sistem pendingin, sistem kontainmen, sistem instrumentasi dan kontrol, pasokan daya darurat, sistem ventilasi dan proteksi kebakaran, serta sistem penanganan limbah dan bahan bakar bekas.

Setiap bagian ini memiliki persyaratan khusus yang dirumuskan dalam bentuk pernyataan "*shall*", menandakan bahwa pemenuhannya bersifat wajib. Sebagai tanggapan terhadap pelajaran dari kejadian Fukushima, SSR-2/1 (Rev.1) menambahkan ketentuan agar desain dapat:

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 42 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

- a) mencegah kecelakaan parah melalui penguatan parameter desain dasar;
- b) meminimalkan pelepasan radioaktif dengan menyediakan sistem mitigasi yang canggih;
- c) menjamin ketahanan terhadap kehilangan daya total (*station blackout*) dan skenario kehilangan pendingin.

Desain juga harus memperhitungkan interaksi antara keselamatan dan keamanan, sehingga langkah-langkah proteksi fisik tidak mengganggu fungsi keselamatan dan sebaliknya.

Bagi negara seperti Indonesia yang sedang mempertimbangkan pembangunan PLTN, dokumen SSR-2/1 ini menjadi referensi utama bagi kegiatan Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi-Modul Terhadap Bahaya Eksternal, terutama bahaya eksternal dari aspek geoteknik, kegungupian dan kejadian akibat ulah manusia untuk menjamin keselamatan desain PLTN dengan menetapkan prinsip pertahanan berlapis, proteksi radiasi, dan ketahanan terhadap kecelakaan parah. Selain itu dokumen ini memberikan standar tinggi dalam merancang instalasi nuklir yang aman, andal, dan bertanggung jawab terhadap publik dan lingkungan.

2.4.4. IAEA SSG-34 (Rev. 1) Design of Electrical Power Systems for Nuclear Power Plants

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) merupakan fasilitas kompleks yang membutuhkan keandalan tinggi dalam seluruh sistem pendukungnya, terutama sistem kelistrikan. Sistem ini bertugas menyediakan daya untuk semua peralatan penting keselamatan, baik dalam kondisi normal maupun saat terjadi gangguan atau kecelakaan. Dokumen SSG-34 yang diterbitkan oleh IAEA pada tahun 2016 memberikan panduan mendalam tentang desain sistem tenaga listrik yang andal dan aman untuk PLTN, selaras dengan standar keselamatan internasional. Sistem

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 43 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

daya listrik berfungsi sebagai tulang punggung keselamatan operasional PLTN. Olehkarena itu, sistem ini harus mampu:

- 1) menyediakan catu daya yang andal dan berkelanjutan untuk sistem penting keselamatan;
- 2) bekerja dalam berbagai kondisi operasi, termasuk skenario kecelakaan;
- 3) menyediakan sistem cadangan dan alternatif untuk kondisi darurat seperti kehilangan daya total dari luar (*station blackout*).

Tanpa sistem kelistrikan yang dirancang secara memadai, fungsi-fungsi keselamatan utama seperti pendinginan teras reaktor, kontrol reaktivitas, dan penjagaan kontainmen tidak akan dapat dijalankan secara andal. Dokumen SSG-34 ini membagi sistem kelistrikan PLTN menjadi tiga bagian besar adalah sebagai berikut.

- 1) Sistem Daya dari Luar (*Off-site Power System*). Meliputi jaringan transmisi dan gardu induk yang menghubungkan PLTN dengan sistem kelistrikan nasional. Meskipun bukan bagian dari instalasi PLTN secara langsung, sistem ini sangat krusial untuk keselamatan;
- 2) Sistem Daya di Dalam PLTN (*On-site Power System*). Termasuk generator utama, transformator bantu, sistem distribusi, baterai, sistem AC/DC, dan sistem cadangan (genset darurat, inverter, UPS);
- 3) *Preferred Power Supply*. Kombinasi antara pasokan dari jaringan luar (*off-site*) dan dari generator utama yang menjadi sumber daya utama untuk sistem penting keselamatan.

Berdasarkan aspek desain keselamatan dalam sistem kelistrikan, SSG-34 menekankan bahwa sistem kelistrikan harus:

- 1) menerapkan pertahanan berlapis (*defence in depth*);

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 44 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

- 2) mampu mengatasi gangguan tegangan dan frekuensi dari jaringan;
- 3) memiliki redundansi, diversitas, dan isolasi untuk mencegah kegagalan umum;
- 4) mendukung operasi darurat dalam kondisi kehilangan daya dari luar maupun dari sistem utama; dan
- 5) dirancang agar aman dari risiko kelistrikan bagi pekerja dan peralatan (proteksi petir, kelebihan beban, korsleting, dll).

Desain juga harus mempertimbangkan integrasi antara keselamatan dan keamanan (*safety-security interface*) sehingga antara satu dengan yang lain tidak saling mengorbankan yang lain. Selain itu setiap komponen dalam sistem kelistrikan diklasifikasikan berdasarkan fungsi keselamatannya, frekuensi keterpanggilan dalam kondisi gangguan dan waktu atau durasi fungsi tersebut dibutuhkan. Pendekatan klasifikasi ini digunakan untuk menentukan standar desain, inspeksi, dan pengujian yang sesuai untuk tiap peralatan atau subsistem.

Di dalam dokumen SSG-34 ini juga memberikan pedoman khusus terkait sistem kelistrikan AC dan DC yang tidak terputus, kriteria pemilihan peralatan (*rating*, ketahanan, usia pakai), praktik sistem pentanahan (*grounding*) dan proteksi lonjakan, dokumentasi, uji coba, dan pengujian sistem secara berkala serta koordinasi antara operator PLTN dan operator sistem transmisi.

Panduan untuk memperkuat keandalan dan keselamatan sistem kelistrikan dalam mendukung pengoperasian reaktor nuklir yang aman dan berkelanjutan sangatlah penting di dalam kegiatan Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi-Modul Terhadap Bahaya Eksternal, mengingat kejadian bahaya eksternal aspek getoknik, kegungupian dan KAUM akan sangat mempengaruhi kinerja kelistrikan di dalam PLTN, olehkarena itu dokumen SSG-34 ini menjadi rujukan utama untuk kegiatan rekomendasi kebijakan ini.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 45 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

2.4.5 IAEA SSR-2/2 (Rev. 1) Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation

Keselamatan nuklir tidak hanya ditentukan oleh desain teknis dan tapak yang ideal, tetapi juga oleh bagaimana Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) saat dikomisioning dan dioperasikan. Proses ini mencakup rentang waktu yang panjang dan aktivitas yang kompleks mulai dari pengujian awal peralatan hingga pengoperasian normal dan tanggap darurat. Dokumen *SSR-2/2 (Rev.1)* yang diterbitkan oleh *International Atomic Energy Agency* (IAEA) ini menjadi referensi bagi kegiatan Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi-Modul Terhadap Bahaya Eksternal aspek geoteknik, kegunungapian dan Kejadian akibat ulah manusia. Revisi dokumen ini merupakan respons terhadap insiden besar seperti kecelakaan Fukushima Daiichi tahun 2011, yang menekankan perlunya memperkuat standar keselamatan terutama dalam hal kesiapan kedaruratan, manajemen kecelakaan, dan peninjauan keselamatan berkala. Tujuan SSR-2/2 adalah untuk menetapkan persyaratan keselamatan yang wajib dipenuhi dalam proses komisioning dan pengoperasian PLTN berdasarkan prinsip dasar keselamatan yang sudah disepakati secara internasional. Dokumen ini menekankan prinsip-prinsip keselamatan inti seperti berikut.

- 1) Tanggung jawab utama atas keselamatan berada di tangan organisasi pengoperasian;
- 2) Kepemimpinan dan manajemen untuk keselamatan harus konsisten dan kuat;
- 3) Pengoptimalan perlindungan untuk mencapai tingkat keselamatan tertinggi yang dapat dicapai secara wajar;
- 4) Kesiapsiagaan dan tanggap darurat menjadi kewajiban yang harus direncanakan sejak awal.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 46 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Tujuan utama keselamatan adalah melindungi manusia dan lingkungan dari dampak berbahaya radiasi pengion selama seluruh fase pengoperasian. Persyaratan Kunci dalam Komisioning dan Operasi adalah sebagai berikut.

1) Komisioning (*Commissioning*)

Komisioning adalah proses transisi dari pembangunan ke operasi yang mencakup, uji fungsi sistem dan komponen sesuai desain, verifikasi terhadap keselamatan desain dalam kondisi nyata, dan pengumpulan data awal untuk dasar pengoperasian dan pelatihan personel. Oleh karena itu, komisioning harus dilakukan secara bertahap, terdokumentasi, dan dikendalikan oleh organisasi pengoperasian, serta melibatkan evaluasi berkala oleh badan pengawas.

2) Operasi Normal dan Keadaan Darurat

Pengoperasian PLTN mencakup kondisi normal, gangguan operasional, serta persiapan dan tanggapan terhadap kecelakaan. Persyaratan utamanya meliputi hal berikut.

- a) Kebijakan keselamatan operasional yang mengutamakan keselamatan di atas produksi;
- b) Pelatihan personel dan sistem manajemen kompetensi yang ketat;
- c) Pengendalian konfigurasi sistem dan modifikasi agar tetap sesuai dengan batas desain dan keselamatan;
- d) Tinjauan keselamatan berkala (*periodic safety review*) sebagai umpan balik dari pengalaman operasi.

3) Program Khusus Operasional

SSR-2/2 mengharuskan PLTN memiliki program-program operasional seperti:

- a) program manajemen kecelakaan (*accident management programme*);
- b) perlindungan radiasi dan pengelolaan limbah radioaktif;
- c) program keselamatan kebakaran;

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 47 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

- d) pelaporan dan analisis pengalaman operasi (*operating experience feedback*) untuk mencegah kejadian berulang.

4) Pemeliharaan dan Inspeksi

Pemeliharaan, pengujian, dan inspeksi harus dilakukan secara terencana dan terdokumentasi untuk, menjaga keandalan sistem keselamatan, menjamin kesiapan operasi dan respon terhadap kejadian, dan mengelola penuaan peralatan dan struktur instalasi.

2.4.6 IAEA GSR Part 4 (Rev. 1) Safety Assessment for Facilities and Activities

Dalam dunia modern yang sarat dengan pemanfaatan teknologi nuklir dan radiasi, penilaian keselamatan (*safety assessment*) menjadi landasan fundamental untuk menjamin perlindungan manusia dan lingkungan dari dampak berbahaya radiasi pengion. Dokumen *IAEA GSR Part 4 (Rev.1)* menetapkan persyaratan umum untuk melakukan penilaian keselamatan terhadap seluruh fasilitas dan aktivitas yang melibatkan risiko radiasi, dan memberikan kerangka sistematis untuk mencapai tingkat keselamatan yang tinggi dan konsisten di seluruh dunia.

Penilaian keselamatan merupakan proses evaluasi sistematis terhadap desain, operasi, dan faktor manusia dalam sebuah fasilitas atau aktivitas yang berpotensi menghasilkan paparan radiasi. Dokumen ini direvisi pasca insiden Fukushima Daiichi tahun 2011, dan mencakup peningkatan persyaratan terhadap:

- margin keselamatan terhadap kejadian eksternal;
- pencegahan efek "*cliff-edge*" atau adanya sedikit perubahan yang dapat menimbulkan kegagalan besar;
- penilaian terhadap kegiatan atau fasilitas ganda dalam satu tapak; dan
- penilaian aspek manusia dalam kondisi kecelakaan.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 48 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Keselamatan bukan hanya tanggung jawab teknis, tetapi juga kewajiban etis dan hukum negara-negara anggota IAEA, yang menjadikan standar ini sebagai rujukan untuk regulasi nasional maupun evaluasi independen.

Tujuan utama dari dokumen GSR Part 4 adalah menilai apakah tingkat keselamatan yang memadai telah dicapai, menjamin penerapan prinsip keselamatan dasar IAEA seperti proteksi radiasi, justifikasi aktivitas, optimasi proteksi, dan pencegahan kecelakaan. Dan menyediakan kerangka kerja bagi desain, pengoperasian, modifikasi, serta penonaktifan fasilitas. Penilaian dilakukan tidak hanya saat pembangunan fasilitas, tetapi juga sepanjang siklus hidupnya, termasuk saat perpanjangan umur, perubahan kepemilikan, dan dekomisioning.

GSR Part 4 (Rev.1) mengusung prinsip *graded approach*, yaitu tingkat kedalaman dan cakupan penilaian disesuaikan dengan, besarnya risiko radiasi dari fasilitas atau aktivitas, kompleksitas dan ketidakpastian desain atau operasional, dan potensi kejadian ekstrem dengan dampak tinggi meskipun probabilitas rendah. Dengan pendekatan ini, sumber daya dapat digunakan secara proporsional dan tetap mencapai hasil penilaian yang andal.

Dokumen ini mengatur bahwa penilaian keselamatan harus mencakup, fungsi keselamatan utama, seperti pengendalian reaktivitas dan pendinginan bahan bakar. Karakteristik tapak, termasuk risiko gempa bumi, banjir, atau efek manusia. Dan perlindungan terhadap radiasi, dalam kondisi normal dan kecelakaan. Olehkarena itu, Kegiatan Rekomendasi ini menggunakan GSR Part 4 (Rev.1) sebagai referensi untuk bahaya eksternal untuk aspek kegunungapian dan kejadian akibat ulah manusia.

Penilaian keselamatan dilakukan dengan metode deterministik dan probabilistik, serta didukung oleh simulasi komputer, data operasional, dan studi ketidakpastian. Penilaian keselamatan harus disertai verifikasi independen oleh

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 49 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

organisasi yang tidak terlibat langsung dalam pelaksanaan aktivitas. Selain itu, dokumen ini mewajibkan: Dokumentasi yang sistematis, pemeliharaan dan peninjauan berkala, dan penggunaan data pengalaman operasional (*operating experience*) sebagai umpan balik berkelanjutan.

2.4.7 IAEA SRS Nomor 110 Multi-Unit Probabilistic Safety Assessment

Insiden besar di pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) Fukushima Daiichi pada tahun 2011 menjadi titik balik penting dalam pendekatan keselamatan nuklir dunia. Tiga reaktor mengalami kerusakan inti secara simultan, dan dampaknya membuktikan bahwa pendekatan keselamatan tradisional—yang hanya berfokus pada satu unit reaktor—tidak lagi memadai. Dalam konteks ini, *International Atomic Energy Agency* (IAEA) menerbitkan *Safety Reports Series Nomor 110* sebagai panduan pengembangan dan penerapan *Multi-Unit Probabilistic Safety Assessment* (MUPSA), yang menyempurnakan pendekatan sebelumnya dengan mengintegrasikan interaksi antara beberapa unit dalam satu tapak nuklir. Dokumen ini menjadi referensi yang penting bagi Kegiatan Keselamatan Desain PLTN Multi-Modul mengingat pendekatan *Multi-Modul* bisa diasumsikan dengan pendekatan *Multi-Unit*. Berikut di bawah ini beberapa penjelasan terkait perhitungan *probabilistic* untuk *Multi-Unit* yang akan dijadikan rujukan untuk perhitungan *Multi-Modul*.

Sebagian besar tapak PLTN di dunia merupakan fasilitas *multi-unit*, yaitu memiliki dua atau lebih reaktor di lokasi yang sama. Namun, sebelum 2011, *probabilistic safety assessment* (PSA) umumnya hanya dilakukan untuk satu unit (SUPSA). Padahal, skenario kecelakaan dapat melibatkan interaksi antar unit yang meningkatkan kompleksitas dan potensi risiko. Oleh karena itu, dokumen ini bertujuan menyediakan metodologi terstruktur dalam mengembangkan MUPSA Level 1 (kerusakan teras reaktor), merancang model Level 2 dan 3 (pelepasan

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 50 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

radioaktif dan dampak publik), serta menganalisis risiko agregat dari seluruh tapak PLTN. Komponen Utama MUPSA adalah sebagai berikut.

1) Perluasan Ruang Lingkup dari SUPSA ke MUPSA

MUPSA tidak hanya menilai risiko masing-masing reaktor secara individu, tetapi juga dampak kejadian internal dan eksternal yang mempengaruhi beberapa unit sekaligus, kegagalan sebab umum (*common cause failure*) lintas unit, ketergantungan antar sistem bersama (*shared systems*) dan dampak kontaminasi lintas unit, serta intervensi operator dalam skenario darurat yang melibatkan lebih dari satu unit.

2) Matriks resiko baru untuk Multi-Unit

IAEA mengembangkan matriks risiko baru dalam konteks multi-unit antara lain adalah sebagai berikut.

- a) MUCDF (Multi-Unit Core Damage Frequency): frekuensi kerusakan teras pada dua atau lebih unit dalam satu tahun tapak;
- b) SCDF (Site Core Damage Frequency): frekuensi kerusakan teras pada seluruh situs fasilitas nuklir di tapak;
- c) SLERF (Site Large Early Release Frequency): frekuensi pelepasan awal yang besar dari beberapa sumber;
- d) MSFDF (Multi-Source Fuel Damage Frequency): Frekuensi kerusakan bahan bakar di reaktor dan kolam bahan bakar bekas (SFP).

Pendekatan ini memfasilitasi analisis risiko yang komprehensif dan informatif dalam konteks keselamatan tapak secara keseluruhan.

3) Tahapan Metodologi MUPSA

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 51 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

MUPSA dilakukan dalam tiga level yaitu pertama menganalisis probabilitas kerusakan teras reaktor, kedua menilai probabilitas dan kategori pelepasan radioaktif, dan ketiga adalah memprediksi konsekuensi publik, dosis radiasi, dan dampak lingkungan/sosial ekonomi. Setiap level membutuhkan integrasi data dari SUPSA, serta pemodelan tambahan yang memperhitungkan interaksi antar unit dan agregasi risiko.

Dokumen ini menyajikan studi kasus nyata dari negara-negara seperti Kanada, Prancis, Hungaria, Korea Selatan, Inggris, dan Amerika Serikat. Pengalaman mereka menunjukkan bahwa hal berikut.

- a) Risiko multi-unit dapat menyumbang persentase signifikan dari total risiko tapak;
- b) Interkoneksi sistem dan kesamaan desain memperbesar potensi kegagalan simultan;
- c) Kebutuhan akan *Human Reliability Analysis* (HRA) yang mempertimbangkan beban kerja operator antar unit sangat penting;
- d) *Scoping approach* dapat digunakan untuk menyaring skenario risiko rendah sebelum melakukan analisis kuantitatif penuh.

Scoping approach dalam konteks *Multi-Unit Probabilistic Safety Assessment* (MUPSA) adalah pendekatan awal yang digunakan untuk menyaring dan memilih skenario atau kombinasi kejadian yang paling relevan dan signifikan untuk dianalisis lebih lanjut secara mendalam.

Beberapa tantangan teknis dalam penerapan MUPSA antara lain sebagai berikut, kompleksitas pemodelan interaksi antar unit, keterbatasan data untuk analisis *common cause failure*, korelasi kerentanan terhadap bahaya eksternal antar unit yang sulit dimodelkan, dan kurangnya standar matrik keselamatan Level 3 pada level tapak. Untuk itu, IAEA mendorong pengembangan pendekatan fleksibel

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 52 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

berbasis pengalaman negara anggota, serta integrasi antara SUPSA dan MUPSA untuk membentuk profil risiko menyeluruh.

2.4.8. IAEA SSG-3 (Rev. 1) Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants

Keselamatan dalam pengoperasian Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) merupakan prioritas utama dalam pengembangan energi nuklir. Salah satu pendekatan sistematis dan kuantitatif yang telah diadopsi secara global untuk menilai dan mengelola risiko di PLTN adalah *Probabilistic Safety Assessment* (PSA) atau Penilaian Keselamatan Probabilistik. Dokumen terbaru dari IAEA, SSG-3 Rev. 1, memberikan panduan teknis komprehensif mengenai pengembangan dan penerapan PSA Level 1, yang fokus pada evaluasi kemungkinan terjadinya kerusakan teras reaktor (*core damage*).

PSA Level 1 berperan penting dalam mengidentifikasi dan mengukur frekuensi skenario kegagalan yang dapat menyebabkan kerusakan pada bahan bakar reaktor atau kolam penyimpanan bahan bakar bekas. Melalui pendekatan kuantitatif berbasis probabilitas, PSA Level 1 membantu mengevaluasi keandalan sistem keselamatan dan efektivitas prosedur operasional dalam mencegah kecelakaan. Hal ini memberikan wawasan tambahan di luar pendekatan deterministik tradisional dan mendukung pengambilan keputusan berbasis risiko (*risk-informed decision making*).

Dokumen SSG-3 Rev. 1 menekankan pentingnya cakupan penuh PSA yang mencakup, semua kondisi operasi (normal, shutdown, dan transien), semua inisiasi kejadian internal dan eksternal (seperti kebakaran internal, banjir, gempa, dan serangan manusia), interaksi antar unit reaktor (multi-unit PSA), serta kolam bahan bakar bekas. Pendekatan di SSG-3 Rev. 1 ini juga bisa digunakan untuk menghitung PSA Multi-Modul di kegiatan rekomendasi kebijakan keselamatan desain PLTN Multi-Modul terhadap bahaya eksternal.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 53 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Integrasi dari berbagai aspek ini dalam satu model PSA terpadu memungkinkan penilaian risiko yang holistik terhadap fasilitas nuklir, meningkatkan efektivitas dalam penilaian dan mitigasi risiko. PSA tidak hanya menjadi alat penilaian, tetapi juga menjadi instrumen penting dalam hal berikut.

- a) Evaluasi dan optimalisasi desain reactor;
- b) Penjadwalan inspeksi, pengujian, dan pemeliharaan berbasis risiko;
- c) Klasifikasi sistem, struktur, dan komponen berdasarkan pentingnya terhadap keselamatan; dan
- d) Pengembangan prosedur darurat dan pelatihan personel berdasarkan wawasan risiko.

Dalam konteks ini, PSA berfungsi sebagai dasar pengambilan keputusan yang lebih transparan, berbasis data, dan proaktif terhadap perubahan kondisi teknis dan operasional.

Selain itu *living* PSA juga penting dilakukan, yaitu praktik untuk memperbarui PSA secara berkala mengikuti perubahan desain, operasi, data keandalan, dan kemajuan metode analisis. Validasi eksternal dan *peer review* yang independen menjadi bagian integral untuk memastikan kualitas, keandalan, dan penerimaan PSA dalam komunitas keselamatan nuklir internasional.

SSG-3 Rev. 1 tidak bersifat mengikat secara hukum, namun telah menjadi acuan internasional bagi banyak negara dalam membentuk kerangka regulasi nasionalnya. Dokumen ini mendukung pelaksanaan Konvensi Keselamatan Nuklir dan membantu negara-negara anggota dalam memenuhi kewajiban hukum internasionalnya dalam perlindungan radiasi dan keselamatan nuklir.

Dokumen SSG-3 Rev. 1 menegaskan peran strategis PSA Level 1 sebagai alat fundamental untuk menjamin keselamatan PLTN. Dengan pendekatan yang komprehensif, konsisten, dan berbasis praktik terbaik internasional, PSA menjadi landasan yang kokoh dalam mewujudkan pengoperasian PLTN yang aman dan

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 54 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

andal, serta sebagai instrumen penting dalam tata kelola risiko nuklir secara nasional dan global.

2.4.9. IAEA SSG-4 (Rev. 1) Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants

Dalam pengelolaan risiko keselamatan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), pemahaman mendalam terhadap potensi kecelakaan parah sangat krusial. *Probabilistic Safety Assessment* (PSA) atau Penilaian Keselamatan Probabilistik tingkat 2 (*Level 2*) berperan penting dalam mengevaluasi kemungkinan dan konsekuensi pelepasan radioaktif dari sistem reaktor yang telah mengalami kerusakan bahan bakar. Dokumen SSG-4 (Rev. 1) dari IAEA menyajikan panduan lengkap dan mutakhir dalam merancang dan menerapkan PSA Level 2 sebagai bagian penting dari tata kelola keselamatan nuklir global.

Berbeda dari PSA Level 1 yang fokus pada penilaian frekuensi kerusakan teras reaktor, PSA Level 2 mengevaluasi bagaimana kerusakan tersebut dapat berkembang menjadi pelepasan zat radioaktif ke lingkungan. Proses ini mencakup analisis progresi kecelakaan berat, integritas sistem kontainmen, perhitungan besaran dan bentuk zat radioaktif yang dilepaskan (*source term*), dan kuantifikasi skenario pelepasan tersebut.

Melalui pendekatan ini, PSA Level 2 memungkinkan identifikasi titik-titik kritis pada desain dan pengoperasian PLTN yang berpotensi menimbulkan pelepasan radiasi signifikan. Hal ini tidak hanya mendukung pengembangan sistem keselamatan yang lebih tangguh, tetapi juga menjadi landasan utama dalam kesiapsiagaan dan penanggulangan darurat nuklir.

PSA Level 2 di dokumen ini disusun berdasarkan sejumlah tahapan metodologis, antara lain, penentuan status kerusakan instalasi (*Plant Damage States*), analisis progresi kecelakaan dan interaksi dengan kolam bahan bakar bekas, evaluasi kinerja kontainmen reaktor, analisis keandalan manusia dan

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 55 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

peralatan, penyusunan dan kuantifikasi pohon kejadian kecelakaan (*event trees*), dan perhitungan *source term* dan kategorisasi skenario pelepasan.

Dokumen ini juga menekankan pentingnya integrasi PSA Level 2 dengan PSA Level 1 dan kontribusinya terhadap PSA Level 3, yang menilai dampak terhadap masyarakat dan lingkungan secara luas.

Beberapa manfaat praktis dari PSA Level 2 antara lain, menunjang keputusan desain dan pengembangan fitur pengelolaan kecelakaan parah, menyediakan input penting dalam perencanaan tanggap darurat dan manajemen krisis, memfasilitasi evaluasi peraturan keselamatan secara kuantitatif, dan mendukung prinsip *practical elimination*, yaitu penghapusan praktis terhadap skenario pelepasan awal atau besar.

Selain itu, PSA Level 2 juga memberikan masukan strategis dalam pengelolaan risiko pada lokasi dengan lebih dari satu unit reaktor (*multi-unit sites*) dan pada analisis kecelakaan yang melibatkan kolam penyimpanan bahan bakar bekas (*spent fuel pools*). Pendekatan strategis di SSG-4 Rev.1 ini menjadi referensi yang penting untuk pengelolaan resiko pada Multi-Modul yang akan diperhitungkan di kegiatan rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi-Modul Terhadap Bahaya Eksternal.

Sebagai panduan internasional, dokumen SSG-4 Rev. 1 tidak bersifat mengikat secara hukum, tetapi telah menjadi rujukan utama dalam pengembangan kerangka regulasi nasional di banyak negara. Keberadaannya mendukung implementasi Konvensi Keselamatan Nuklir, serta memberikan kerangka yang selaras bagi negara-negara anggota untuk memastikan tingkat perlindungan terhadap radiasi yang optimal.

PSA Level 2 adalah komponen integral dari strategi keselamatan PLTN modern. Dengan analisis yang mendalam terhadap progresi kecelakaan parah dan potensi pelepasan radioaktif, PSA ini memperkuat fondasi pertahanan berlapis (*defence-in-depth*) dan memungkinkan pengambilan keputusan berbasis risiko yang

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 56 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

lebih akurat. Panduan SSG-4 Rev. 1 tidak hanya meningkatkan ketahanan instalasi nuklir terhadap kecelakaan parah, tetapi juga memperkuat kepercayaan publik dan komunitas internasional terhadap teknologi nuklir yang aman dan bertanggung jawab.

2.4.10. IAEA SSG-12 Licensing Process for Nuclear Installations

Keselamatan dalam penggunaan energi nuklir bukan hanya permasalahan teknis, namun juga menyangkut tata kelola dan kepastian hukum. Dalam konteks inilah dokumen SSG-12 dari IAEA hadir sebagai panduan internasional yang memberikan kerangka kerja proses perizinan instalasi nuklir secara komprehensif, dari tahap pemilihan lokasi hingga pembebasan dari pengawasan regulasi.

Proses perizinan instalasi nuklir merupakan mekanisme utama bagi badan pengawas untuk menetapkan kendali regulasi terhadap semua aktivitas yang terkait dengan risiko radiasi. Tujuannya adalah untuk menjamin bahwa setiap tahap dalam siklus hidup instalasi nuklir, mulai dari evaluasi tapak, desain, konstruksi, komisioning, operasi, hingga dekomisioning dilaksanakan dengan tingkat keselamatan yang setinggi mungkin.

SSG-12 menekankan bahwa proses perizinan harus, transparan dan dapat diprediksi, berdasarkan pada prinsip kehati-hatian dan tanggung jawab utama pemegang izin terhadap keselamatan, mengintegrasikan pendekatan keselamatan dan keamanan, memberikan ruang partisipasi publik, menerapkan pendekatan bertingkat (*graded approach*) berdasarkan tingkat risiko kegiatan atau fasilitas. Selain itu SSG-12 ini juga bisa digunakan sebagai referensi untuk menentukan perizinan PLTN Multi-Modul.

Izin dapat dikeluarkan untuk tahap spesifik (misalnya konstruksi atau operasi), untuk jangka waktu tertentu, atau bahkan dalam bentuk Izin gabungan dengan kondisi ketat. Fleksibilitas ini memungkinkan pengaturan yang efisien sesuai

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 57 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

kerangka hukum dan kebutuhan nasional masing-masing negara. Dokumen SSG-12 mengidentifikasi tujuh tahap utama dalam proses perizinan adalah sebagai berikut.

- 1) Evaluasi Tapak: Meliputi studi geologi, seismik, hidrologi, serta potensi dampak radiasi pada lingkungan dan masyarakat;
- 2) Desain: Penilaian terhadap desain teknis, sistem proteksi, dan kesiapan menghadapi kecelakaan;
- 3) Konstruksi: Memastikan semua pekerjaan sesuai dengan standar teknis dan lisensi yang berlaku;
- 4) Komisioning: Uji coba sistem sebelum beroperasi penuh untuk menjamin kinerja sesuai desain;
- 5) Operasi: Pengawasan berkala dan audit keselamatan secara berkelanjutan;
- 6) Dekomisining: Penonaktifan instalasi secara aman;
- 7) Pembebasan dari Pengawasan Regulasi: Ketika instalasi tidak lagi menimbulkan risiko radiasi yang signifikan.

Setiap tahap dapat memiliki *hold points* atau titik persetujuan yang mengharuskan persetujuan Badan Pengawas sebelum kegiatan dapat dilanjutkan.

Dokumen ini juga menyarankan pendekatan alternatif seperti, *early site permit*, yaitu izin lokasi yang dikeluarkan sebelum desain instalasi difinalisasi. *Certified standard design*, yaitu sertifikasi desain standar sebelum aplikasi lisensi spesifik. Dan *Combined licence*, yaitu penggabungan proses lisensi konstruksi, komisioning, dan operasi dalam satu dokumen. Fleksibilitas ini membantu negara dengan pengalaman nuklir untuk mempercepat pengembangan instalasi baru tanpa mengurangi aspek keselamatan.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 58 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

BAB III

PEMBAHASAN

3.1 Evaluasi Potensi Bahaya Geoteknik

Evaluasi karakteristik geoteknik untuk tapak PLTN dilaksanakan terhadap perilaku material fondasi dan potensi bahaya geoteknik. Potensi bahaya geoteknik meliputi: ketidakstabilan lereng, runtuh, amblesan, penurunan atau terangkatnya permukaan tapak, dan likuifaksi. Selain itu penentuan nilai parameter dasar desain yang dilakukan untuk meminimalkan potensi kejadian bahaya geoteknik yang dapat membahayakan keselamatan PLTN.

3.1.1 Likuifaksi Tanah Di Lokasi Instalasi Nuklir

Likuifaksi tanah harus dijelaskan secara lengkap menggunakan definisi perilaku tanah dan kondisi pembebanan. Hal ini menjadi dasar penilaian rekayasa untuk lokasi instalasi nuklir. Dasar tersebut harus ditetapkan dengan tingkat kinerja yang dapat diterima.

Skenario desain seismik paling signifikan yang diadopsi untuk penilaian likuifaksi mungkin tidak selalu sama dengan yang digunakan untuk penilaian sistem struktur di atasnya. Peristiwa seismik yang jauh tetapi bermagnitudo lebih besar dengan intensitas lebih rendah tetapi durasi lebih lama mungkin lebih signifikan terhadap respons likuifaksi.

Prosedur penilaian rekayasa likuifaksi harus diikuti untuk kejadian eksternal di luar dasar desain, di mana tingkat masukan seismik dipilih untuk periode ulang yang melebihi tingkat SL-2 bahaya gerakan tanah akibat getaran seismik. Kinerja komponen-komponen penting untuk keselamatan selama dan setelah kejadian eksternal di luar dasar desain harus dievaluasi berdasarkan kriteria penerimaan yang telah ditentukan sebelumnya untuk menghindari efek tepi tebing.

Daftar data berikut relevan diperlukan untuk penilaian teknik likuifaksi:

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 59 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

- a) Data kinerja historis. Data yang tersedia untuk tanah dengan sifat yang identik atau serupa dengan yang ada di lokasi harus dikompilasi dan dipelajari. Selain itu, jika tersedia, kinerja siklus lokasi selama dan setelah kejadian gempa bumi historis harus didokumentasikan;
- b) Profil tanah. Profil tanah representatif rinci yang menunjukkan karakteristik stratigrafi setiap lapisan dengan penekanan khusus pada variabilitas spasialnya;
- c) Rezim air tanah. Data piezometrik dan/atau muka air sumur bor harus digunakan untuk menentukan permukaan freatik. Fluktuasi musiman dan situasional pada permukaan freatik harus dipertimbangkan secara konservatif dalam penilaian. Selain itu, data pompa sumur bor dan/atau uji penetrasi kerucut dengan pengukuran tekanan air pori dapat digunakan untuk menentukan parameter permeabilitasnya;
- d) Sifat indeks. Untuk campuran tanah berbutir kasar, saringan dan sedimentasi, uji difraksi laser dan/atau hidrometer harus dilakukan pada sampel tanah untuk menilai karakteristik ukuran butir. Sampel harus dikumpulkan untuk secara akurat menggambarkan variabilitas spasial kondisi tanah lokasi. Selain persentase butiran halus dan batas konsistensinya, ukuran butir rata-rata, koefisien keseragaman, densitas relatif, dan berat jenis merupakan sifat penting tambahan yang berguna untuk penilaian rekayasa likuifaksi;
- e) Uji penetrasi standar. Terdapat variabilitas yang signifikan dalam peralatan yang digunakan, dan prosedur serta protokol yang diadopsi, untuk uji penetrasi standar. Untuk meminimalkan variabilitas ini, pengujian tersebut harus dilakukan sesuai dengan metodologi pengujian standar. Selain itu, untuk memungkinkan pelaksanaan koreksi pengujian, detail peralatan harus didokumentasikan secara lengkap. Sistem palu uji penetrasi standar yang terkalibrasi harus digunakan atau pengukuran energi gelombang tegangan langsung harus dilakukan di tempat sesuai dengan metodologi pengujian standar. Jumlah pukulan lapangan harus dikoreksi untuk mempertimbangkan variabilitas dalam prosedur yang

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 60 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

diikuti, peralatan yang digunakan, dan kondisi tegangan. Dengan mempertimbangkan variabilitas spasial dari jumlah pukulan uji penetrasi standar, jumlah pukulan representatif deterministik atau probabilistik harus ditentukan. Jika terdapat lapisan tanah berkerikil, hasil uji penetrasi besar, uji penetrasi Becker, atau pengukuran gelombang geser harus digunakan untuk penilaian;

- f) Uji penetrasi kerucut. Uji penetrasi kerucut memiliki keunggulan dibandingkan uji penetrasi standar karena menghasilkan profil tanah yang kontinu, sehingga memungkinkan penilaian yang lebih baik tentang luas lapisan tanah yang dapat terlikuifaksi. Namun, kecuali sistem yang disesuaikan digunakan, peralatan uji penetrasi kerucut konvensional tidak memungkinkan pengambilan sampel tanah, sehingga klasifikasi tanah harus dikembangkan berdasarkan data gesekan selongsong dan resistansi ujung kerucut. Selain itu, daya tembus menurun seiring dengan meningkatnya kepadatan dan ukuran butiran tanah, yang mungkin membatasi penggunaannya pada tanah berkerikil dan/atau tanah berpasir tersementasi. Dalam kondisi ini, uji penetrasi standar dan uji penetrasi kerucut harus dilakukan secara bersamaan atau dikombinasikan dengan pengeboran. Untuk penilaian yang andal, peralatan dan sensor uji penetrasi kerucut yang terkalibrasi harus digunakan;
- g) Pengukuran kecepatan gelombang geser (V_s). Pengukuran tersebut merupakan alat pelengkap untuk penilaian pemicu likuifaksi. Terdapat berbagai teknik pengukuran V_s dengan tingkat akurasi yang berbeda. Pengukuran *downhole* dan *cross-hole* meliputi pengeboran lubang bor dan pengambilan sampel. Teknik pengukuran permukaan non-invasif juga dapat dipertimbangkan tetapi hanya memberikan nilai rata-rata V_s per lapisan profil tanah. Sistem uji penetrasi kerucut seismik juga dapat dipertimbangkan untuk mengumpulkan data uji penetrasi kerucut dan V_s secara bersamaan, yang dapat memungkinkan penilaian berbasis V_s dan penetrasi kerucut. Jika

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 61 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

memungkinkan, beberapa metode berbasis data uji lapangan yang independen harus digunakan untuk mengurangi ketidakpastian epistemik dalam prediksi pemicu likuifaksi;

- h) Kepadatan relatif. Kepadatan relatif in situ tanah tanpa kohesi harus dievaluasi berdasarkan jumlah pukulan uji penetrasi standar dan/atau resistansi ujung kerucut uji penetrasi kerucut dari korelasi yang dibenarkan dibandingkan dengan estimasi dari pengambilan sampel tak terganggu. Sebaliknya, sampel tanah bersih (kandungan butiran halus < 5%) pada kepadatan relatif target dapat langsung direkonstitusi di laboratorium, setelah memperkirakan rasio pori minimum dan maksimum, yang metode pengujiannya terstandarisasi tersedia;
- i) Kuat geser siklik tak terdrainase. Kuat geser siklik tak terdrainase tanah dapat dievaluasi secara langsung melalui uji pembebanan siklik yang dilakukan di laboratorium pada sampel tanah tak terganggu atau terrekonstitusi. Uji geser sederhana siklik, geser torsional, dan triaksial beserta model sentrifus umumnya digunakan dalam praktik rekayasa untuk mengevaluasi respons siklik tak terdrainase tanah. Kualitas sampel tak terganggu atau metode penyiapan sampel untuk uji laboratorium secara signifikan memengaruhi respons likuifaksi, dan oleh karena itu harus dipertimbangkan dalam interpretasi hasil penilaian. Alternatif untuk penilaian berbasis laboratorium adalah metode semi-empiris berbasis riwayat kasus untuk evaluasi ketahanan likuifaksi, dan kekuatan geser pasca-likuifaksi, yang disajikan sebagai fungsi dari tegangan pengekanan efektif dan ketahanan penetrasi;
- j) Ketergantungan regangan pada sifat-sifat tanah. Untuk analisis dinamis lanjutan, untuk setiap lapisan tanah diperlukan untuk menggambarkan degradasi modulus geser dan peningkatan rasio redaman yang tampak dengan meningkatnya tingkat regangan geser, masing-masing;

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 62 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

- k) Sifat-sifat tanah tambahan. Parameter tambahan (misalnya rasio Poisson, parameter tanah kondisi kritis) mungkin diperlukan sebagai bagian dari penilaian yang lebih lanjut;
- l) Parameter desain seismik. Data minimum magnitudo momen dan percepatan tanah puncak dipasangkan dalam penilaian bahaya seismik deterministik. Sebagai alternatif, tingkat percepatan tanah puncak dipisahkan untuk bin magnitudo momen, atau tingkat percepatan tanah puncak dikoreksi ke peristiwa magnitudo referensi (durasi) sebagai bagian dari penilaian bahaya seismik probabilistik diperlukan;
- m) Durasi gerakan tanah. Jumlah siklus tegangan seragam ekuivalen yang sesuai dengan magnitudo peristiwa desain seismik diperlukan. Magnitudo peristiwa seismik dapat umumnya digunakan untuk menilai durasi permintaan seismik dengan asumsi bahwa durasi gerakan tanah dapat dikorelasikan sebagai perkiraan pertama terhadap jumlah siklus gempa bumi;
- n) Rasio tegangan siklik. Rasio tegangan siklik terinduksi pada kedalaman yang diinginkan — yang dapat diperkirakan melalui analisis respons lokasi seismik atau melalui prosedur yang disederhanakan menggunakan faktor partisipasi massa tanah berbasis respons lokasi — harus dievaluasi;
- o) Ketahanan siklik berbasis laboratorium. Untuk penilaian berbasis laboratorium, rasio tegangan siklik versus jumlah kurva siklus tegangan ekuivalen yang sesuai dengan pemicu likuifaksi harus dikembangkan;
- p) Koreksi kondisi laboratorium-lapangan. Seperangkat faktor koreksi untuk memperhitungkan perbedaan antara kondisi laboratorium dan kondisi lapangan harus dikembangkan dan dijustifikasi;
- q) Parameter riwayat tambahan. Parameter ini (misalnya riwayat waktu dasar desain) mungkin diperlukan untuk penilaian yang lebih kompleks.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 63 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Selain data relevan yang sudah disebutkan diatas, penilaian rekayasa likuifaksi minimal harus mencakup beberapa langkah evaluasi rekayasa sebagai berikut:

1) Kerentanan dan pemicu likuifaksi;

a. Kerentanan likuifaksi

Sebagai bagian dari penilaian kerentanan, pasir bersih yang jenuh penuh, kerikil bersih, lanau non-plastis, dan campurannya harus dianggap rentan terhadap likuifaksi. Pasir atau kerikil bersih didefinisikan sebagai tanah dengan kandungan butiran halus kurang dari 5%. Luas lateral lapisan tanah yang rentan harus dikonfirmasi dan dipelajari dalam konteks stratigrafi secara keseluruhan.

Campuran pasir dan/atau kerikil dengan butiran halus plastis juga harus dinilai kerentanannya. Untuk penilaian kerentanan campuran tanah berbutir halus plastis, ukuran butir, distribusi butir, batas konsistensi, dan data pembangkitan tekanan pori yang telah dinilai secara eksperimental dapat digunakan. Jika tanah dinyatakan rentan, penilaian pemicu likuifaksi harus dilakukan.

b. Pemicu likuifaksi

Sebagai bagian dari penilaian pemicu likuifaksi, tiga pendekatan berbeda digunakan:

- Pendekatan semi-empiris berbasis riwayat kasus;
- Pendekatan analitis;
- Pendekatan numerik berbasis model konstitutif lanjutan.

Umumnya, solusi batas bawah dapat dihitung dalam ketiga pendekatan penilaian rekayasa likuifaksi dengan menggunakan asumsi konservatif untuk parameter profil desain. Untuk pasir lepas, sedikit peningkatan tegangan seismik dapat menyebabkan tanah menjadi tidak stabil, dengan kemungkinan deformasi yang besar, sementara pada pasir sedang hingga padat, bahkan peningkatan tegangan seismik yang besar mungkin hanya menghasilkan deformasi yang

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 64 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

terbatas, bahkan jika penumpukan tekanan pori mencapai 100%. Oleh karena itu, efek tepi tebing perlu dipertimbangkan.

Untuk penilaian deterministik, faktor keamanan terhadap pemicu likuifaksi harus lebih besar dari nilai batas yang dipertimbangkan untuk perhitungan dan harus konsisten dengan metode yang digunakan. Untuk penilaian probabilistik, frekuensi ambang batas pemicu likuifaksi yang cukup rendah harus ditetapkan untuk memenuhi target kinerja.

Memenuhi faktor keamanan minimum atau probabilitas tahunan pemicu likuifaksi mungkin tidak menjamin kinerja perpindahan atau deformasi yang dapat diterima. Dengan demikian, penilaian rekayasa likuifaksi lainnya harus dilakukan secara independen dari hasil evaluasi pemicu likuifaksi.

Ketika terdapat kondisi yang dapat dicairkan di dalam suatu lapisan tanah, volumenya harus diperkirakan menggunakan profil resistensi yang diukur secara in situ. Distribusi tingkat yang dapat dicairkan ini, konfigurasi, jaraknya, sambungan hidrolik, kontras permeabilitas, dan kedekatan batas drainase harus dipertimbangkan dalam penilaian pemicu likuifaksi. Jika data tidak memiliki detail yang memadai, seluruh lapisan harus dianggap dapat terlikuifaksi.

Penilaian pemicu likuifaksi harus mempertimbangkan muka air tanah yang harus didefinisikan dari pengukuran piezometrik dan harus memperhitungkan fluktuasi air tanah.

Pendekatan semi-empiris berbasis riwayat kasus

Pendekatan semi-empiris didasarkan pada penilaian deterministik atau probabilistik terhadap riwayat kasus pemicu likuifaksi dari peristiwa historis, di mana istilah kapasitas versus permintaan dipilih sebagai parameter uji in situ (misalnya, penetrasi standar ternormalisasi pada perhitungan uji tiup, perhitungan uji penetrasi kerucut ternormalisasi, perhitungan uji penetrasi Becker ternormalisasi, kecepatan gelombang geser ternormalisasi) versus rasio tegangan siklik ternormalisasi. Penggunaan pendekatan semi-empiris ini melibatkan magnitudo momen gempa,

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 65 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

kandungan butiran halus, faktor partisipasi massa geser non-linier dan beberapa parameter dasar tanah (misalnya, berat satuan, ukuran butir, batas konsistensi).

Pendekatan analitis

Pendekatan analitis untuk penilaian pemicu likuifaksi harus terdiri atas dari langkah-langkah berikut:

- (1) Memilih serangkaian akselerogram representatif, yang konsisten dengan skenario desain seismik, pada lokasi batuan referensi singkapan;
- (2) Mendekonvolusi atau mengonvolusi gerakan permukaan referensi singkapan menjadi gerakan pada kedalaman yang diinginkan dan memperkirakan riwayat tegangan geser siklik terinduksi melalui serangkaian analisis respons lokasi;
- (3) Mengonversi jumlah siklus riwayat tegangan-waktu transien menjadi siklus tegangan seragam yang ekuivalen;
- (4) Mengembangkan rasio resistansi siklik versus jumlah kurva siklus tegangan seragam yang ekuivalen melalui serangkaian uji laboratorium siklik;
- (5) Menilai respons pemicu likuifaksi dengan membandingkan tegangan siklik terinduksi dengan resistansi siklik yang sesuai dengan jumlah siklus tegangan seragam ekuivalen yang diperkirakan sebelumnya.

Pendekatan numerik berbasis model konstitutif lanjutan

Model konstitutif yang tervalidasi dan terkalibrasi, yang mampu memodelkan respons regangan besar siklik pada tanah yang sepenuhnya jenuh, dimasukkan ke dalam analisis langkah waktu non-linier untuk secara langsung menilai penumpukan tekanan pori dan respons seismik secara keseluruhan. Sebagai bagian dari penilaian ini, analisis berbasis tegangan, domain waktu, terkopel atau terdekopel yang efektif biasanya dilakukan untuk mensimulasikan perubahan regangan dan waktu yang bergantung pada kekakuan dan kekuatan tanah seiring dengan penumpukan tekanan pori. Permulaan pemicu likuifaksi dapat diidentifikasi secara langsung di bawah pembebanan siklik yang ditentukan oleh serangkaian gerakan input yang digunakan. Namun, hasilnya mungkin sangat bervariasi karena

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 66 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

penggunaan gerakan input yang berbeda, model konstitutif yang berbeda, dan/atau serangkaian parameter model konstitutif yang berbeda. Analisis dinamis lanjutan memerlukan kalibrasi banyak parameter yang sulit diidentifikasi dalam aplikasi rutin. Oleh karena itu, hasilnya harus dikalibrasi dengan evaluasi berbasis riwayat kasus dan harus mempertimbangkan ketidakpastian dalam parameter yang digunakan.

1) Kekuatan sisa pasca-likuifaksi dan stabilitas keseluruhan pasca-likuifaksi;

Jika disimpulkan bahwa tanah dapat mengalami likuifaksi selama kejadian seismik dasar desain, penilaian kekuatan sisa pasca-likuifaksi dan stabilitas keseluruhan pasca-likuifaksi harus dilakukan, dengan mempertimbangkan ketidakpastian yang terkait dengan parameter dan metodologi yang digunakan. Penilaian berbasis model konstitutif semi-empiris, analitis, dan terkalibrasi juga dapat digunakan untuk menilai kekuatan sisa pasca-siklus. Penilaian stabilitas pasca-likuifaksi harus mencakup potensi kegagalan yang berlaku, termasuk stabilitas lereng, daya dukung, pengangkatan, longsor dan tumbang, dan lainnya jika relevan. Penilaian ini juga harus mempertimbangkan gempa susulan selama fase transisi dan semua perubahan kondisi tanah setelah guncangan utama, jika berlaku.

Jika stabilitas keseluruhan pasca-likuifaksi tidak dapat dijamin, solusi mitigasi harus direkayasa dan diterapkan terhadap likuifaksi tanah. Dalam evaluasi stabilitas keseluruhan, faktor keamanan dan/atau tingkat kinerja perpindahan dan deformasi yang dapat diterima harus dipilih agar sesuai dengan kondisi pembebanan jangka pendek.

2) Deformasi dan perpindahan akibat likuifaksi;

Ketika stabilitas keseluruhan tercapai, deformasi dan perpindahan akibat siklus harus dievaluasi. Penurunan diferensial pasca-likuifaksi dan ketidakpastian terkaitnya harus dinilai.

3) Konsekuensi deformasi dan perpindahan akibat likuifaksi;

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 67 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Konsekuensi dari deformasi dan perpindahan akibat likuifaksi juga harus dinilai. Deformasi dan perpindahan tersebut harus memenuhi kriteria kinerja yang dapat diterima. Tingkat kinerja yang dapat diterima dalam hal menjaga kemampuan perbaikan, mengurangi kerusakan keseluruhan, mempertahankan kemudahan servis, dan/atau meminimalkan durasi non-operasional harus ditetapkan.

4) Mitigasi yang direkayasa (jika diperlukan).

Jika deformasi dan perpindahan akibat siklis tidak berada dalam tingkat kinerja yang dapat diterima, solusi mitigasi harus direkayasa dan diimplementasikan.

Mitigasi teknis terhadap bahaya likuifaksi yang tidak dapat diterima harus dilakukan berdasarkan keterapan, efektivitas, kemampuan untuk memverifikasi keandalan mitigasi yang dicapai, persyaratan peraturan, dan pertimbangan lainnya.

3.1.2. Peluang Likuifaksi Tanah Di Lokasi Instalasi Nuklir

Nilai peluang likuifaksi mengganggu aliran listrik di gardu induk juga bersifat *site specific* dan tergantung pada banyak parameter geoteknik dan seismik. Berikut faktor-faktor yang menentukan peluang likuifaksi dan dampaknya terhadap Gardu Induk Instalasi Nuklir:

1) Kondisi Tanah di Lokasi Gardu

Tanah berpasir lepas (*loose sandy soil*), jenuh air, dan dangkal sangat rentan terhadap likuifaksi. Selain itu lokasi dekat pantai, sungai, atau rawa juga sangat berisiko.

2) Tingkat Kegempaan (PGA atau MMI)

Pada umumnya, likuifaksi berpotensi terjadi jika percepatan gempa > **0.15g**. selain itu wilayah zona merah gempa seperti Sumatera, Sulawesi, Papua mempunyai peluang yang lebih tinggi.

3) Kedalaman Air Tanah

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 68 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Untuk kedalaman permukaan air tanah < 10 meter sangat mendukung terjadinya likuifaksi.

4) Desain Struktur Gardu

Struktur Gardu listrik dengan pondasi dangkal (*shallow foundation*) sangat rentan rusak karena penurunan atau kemiringan tanah.

3.1.3. Probabilitas Likuifaksi Dapat Mengganggu Gardu Induk

Dengan menggunakan pendekatan *Probabilistic Seismic Hazard Assessment* (PSHA) dan *fragility curves*, dapat diperoleh nilai peluang likuifaksi dapat mengganggu kinerja dari gardu induk. Tabel berikut dibawah ini menunjukkan nilai peluang likuifaksi mengganggu kinerja Gardu induk:

Tabel 3.1 Peluang Terjadinya Likuifaksi

Kondisi Lokasi Gardu	Probabilitas Likuifaksi Terjadi per Tahun	Probabilitas Gangguan Listrik (jika likuifaksi terjadi)
Tanah stabil (non-pasir), jauh dari zona gempa	$< 10^{-5}$	$< 1\%$
Tanah pasir jenuh, PGA < 0.2g	$10^{-4} - 10^{-3}$	10–30%
Tanah jenuh, kedalaman air tanah < 5 m, PGA > 0.3g	$10^{-3} - 10^{-2}$	40–80%
Lokasi dengan riwayat likuifaksi (misal Palu, Banten, Padang)	$> 10^{-2}$	> 80% jika tanpa mitigasi

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 69 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Peluang gangguan listrik tersebut bisa mencakup kerusakan fisik, hilangnya fungsi kontrol, atau gangguan pada koneksi *grounding*. Selain itu Peluang akan lebih tinggi jika tidak ada perkuatan struktur seperti *soil improvement*, pondasi dalam (tiang pancang), atau sistem anti-likuifaksi lainnya.

Berdasarkan nilai di Tabel diatas, maka nilai Total probabilitas dapat dihitung sebagai berikut: Total probabilitas gangguan tahunan = Probabilitas likuifaksi × Probabilitas gangguan akibatnya. Misal untuk daerah dengan riwayat likuifaksi seperti daerah Banten bisa diperoleh = $10^{-2} \times 0.8 = 8 \times 10^{-3}$ per tahun, nilai ini cukup tinggi untuk sebuah fasilitas yang kritis.

3.1.4. Studi Kasus Referensi

Beberapa studi kasus menunjukkan likuifaksi bisa mengakibatkan gardu induk rusak dan tidak bisa berfungsi dengan baik. Gempa bumi di Palu pada tahun 2018 mengakibatkan gardu induk dan infrastruktur transmisi rusak parah akibat likuifaksi. Selain itu gempa bumi di Christchurch Selandia Baru pada tahun 2011 mengakibatkan distribusi listrik dari gardu induk terganggu karena pergeseran tanah dan penurunan fondasi akibat likuifaksi.

3.1.5. Rekomendasi Mitigasi

Beberapa tindakan yang bisa dilakukan untuk memitigasi pengaruh likuifaksi terhadap kerusakan gardu induk listrik adalah sebagai berikut.

- 1) Perlu dilakukan Investigasi Geoteknik Mendalam sebelum pembangunan gardu induk listrik;
- 2) Perlu dilakukan tindakan *Soil improvement* (seperti *vibro compaction*, *grouting*, *stone columns*);
- 3) Perlu menggunakan pondasi dalam (tiang pancang) ke lapisan tanah keras dalam pembuatan pondasi untuk gardu induk listrik;
- 4) Perlu dilakukan monitoring air tanah dan *warning system* berbasis sensor seismik;

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 70 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

- 5) Perlu dibuat redundansi sistem distribusi, agar kegagalan 1 gardu tidak mematikan seluruh wilayah;

3.1.6. Kesimpulan

- 1) Nilai Probabilitas tahunan gangguan akibat likuifaksi di gardu induk bisa mencapai 10^{-3} hingga $>10^{-2}$, tergantung lokasi dan mitigasi yang dilakukan;
- 2) Di daerah rawan likuifaksi tanpa perkuatan, risikonya cukup tinggi untuk diklasifikasikan sebagai "Design Basis Event" dalam sistem kelistrikan sangat penting.

3.2. Evaluasi Potensi Bahaya Vulkanologi

Peristiwa vulkanik dapat menimbulkan bahaya yang signifikan bagi instalasi nuklir. Bahaya vulkanik muncul dari fenomena yang memiliki berbagai karakteristik fisik. Fenomena ini dapat terjadi secara terpisah, atau dikombinasikan dengan fenomena lain, bahkan selama letusan gunung berapi tunggal. Beberapa fenomena ini dapat terjadi jauh sebelum atau lama setelah letusan. Oleh karena itu, istilah 'kejadian gunung berapi' diadopsi untuk menunjukkan serangkaian fenomena berbahaya yang mungkin terjadi sebelum, selama, atau setelah letusan gunung berapi. Peristiwa gunung meletus jarang terjadi, dibandingkan dengan sebagian besar peristiwa alam lainnya yang dapat mempengaruhi keselamatan dan kinerja instalasi nuklir.

Beberapa gunung berapi meletus setelah tidak aktif selama ribuan tahun, atau bahkan lebih lama lagi. Sebagai panduan umum, gunung berapi yang telah meletus selama 10.000 tahun terakhir biasanya dianggap aktif. Di seluruh dunia, terdapat lebih dari 1500 gunung berapi yang dapat dianggap aktif atas dasar ini. Gunung-gunung berapi ini secara resmi disebut sebagai gunung berapi Holosen, yaitu gunung berapi yang telah meletus dalam 10.000 tahun terakhir. Gunung berapi Holosen dapat meletus setelah lama tidak aktif.

Beberapa gunung berapi telah aktif kembali setelah periode tidak aktif lebih

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 71 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

dari 10.000 tahun. Banyak gunung berapi yang belum dipelajari secara cukup rinci untuk mengetahui secara pasti apakah mereka meletus selama Holosen atau tidak. Oleh karena itu, pertimbangan bahaya gunung berapi tidak hanya terbatas pada gunung berapi yang diketahui pada masa Holosen.

Bahaya gunung api dari beberapa produk yang dihasilkan oleh letusannya meliputi: abu tephra, misil, gas gunung api, lahar, tsunami dengan gelombang tegak dan fenomena atmosfer. Terkait bahaya eksternal aspek kegunungapian, desain multi-modul dalam hal ini harus mempertimbangkan potensi bahaya spesifik kegunungapian yang dapat berdampak terhadap beberapa atau seluruh modul dalam tapak. Desain multi-modul juga harus mempertimbangkan bahaya yang menyebabkan merembetnya kecelakaan dalam satu modul ke modul lainnya akibat dari potensi dampak penyebab umum terutama apabila terdapat SSK yang digunakan bersama.

Perka Bapeten Nomor 3 Tahun 2011 dalam hal ini mengatur terkait bahaya eksternal dan bahaya internal pada pasal 26. Pada pasal ini, bahaya internal dan eksternal yang mempengaruhi keselamatan reaktor daya harus dipertimbangkan dalam menyusun kejadian awal terpostulasi (PIE). Dalam hal ini, pengaturan terkait bahaya internal dan eksternal belum menyatakan urgensi dampak bahaya eksternal ke desain multi-modul.

Persyaratan teknis keselamatan desain secara umum diatur dalam Perka Bapeten Nomor 3 Tahun 2011 tentang Ketentuan Keselamatan Desain Reaktor Daya. Peraturan ini mengatur tentang detail persyaratan keselamatan yang sebelumnya diatur dalam PP Nomor 54 Tahun 2012 Tentang Keselamatan dan Keamanan Instalasi Nuklir untuk reaktor daya. Peraturan ini berlaku untuk reaktor daya yang dibangun di daratan termasuk reaktor daya yang didesain untuk memanfaatkan produksi panas.

Desain multi-modul harus mempertimbangkan potensi bahaya baik internal maupun eksternal yang dapat menimbulkan dampak pada beberapa atau semua

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 72 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

unit secara bersamaan. Terkait bahaya eksternal, desain juga harus menyediakan fitur yang meminimalkan interaksi antara bangunan yang berisi SSK penting untuk keselamatan. Selain itu, ketentuan keandalan desain struktur, sistem, dan komponen (SSK) dalam hal ini harus menerapkan redundansi, keragaman, kemandirian, dan desain gagal-selamat.

Dalam penjelasannya, desain dan tata letak sistem menggunakan pemisahan fisik sedapat mungkin untuk meningkatkan keyakinan bahwa kemandirian akan tercapai. Selain itu, pada pasal 47 yang berbunyi dalam hal struktur, sistem dan komponen yang penting untuk keselamatan digunakan pada lebih dari satu reaktor, desain harus menjamin struktur, sistem dan komponen tetap dapat melaksanakan fungsi keselamatan dalam kondisi instalasi.

3.2.1 Bahaya Abu Tephra Di Lokasi Instalasi Nuklir

Bahaya yang muncul akibat adanya abu Tephra meliputi, peningkatan beban statis pada struktur, terjadinya penyumbatan dan abrasi dalam sistem sirkulasi air, munculnya efek mekanik dan kimia pada sistem ventilasi, sistem kelistrikan, dan sistem instrumentasi dan kendali, serta penyebaran partikel di atmosfer.

Evaluasi bahaya abu Tephra untuk setiap gunung api sebagai sumber dapat dilakukan dengan menggunakan metode deterministik dan probabilistik. Metode deterministik digunakan untuk menentukan nilai ambang batas ketebalan maksimum dari endapan abu Tephra di tapak. Model numerik dapat digunakan untuk menentukan nilai ambang batas ketebalan maksimum dari endapan abu Tephra di tapak dengan mempertimbangkan jenis erupsi dan kondisi meteorologi. Karakteristik ukuran partikel (yaitu distribusi ukuran butir dan ukuran pecahan (*clast*) maksimum) dapat diperkirakan dari endapan ini. Metode probabilistik digunakan untuk menentukan distribusi frekuensi akumulasi abu Tephra di tapak. Dalam metode probabilistik digunakan teknik simulasi untuk abu Tephra dari setiap Gunung Api Sumber dengan mempertimbangkan variasi volume erupsi, tinggi kolom

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 73 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

erupsi, distribusi ukuran butir total dan distribusi kecepatan angin sebagai fungsi ketinggian dan parameter terkait. Berdasarkan hasil dari evaluasi bahaya ditentukan nilai parameter dasar desain yang meliputi akumulasi massa dan laju akumulasi abu Tephra yang digunakan untuk menentukan beban statis, dan distribusi ukuran butir abu Tephra yang digunakan untuk menentukan beban partikel di udara.

3.2.2 Bahaya gunung api dari produk abu Tephra Misil terhadap SSK yang digunakan bersama.

Evaluasi bahaya misil yang dihasilkan dari Gunung Api Sumber perlu mempertimbangkan lokasi Gunung Api Sumber, dan potensi magnitudo dan frekuensi erupsi eksplosif. Metode deterministik dan probabilistik digunakan untuk menentukan massa dan kecepatan maksimum misil yang mencapai tapak. Metode probabilistik digunakan untuk menentukan distribusi frekuensi akumulasi partikel yang disajikan dalam kurva bahaya. Berdasarkan hasil dari evaluasi bahaya ditentukan nilai parameter dasar desain yang berupa momentum misil dan distribusi frekuensi akumulasi partikel.

3.2.3 Bahaya gunung api dari produk gas gunung api terhadap SSK yang digunakan bersama.

Metode deterministik dan probabilistik digunakan untuk menentukan konsentrasi gas gunung api dan beban asam maksimum yang mencapai tapak. Metode probabilistik digunakan untuk menentukan distribusi frekuensi konsentrasi gas gunung api dan beban asam yang mencapai tapak. Evaluasi bahaya gas gunung api yang menggunakan metode deterministik dan probablistik dilakukan dengan pemodelan dispersi dan mempertimbangkan fluks gas potensial dalam sistem gunung api serta kondisi meteorologi dan topografi. Hasil pemodelan tersebut digunakan untuk menetapkan nilai konsentrasi dan distribusi frekuensi konsentrasi gas gunung api yang mencapai tapak.

3.2.4 Bahaya gunung api dari produk Lahar terhadap SSK yang digunakan bersama

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 74 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Evaluasi bahaya lahar untuk setiap Gunung Api Sumber dilakukan dengan menggunakan beberapa parameter sebagai berikut:

- 1) potensi magnitudo dan karakteristik aliran;
- 2) potensi perubahan sumber air, topografi, dan mekanisme aliran di sepanjang potensi jalur aliran antara wilayah Gunung Api Sumber dan tapak; dan
- 3) kondisi meteorologi pada wilayah Gunung Api Sumber dan pada sepanjang potensi jalur aliran.

Evaluasi bahaya lahar untuk setiap Gunung Api Sumber menggunakan Metode deterministik digunakan untuk menentukan nilai ambang batas parameter yang meliputi antara lain volume, kecepatan dan ketebalan maksimum endapan lahar di tapak. Penentuan nilai ambang batas parameter tersebut menggunakan informasi mengenai pengendapan lahar baik dari kejadian aktual, gunung api serupa, atau pemodelan lahar.

Metode probabilistik digunakan untuk menentukan kurva bahaya aliran ke tapak. Dalam metode probabilistik digunakan simulasi numerik untuk setiap Gunung Api Sumber dengan mempertimbangkan kisaran nilai dari parameter-parameter yang mempengaruhi laju lepasan dan geometri aliran.

Dalam evaluasi bahaya lahar dilakukan juga evaluasi terhadap aliran yang menghasilkan aliran lumpur (*mud flow*). Berdasarkan hasil dari evaluasi bahaya ditentukan nilai parameter dasar desain yang meliputi momentum tumbukan dan ketebalan endapan lahar di tapak.

3.2.5 Nilai peluang abu Tephra

Nilai peluang (probabilitas) abu tephra dari letusan gunung berapi mengganggu aliran listrik di gardu induk (substation) bergantung pada banyak faktor dan biasanya tidak dinyatakan dalam satu nilai pasti, melainkan dalam bentuk analisis risiko berdasarkan hal berikut.

1) Jarak gardu dari sumber erupsi (gunung berapi)

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 75 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Semakin dekat dengan gunung, semakin besar peluang terkena dampak tephra. Selain itu pada radius 10–30 km bisa memiliki peluang yang signifikan tergantung arah angin dan jenis letusan.

2) Jenis dan intensitas erupsi

Adanya erupsi eksplosif akan menciptakan kolom abu yang tinggi dan akan lebih banyak abu tephra yang dapat dihasilkan. Tingkat index dari ledakan gunung api dapat diukur dengan VEI (Volcanic Explosivity Index). Nilai VEI $\geq$ 4–5 menunjukkan nilai yang berisiko tinggi.

3) Arah dan kecepatan angin

Abu tephra dapat terbawa ratusan kilometer tergantung dari arah dan kecepatan angin yang dominan saat terjadinya erupsi.

4) Ketinggian dan struktur gardu induk

Struktur gardu induk yang terbuka rentan terhadap penumpukan abu tephra pada isolator dan peralatan yang ada. Sedangkan untuk struktur gardu tertutup atau dengan pelindung bisa lebih tahan.

5) Sifat abu vulkanik

Abu tephra yang bersifat konduktif (karena kelembapan tinggi atau kontaminasi) akan meningkatkan risiko loncatan listrik (*flashover*).

3.2.6 Beberapa studi kasus terkait abu tephra

Studi kasus yang dilakukan oleh USGS (*United States Geological Survey*) dan penelitian-penelitian lain tentang dampak abu vulkanik pada infrastruktur listrik menunjukkan:

- abu tephra dengan ketebalan >4 mm dan kondisi lembab bisa menyebabkan trip gardu karena gangguan isolasi dan;
- probabilitas gangguan meningkat tajam saat akumulasi abu melebihi 1–2 mm di peralatan terbuka, khususnya bila tidak segera dibersihkan.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 76 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

3.2.7 Perkiraan Probabilitas (berdasarkan literatur)

Jika dimodelkan secara kuantitatif dengan pendekatan *Probabilistic Safety Assessment* (PSA) atau *Probabilistic Risk Assessment* (PRA), berikut ini adalah nilai estimasi secara kasar untuk gardu dalam radius 30 km dari gunung api aktif.

Tabel 3.2 Probabilitas Gangguan Abu Thepra

Ketebalan abu	Kondisi cuaca	Probabilitas gangguan
< 1 mm	Kering	< 1%
1–3 mm	Lembab	5–20%
> 5 mm	Lembab	30–70%
> 10 mm	Basah	> 80%

Solusi untuk memitigasi gangguan abu tephra terhadap gardu induk bisa dilakukan dengan menggunakan penutup isolator atau penggunaan isolator tipe tertutup, dilakukan pembersihan rutin setelah hujan abu tephra, dilakukan monitoring ketebalan abu tephra secara real-time dan dilakukan Simulasi erupsi serta skenario dampak terhadap jaringan Listrik.

3.2.8 Nilai Probabilitas Abu Tephra mengganggu aliran listrik

Nilai peluang (probabilitas) abu tephra mengganggu aliran listrik di gardu induk bervariasi tergantung konteks lokal, namun berdasarkan studi dan data historis, probabilitas tahunan (*annual probability*) gangguan bisa diperkirakan dalam rentang berikut:

Tabel 3.3 Estimasi Probabilitas Tahunan Gangguan oleh Abu Tephra

Kondisi	Probabilitas Gangguan per Tahun
Gardu induk >100 km dari gunung aktif	$< 10^{-5}$ (sangat kecil)
Gardu induk dalam 50–100 km dari gunung aktif	$10^{-4} - 10^{-3}$
Gardu induk dalam 30–50 km, arah angin dominan	$10^{-3} - 10^{-2}$

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 77 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Gardu induk <30 km, arah angin dominan, gunung dengan VEI ≥ 4	$10^{-2} - 10^{-1}$ (signifikan)
Lokasi dengan riwayat hujan abu >5 mm	> 10^{-1} (tinggi)

Nilai probabilitas ini diperoleh dengan asumsi bahwa abu tephra mencapai gardu dan tidak dilakukan mitigasi seperti pembersihan cepat dan tidak menggunakan isolator yang tidak tertutup.

3.2.9 Kesimpulan

Nilai Probabilitas tahunan gangguan oleh abu tephra bisa mencapai 10^{-2} hingga $>10^{-1}$ jika: Gardu berada dekat (<30 km) dari gunung aktif, Arah angin mendukung, Abu ≥ 5 mm dan tidak ada mitigasi teknis.

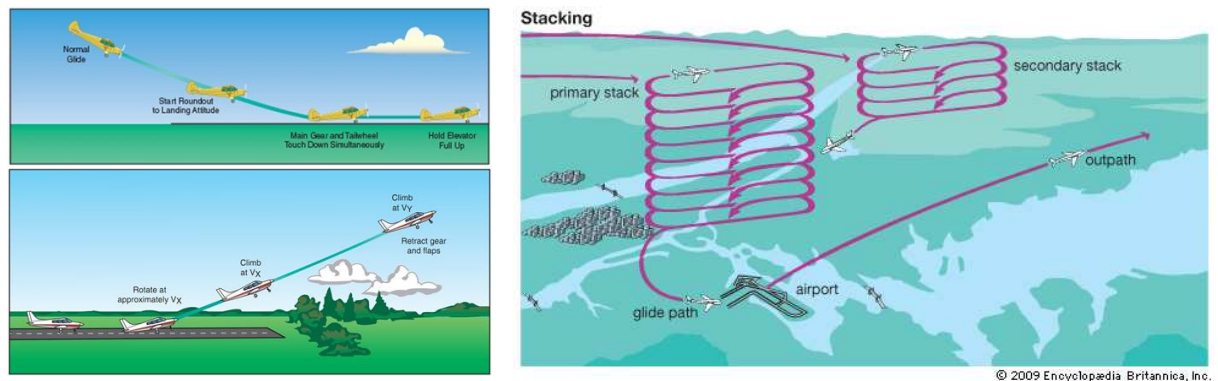
Untuk gardu yang jauh atau sudah dilengkapi mitigasi seperti isolator tertutup dan prosedur pembersihan cepat, probabilitas $< 10^{-4}$.

3.3. Evaluasi Potensi Bahaya KAUM/Jatuhnya pesawat terbang

Adanya kegiatan penerbangan di sekitar tapak serta koridor penerbangan di sekitar tapak dapat menimbulkan resiko kecelakaan jatuhnya pesawat terhadap calon tapak. Untuk itu, evaluasi terhadap kejadian jatuhnya pesawat terbang penting untuk dilakukan. Identifikasi sumber terkait kejadian jatuhnya pesawat terbang meliputi bandara kecil, bandara besar, pangkalan militer, jalur/koridor lalu lintas udara serta zona penerbangan. Kegiatan penerbangan terdiri atas kegiatan di sekitar bandara (lepas landas dan mendarat) dan kegiatan saat pesawat terbang di udara (fasa berputar-putar dan fasa terbang) seperti disajikan pada Gambar 3.1.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 78 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal



Gambar 3.1 Kegiatan penerbangan lepas landas, mendarat, dalam fasa berputar putar dan terbang.

3.3.1. Penapisan Pendekatan Jarak

Penapisan awal kejadian jatuhnya pesawat terbang dalam PerKa Nomor 6 Tahun 2008 untuk kejadian jenis 2 dan 3 dilakukan dengan menggunakan Nilai Jarak Penapisan, kriteria nilai tersebut dapat mengacu pada salah satu referensi berikut dengan pertimbangan yang dapat dipertanggungjawabkan.

Tabel 3.4 Kriteria Nilai Jarak Penapisan menurut [IAEA, NS-G.3.1]

Kriteria	IAEA
Bandara Kecil	10 km
Bandara Besar	$d < 16 \text{ km}$, jika frekuensi penerbangan $> 500d^2$
	$d > 16 \text{ km}$, jika frekuensi penerbangan $> 1000d^2$
Pangkalan Militer	30 km

Tabel 3.5 Kriteria Nilai Jarak Penapisan menurut [NUREG-0800]

Kriteria	NUREG-0800
A (Bandara)	d antara 8-16 km, jika frekuensi penerbangan $> 500d^2$

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 79 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

	$d > 16 \text{ km}$, jika frekuensi penerbangan $> 1000d^2$
B (Pangkalan Militer)	8 km
C (Koridor penerbangan, dan jalur lepas landas)	3,2 km

Nilai d adalah jarak yang terukur antara tapak dengan bandara (dalam km).

Apabila tapak berada di dalam Nilai Jarak Penapisan maka evaluasi tingkat kebolehjadian penapisan jatuhnya pesawat perlu dilakukan. Pendekatan perhitungan frekuensi kejadian jatuhnya pesawat terbang didasarkan pada statistik lalu lintas yang berlaku di lokasi. Untuk setiap kasus statistik lalu lintas udara, jenis pesawat terbang serta beban kelas penerbangannya perlu dipertimbangkan.

3.3.2. Penapisan Pendekatan Probabilistik

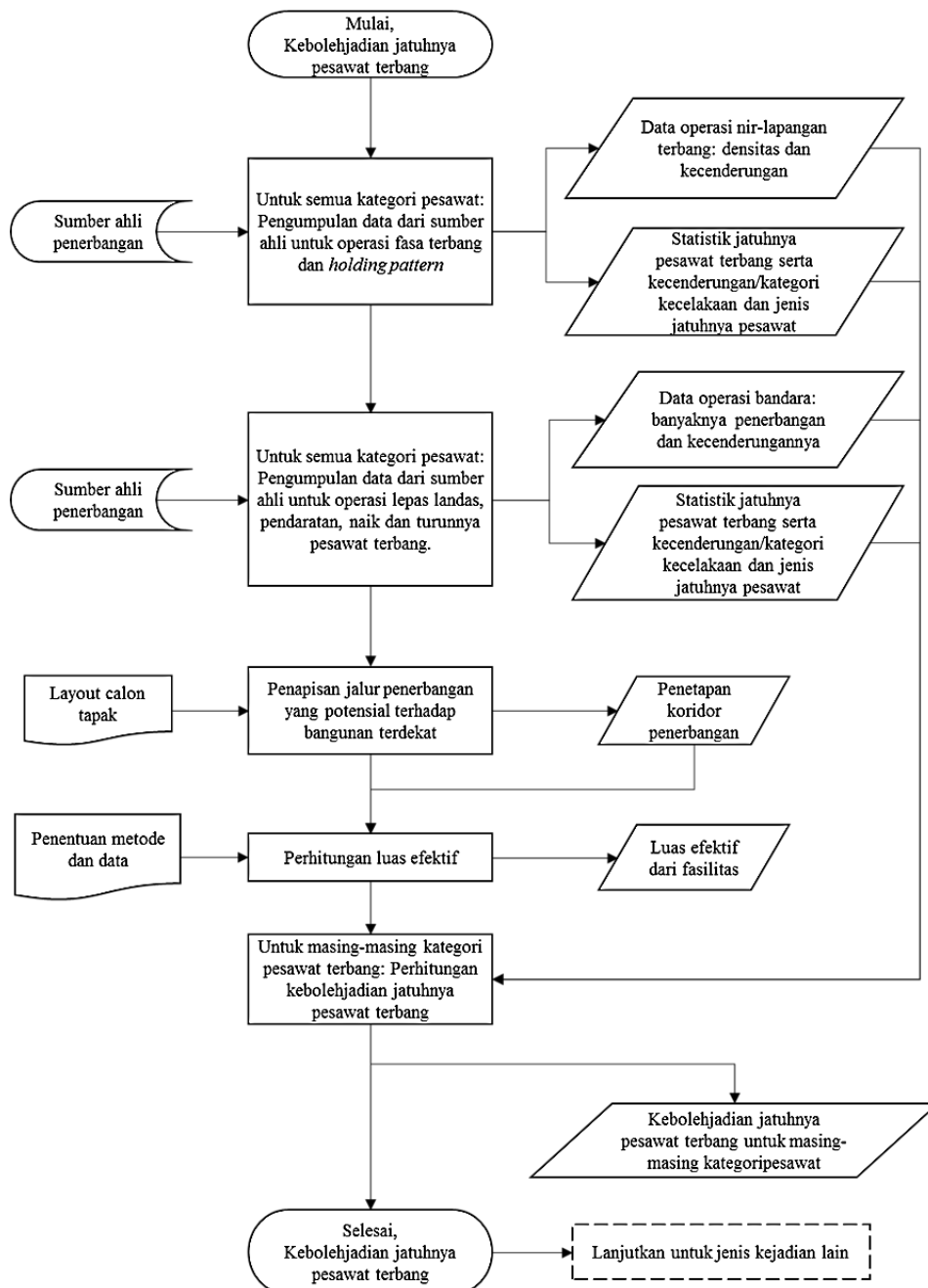
Data yang diperlukan dalam penentuan kebolehjadian jatuhnya pesawat terbang terhadap tapak di antaranya adalah sebagai berikut.

- 1) Statistik frekuensi kecelakaan untuk jenis pesawat yang berbeda (dinyatakan dalam frekuensi per tahun per luas area);
- 2) Rincian bandar udara lokal termasuk jalur penerbangan, rezim operasi dan volume penerbangan;
- 3) Rincian aktivitas penerbangan militer di area fasilitas;
- 4) Rincian area lokal dengan aktivitas penerbangan yang intens;;
- 5) Rincian pembatasan penerbangan lokal termasuk penerbangan di sekitar fasilitas itu sendiri;
- 6) Rincian setiap koridor penerbangan lokal menuju tapak;
- 7) Rincian tata letak bangunan, dimensi dan sebagainya.

Informasi penting, input-output data, serta tahap-tahap dalam penentuan kebolehjadian jatuhnya pesawat terbang terangkum dalam *flowchart* (Gambar 3.2) berikut.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 80 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal



Gambar 3. 2 Tahapan dalam penentuan nilai kebolehjadian jatuhnya pesawat terbang (digambar ulang dari FANC, 2015).

Berbagai model untuk memperhitungkan atau memprediksi frekuensi jatuhnya pesawat terbang telah banyak dilakukan. Berikut merupakan tinjauan

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 81 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

beberapa literatur untuk melakukan perhitungan kebolehjadian jatuhnya pesawat terbang baik pada fasa lepas landas dan pendaratan maupun pada saat fasa terbang, begitu juga perhitungan untuk probabilitas jatuhnya pesawat militer.

3.3.2.1. Perhitungan frekuensi jatuhnya pesawat terbang menurut DOE-STD-3014-96

Frekuensi kecelakaan jatuhnya pesawat terbang dengan menggunakan metode formula 4 faktor, terdiri atas banyaknya jumlah penerbangan, kebolehjadian jatuhnya pesawat terbang, kebolehjadian jatuhnya pesawat terbang dalam area 1 mil² (*square mil*) tempat fasilitas berada, dan luas area fasilitas.

$$F = \sum_{i,j,k} N_{ijk} \cdot P_{ijk} \cdot f_{ijk(x,y)} \cdot A_{ij} \quad (3.1)$$

- a) Untuk aktivitas di sekitar bandara. Lepas landas (*i*=1) dan pendaratan (*i*=3)
- b) Untuk aktivitas nir-lapangan udara. *In-flight* dan *holding pattern* (*i*=2)

Frekuensi jatuhnya pesawat terbang terhadap tapak dinotasikan dengan *F* (banyaknya kejadian/tahun). *N* menyatakan banyaknya operasi penerbangan untuk masing_masing kegiatan/aktivitas penerbangan (lepas landas, mendarat, atau dalam fasa terbang) dalam satu tahun. *P* menyatakan tingkat jatuhnya pesawat terbang pada saat masing-masing fasa operasi. Lokasi kemungkinan jatuhnya pesawat terbang atau *f* (dalam satuan per mil²). Serta *A* menyatakan area efektif fasilitas (mil²). Fasa penerbangan dinyatakan dengan *i* sedangkan *j* menyatakan kategori pesawat terbang dan *k* menyatakan banyaknya penerbangan.

3.3.2.2. Perhitungan kebolehjadian jatuhnya pesawat terbang menurut NUREG-0800

a. Jalur/koridor penerbangan

Kebolehjadian jatuhnya pesawat terbang di jalur atau koridor penerbangan menuju fasilitas nuklir dapat didekati dengan menggunakan formula berikut. Nilai kebolehjadian ini akan bergantung terhadap jumlah penerbangan selama satu

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 82 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

tahun di sepanjang koridor, lebar koridor, serta jarak vertikal pesawat dari permukaan.

$$P_{FA} = C \times N \times A/w \quad (3.2)$$

Notasi *C* menyatakan laju kecelakaan per mil pada fasa terbang untuk pesawat terbang yang melalui koridor penerbangan. Nilai *C* untuk pesawat komersial adalah 4×10^{-10} per mil. *N* menunjukkan banyaknya penerbangan per tahun sepanjang koridor. *A* menunjukkan area atau luasan efektif tapak dalam mil² serta *w* menyatakan lebar koridor dalam mil.

b. Bandara sipil dan militer

Kebolehjadian pesawat jatuh pada tapak berkaitan dengan bandara sipil, bandara militer serta lapangan helikopter dapat diestimasi dengan menggunakan persamaan berikut.

$$P_A = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M C_j N_{ij} A_j \quad (3.3)$$

Efektif area 10.000 – 40.000 m² (IAEA, 2002).

Designated Airspaces untuk kegiatan militer dan sipil

$$P_M = C \times A \quad (3.4)$$

Nilai *C_j* untuk pesawat militer dan pesawat umum yang digunakan diambil dari data yang dirangkum dalam tabel pada dokumen NUREG. Data tersebut valid untuk kejadian di Amerika Serikat [NUREG-0800].

3.3.2.3. Perhitungan kebolehjadian jatuhnya pesawat terbang menurut Kobayashi (1988)

a. Lepas landas dan mendarat di bandara

Sesuai dengan kriteria nilai jarak penapisan, untuk tapak yang terletak di luar radius 8 km dari bandara, selama proses lepas landas dan pendaratan pesawat di bandara, nilai kebolejadiannya dapat diestimasi dengan menggunakan persamaan berikut.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 83 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

$$P = P_t \cdot N_t \cdot A \cdot D \quad (3.5)$$

Dengan:

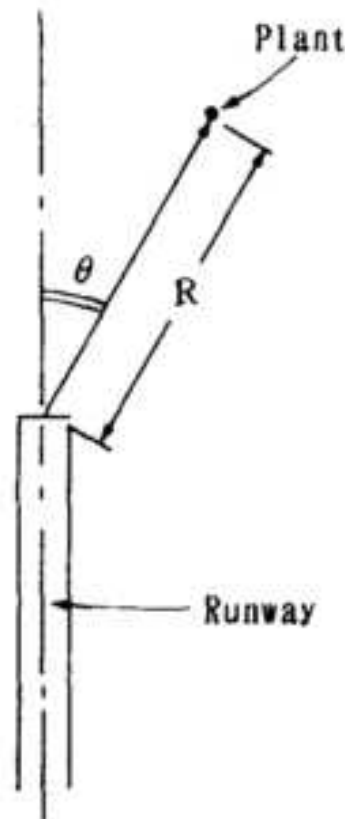
$$D = \frac{0,22}{R} \cdot e^{-R/2} \cdot e^{-\theta/80} \text{ untuk lepas landas}$$

$$D = \frac{0,31}{R} \cdot e^{-R/2,5} \cdot e^{-\theta/43} \text{ untuk mendarat}$$

Dengan P_t adalah laju kecelakaan untuk setiap lepas landas dan mendarat (kecelakaan/lepas landas atau mendarat). N_t menyatakan banyaknya aktivitas lepas landas dan mendarat setiap tahunnya. Luas efektif dinyatakan dengan A (dalam m^2). D menyatakan distribusi lokasi kecelakaan pada saat lepas landas atau mendarat. Dalam menentukan nilai D , jarak antara bandara dengan tapak (R) serta sudut yang dibentuk antara tapak dengan landasan pacu (θ) perlu diketahui. Hubungan antara tapak dengan landasan pacu pesawat terbang diilustrasikan pada Gambar 3.3 berikut.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 84 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal



Gambar 3.3 Sudut yang terbentuk antara landasan pacu dengan tapak (Kobayashi, 1988).

b. Bandara yang berada dalam radius 8 km dari tapak

Pada formula ini, pendekatan dilakukan dengan asumsi bahwa pola penerbangan dari dan atau menuju bandara simetris dengan bandara.

$$P = P_t \cdot N_c \cdot \frac{A}{2\pi R} \quad (3.6)$$

Dengan P_t sebagai tingkat kecelakaan pada fasa lepas landas atau mendarat; N_c menyatakan jumlah penerbangan per tahun; A menunjukkan luas efektif tapak; R menyatakan radius tapak dengan bandara.

c. Koridor pesawat terbang

Pada saat pesawat berada dalam fasa terbang di koridor dan pada ketinggian jelajah, perhitungan jatuhnya dapat diestimasi dengan menggunakan persamaan berikut. Kebolehtahanan jatuhnya pesawat terbang terhadap tapak pada

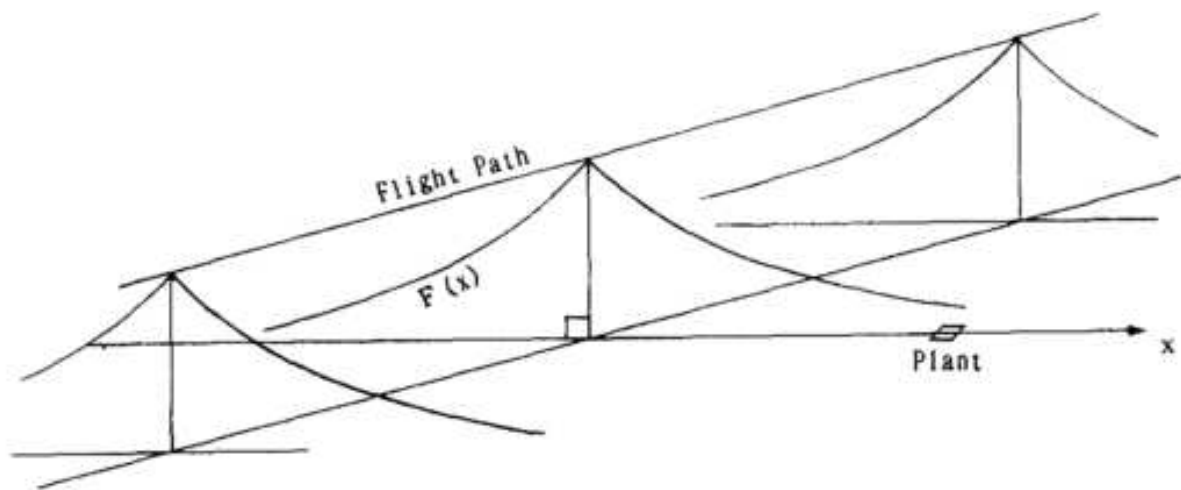
No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 85 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

jarak x dari koridor penerbangan dinyatakan dengan P . Dengan F adalah fungsi distribusi kecelakaan (Gambar 3.4), serta g adalah konstanta penurunan untuk setiap jenis pesawat. P_l menyatakan tingkat kecelakaan per jarak jarak tempuh (kecelakaan/km).

$$P = P_l \cdot N_c \cdot A \cdot F \quad (3.7)$$

$$F = \left(\frac{g}{2}\right) \cdot e^{-gx} \quad (3.8)$$



Gambar 3.4 Fungsi distribusi kecelakaan pesawat pada koridor penerbangan.

d. Zona penerbangan bebas

Kobayashi mencoba untuk menentukan perhitungan kebolehjadian jatuhnya pesawat ke tapak yang dekat dengan zona penerbangan bebas (Gambar 3.5). Model penerbangan pada zona bebas ini dilakukan dengan asumsi kepadatan penerbangan pada zona tersebut seragam, arah serta fungsi distribusi lokasi kecelakaan dianggap seragam.

$$P = P_h \cdot f \cdot A \cdot C_t \cdot \int p_s dV \quad (3.9)$$

$$p_s = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{k}{z}\right)^2 \cdot e^{-dk/z} \text{ dengan } d = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (3.10)$$

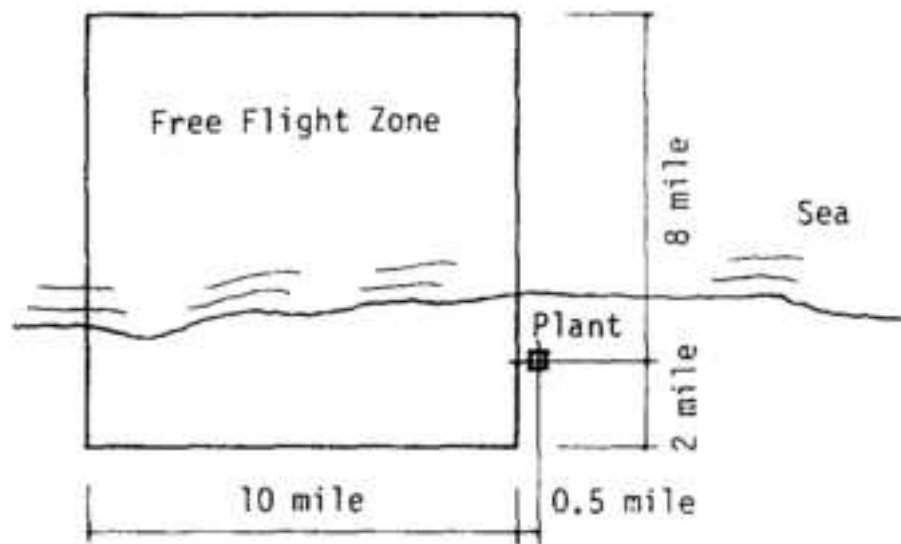
Keterangan:

P_h :	Tingkat kecelakaan per jam	x, y, z :	Lokasi terbang
---------	----------------------------	-------------	----------------

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 86 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

	terbang (kecelakaan/jam)			
C_t :	Jam terbang per tahun		x_o, y_o, z_o :	Lokasi tapak
p_s :	Fungsi distribusi kecelakaan pada zona penerbangan bebas		k :	Konstanta penurunan



Gambar 3.5 Zona penerbangan bebas

3.3.2.4. Perhitungan kebolehjadian jatuhnya pesawat terbang menurut Berg

Berg (2011) melakukan pengembangan formula dalam menentukan probabilitas jatuhnya pesawat menuju tapak instalasi nuklir. Pertimbangan yang diambil terkait kecelakaan pesawat sipil didasarkan pada rute udara yang dekat dengan lokasi yang sedang diuji; bandara kecil dan sedang dalam jarak 50 km; serta bandara besar dalam jarak 150 km. Fasa penerbangan dibagi menjadi 3 kategori penerbangan yakni fasa lepas landas dan pendaratan; pola terbang dan *holding*; serta lalu lintas penerbangan bebas. Kelas berat pesawat dibagi menjadi empat kategori dan tingkat kecelakaan per jarak terbang dialokasikan untuk fasa terbang.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 87 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Frekuensi jatuhnya pesawat terbang pada saat operasi lepas landas baik untuk pesawat sipil ataupun militer, histori statistik memperlihatkan terjadi kenaikan frekuensi kecelakaan selama fasa ini. Perhitungan kebolehdjian jatuhnya pesawat terbang-lepas landas dan pendaratan mengikuti formula berikut [Berg, 2011]. Penerapan formula ini dilakukan selama waktu observasi 19 tahun dan banyaknya kecelakaan disajikan pada Gambar 3.6. Dari kurva dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin dekat posisi terbang dengan pacuan landas, kemungkinan kecelakaan akan semakin besar.

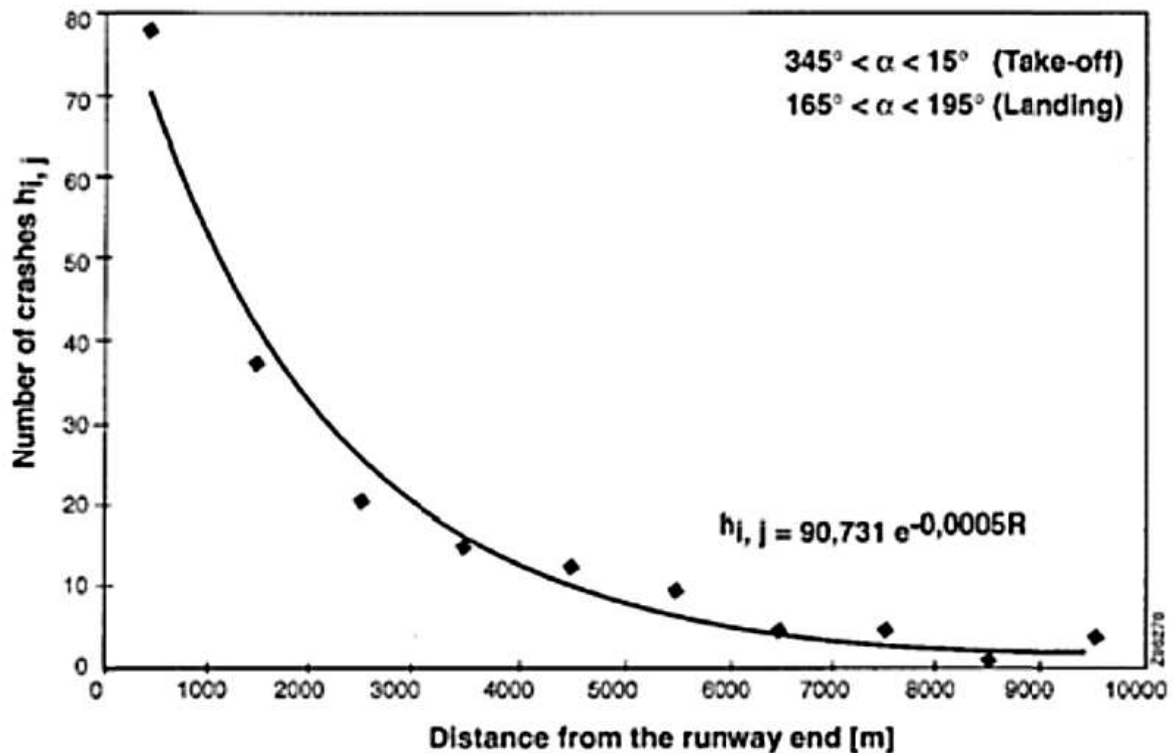
$$H_{i,j} = h_{i,j} \frac{d_i}{d_{global,i} \Delta t} \cdot \frac{F_{NPP}}{F_{\alpha,i}} \quad (3.11)$$

Keterangan:

$h_{i,j}$	: Banyaknya kecelakaan	F_{NPP} :	Area tapak
d_i	: Banyaknya operasi penerbangan per tahun pada bandara yang diteliti	$F_{\alpha,i}$:	Segemen anular
$d_{global,i}$	: Banyaknya operasi penerbangan global per tahun	$H_{i,j}$:	Banyaknya kecelakaan teoritik per tahun terhadap tapak
Δt	: Batas waktu analisis	i, j	: Berat kelas terbang

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 88 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal



Gambar 3.6 Korelasi jarak pesawat melepas dari pacuan landas terhadap banyaknya kecelakaan pesawat (Berg, 2011)

Untuk fasa terbang di sepanjang koridor penerbangan, Berg memformulasikan kebolehjadian jatuhnya pesawat menuju tapak mengikuti persamaan berikut. Distribusi frekuensi kejadian jatuhnya pesawat di sisi kanan dan kiri koridor mengikuti distribusi Gauss dengan nilai standar deviasi σ . Notasi w menyatakan distribusi lokasi kecelakaan yang merupakan fungsi dari jarak jalur koridor dengan tapak (x), panjang bangunan instalasi nuklir (a), serta σ . Frekuensi kecelakaan dinyatakan dengan h_i dalam satuan banyaknya kecelakaan per km terbang, densitas penerbangan dinyatakan dengan d_i dan b menyatakan lebar bangunan instalasi nuklir.

$$H_i = h_i \cdot d_i \cdot b \cdot w\left(\sigma, \left(x_K - \frac{a}{2} \leq x \leq x_K + \frac{a}{2}\right)\right) \quad (3.12)$$

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 89 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Di luar jarak 10 km dari bandara, setiap arah penerbangan kemungkinan menjadi sama dalam zona lalu lintas penerbangan bebas. Berg membangun perhitungan banyaknya kecelakaan pesawat terhadap tapak untuk zona penerbangan bebas dengan menggunakan persamaan berikut.

$$H_{i,j} = h_j \cdot d_{i,j} \frac{a}{2\pi R_i} \cdot \frac{b}{v_j} \quad (3.13)$$

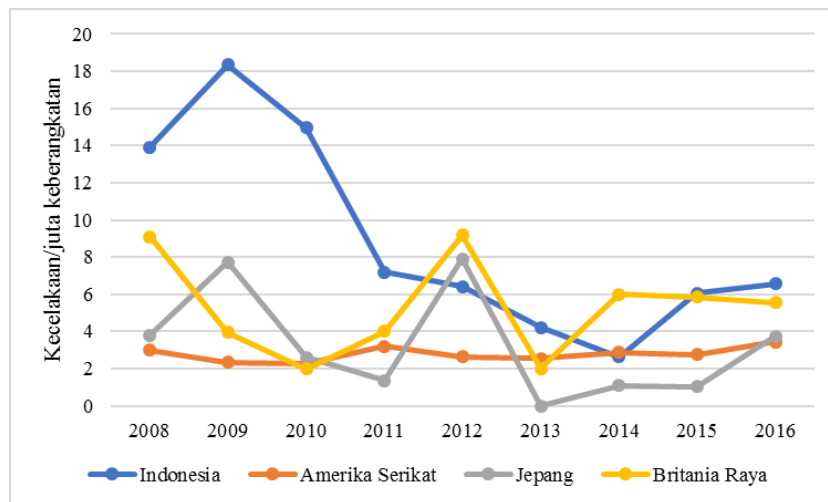
Notasi a dan b menyatakan dimensi panjang dan lebar tapak instalasi nuklir. Banyaknya operasi penerbangan global pada suatu bandara i termasuk fasa lepas landas dan pendaratan untuk masing-masing berat kelas penerbangan j dinyatakan dengan $d_{i,j}$. Frekuensi kecelakaan pesawat pada zona lalu lintas penerbangan bebas untuk masing-masing berat kelas penerbangan j dinyatakan dengan h_j . R_i menyatakan jarak antara bandara i dengan tapak dan v_j menyatakan kecepatan terbang rerata untuk masing-masing berat kelas pesawat j .

3.3.3. Membangun data statistik kecelakaan pesawat di Indonesia

Laju kecelakaan per juta keberangkatan beberapa negara disajikan pada Gambar 3.7. Nilai ini menunjukkan seberapa kerap kecelakaan pesawat terbang terjadi pada suatu negara. Berdasarkan grafik tersebut, nilai kecelakaan per juta keberangkatan pesawat di Indonesia memiliki nilai yang cukup tinggi dibandingkan negara seperti Amerika Serikat, Jepang, serta Inggris (Britania Raya). Sementara itu, perhitungan kebolehjadian jatuhnya pesawat terbang, menurut literatur NUREG 0-0800 atau Standar US Departemen Of Energy, menggunakan data untuk statistik penerbangan di Amerika Serikat. Seperti telah disebutkan sebelumnya, bahwa laju kecelakaan per keberangkatan penerbangan di Indonesia relatif lebih tinggi dibandingkan negara Amerika Serikat. Untuk itu, pada perhitungan kebolehjadian jatuhnya pesawat terbang di Indonesia mengikuti formula internasional akan diperlukan faktor koreksi, dengan ini diharapkan hasil perhitungan menjadi lebih tepat. Perhitungan kasar faktor koreksi yang hanya berdasarkan data statistik laju kecelakaan per keberangkatan dari data yang didapatkan sebesar 1,98.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 90 dari 119

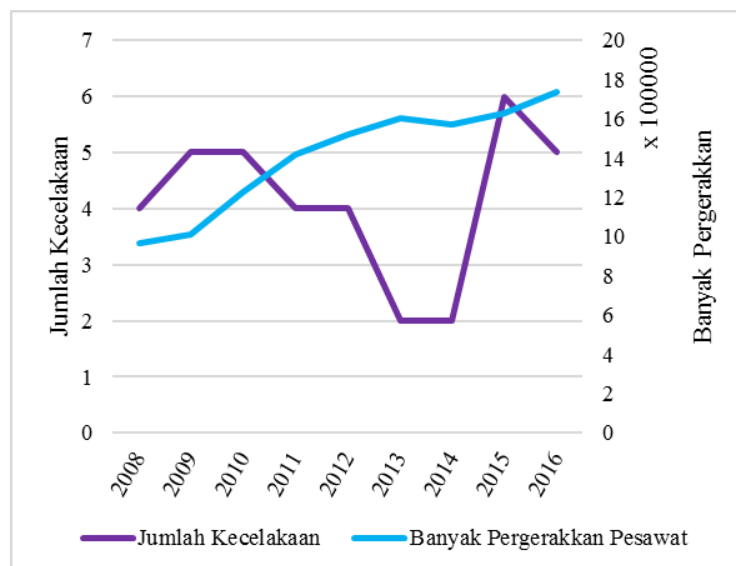
	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal



Sumber: ICAO, 2017 (diolah)

Gambar 3.7 Laju kecelakaan per keberangkatan pesawat terbang beberapa negara

Secara umum, statistik kecelakaan pesawat terbang di Indonesia disajikan pada Gambar 3.8, statistik tersebut tidak termasuk kecelakaan pesawat militer. Frekuensi kecelakaan pesawat terbang berdasarkan kurva mengalami fluktuasi meskipun banyaknya operasi penerbangan setiap tahunnya terus meningkat.



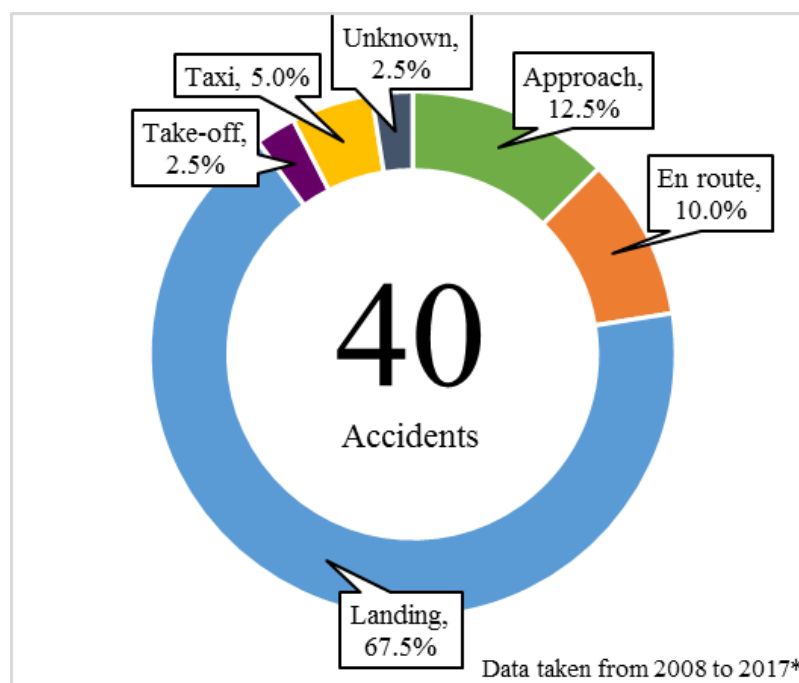
Sumber: ICAO, 2017; Statistik Perhubungan 2016, 2017 (diolah)

Gambar 3.8 Jumlah kecelakaan pesawat terbang dan banyak pergerakan pesawat pada 2008-2016

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 91 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Kecelakaan pesawat terbang yang terjadi di Indonesia dalam kurun waktu 9 tahun ini (dari 2008 hingga 2017*) sebagian besar terjadi pada saat fasa pesawat mendarat (*landing*) di bandara. Hal ini juga akan menjadi penting untuk dievaluasi apabila tapak berada tegak lurus dengan jalur pendaratan pada setiap bandara karena kemungkinan pesawat menabrak tapak menjadi semakin rentan. Pada Gambar 3.9 menunjukkan fase pesawat seperti lepas landas; fase *taxi*; fase pesawat dalam perjalanan terbang; fase mendarat; dan fase *approach* dari pesawat mengalami kecelakaan. Telah ditemukan satu kecelakaan pesawat pada saat lepas landas; dua kecelakaan pesawat pada saat pesawat mengangkat badannya sebelum melandas ke udara (fase *taxi*); lima kecelakaan pesawat pada saat pesawat akan mendarat (*approach*); empat kecelakaan pesawat pada saat pesawat dalam fasa terbang (*en route*); serta 27 kecelakaan pesawat pada saat fase mendarat dari total 40 kecelakaan pesawat (2008-2017*).



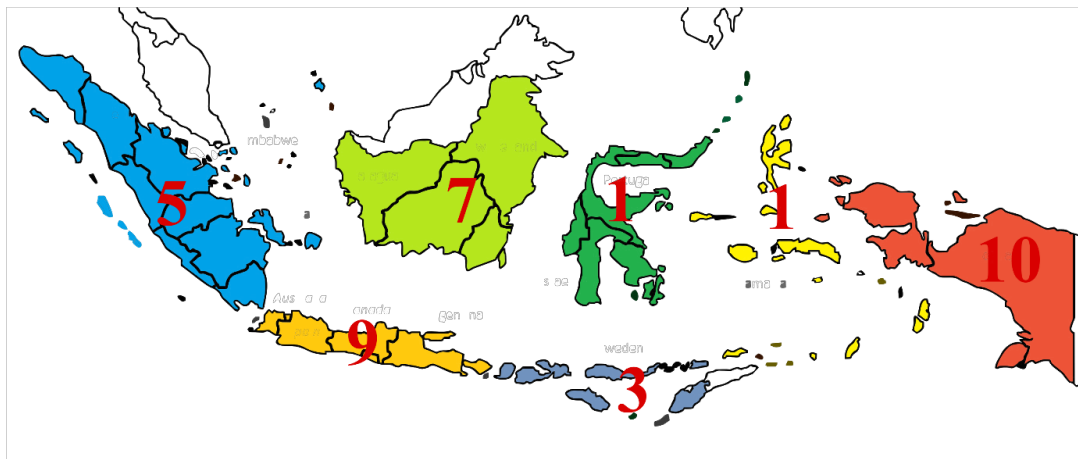
Sumber: ICAO, 2017 (diolah)

Gambar 3.9 Kecelakaan pesawat terbang di Indonesia (2008-2017) berdasarkan fasa terbang

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 92 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Data statistik kecelakaan Indonesia yang didapat dari *International Civil Aviation Organization* menunjukkan bahwa selama kurun waktu sembilan tahun ini, kecelakaan banyak terjadi di daerah pulau Papua, Jawa, Kalimantan dan Sumatera. Kecelakaan pesawat cukup jarang terjadi di daerah Pulau Sulawesi dan Maluku. Secara keseluruhan, area jatuhnya pesawat disajikan pada Gambar 3.10 berikut.



Sumber: ICAO, 2017 (diolah)

Gambar 3.10 Area jatuh pesawat terbang di Indonesia (2008-2016)

3.3.4. Evaluasi rinci

Evaluasi rinci dilakukan dengan menentukan kebolehjadian jatuhnya pesawat terbang untuk masing-masing kategori pesawat terbang terhadap wilayah tapak yang dinyatakan dalam jumlah jatuhnya pesawat per tahun per satuan luas. Kebolehjadian jatuhnya pesawat terbang yang dapat mempengaruhi fasilitas nuklir dinyatakan dalam jumlah jatuhnya pesawat per tahun per satuan luas dikalikan dengan luas efektif dari tapak instalasi nuklir.

Salah satu literatur menyebutkan bahwa jatuhnya pesawat terbang terhadap PLTN berkorelasi dengan ukuran pesawat, nilai kebolehjadiannya tidak boleh melampaui nilai yang disajikan pada tabel berikut.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 93 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Tabel 3. 6 Kebolehhadiah jatuhnya pesawat terbang pada PLTN (Wall, 1972)

Ukuran pesawat	Lokasi bandara menuju tapak (d)	
	d > 8 km	d < 8 km
Kecil	$1,4 \times 10^{-5}$	$3,3 \times 10^{-5}$
Besar	$4,6 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-6}$

Peluang jatuhnya pesawat mengganggu aliran listrik di gardu induk sangat rendah, tetapi tetap dipertimbangkan dalam analisis ekstrem atau *external event hazard* dalam keselamatan instalasi yang penting untuk keselamatan.

3.3.4.1. Faktor Penentu Peluang Jatuhnya Pesawat ke Gardu Induk

1) Jarak Gardu dari Bandara atau Jalur Penerbangan

- Jika gardu berada di bawah jalur pendekatan (*approach path*) atau *departure path*, peluang lebih tinggi;
- ICAO dan FAA biasanya menetapkan zona aman minimal 2–3 km dari ujung *runway*.

2) Tipe Pesawat yang Lewat

- Jet komersial besar lebih jarang jatuh, tapi risikonya besar.
- Pesawat kecil atau helikopter (yang lebih sering jatuh) biasanya terbang lebih rendah.

3) Frekuensi Lalu Lintas Udara di Area Tersebut

- Wilayah dengan bandara sibuk punya peluang lebih tinggi secara statistik.

4) Kepadatan Permukaan dan Luas Gardu

Luas gardu induk dalam hektar di kota besar lebih berisiko secara absolut dibanding gardu kecil di desa.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 94 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

3.3.4.2. Estimasi Probabilitas (berdasarkan studi dan data statistik)

Berdasarkan data dari IAEA (*International Atomic Energy Agency*), EPRI (*Electric Power Research Institute*), dan FAA (*Federal Aviation Administration*):

Tabel 3. 7 Kebolehjadian jatuhnya pesawat terbang

Parameter	Nilai Perkiraan
Probabilitas jatuhnya pesawat secara umum	$\sim 10^{-6}$ per pesawat per jam
Probabilitas jatuh mengenai fasilitas tertentu	$\sim 10^{-7}$ hingga 10^{-9} per tahun
Probabilitas gangguan sistem gardu akibat crash	$\sim 10^{-8}$ per tahun (jika gardu tidak di jalur penerbangan utama)

Dari Tabel diatas dapat disimpulkan bahwa peluang jatuhnya pesawat mengganggu gardu induk diperkirakan antara 10^{-7} hingga 10^{-9} per tahun.

3.3.4.3. Beberapa Contoh Studi Kasus

1. 1978 – Antwerpen, Belgia, pada tahun 1978 sebuah pesawat kecil jatuh mengenai gardu listrik dan menyebabkan pemadaman skala lokal di Antwerpen, Belgia;
2. 2002 – Überlingen mid-air collision, pada tahun 2002 jatuhnya puing-puing pesawat mengenai gardu Listrik sehingga menyebabkan kerusakan pada jaringan listrik kecil, di Überlingen, Baden-Württemberg, Jerman;
3. Sedangkan beberapa studi probabilitas yang dilakukan oleh EPRI (Electric Power Research Institute) dan NRC (AS) menunjukkan bahwa pesawat jatuh sebagai *low-frequency, high-consequence event*.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 95 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

3.3.4.4. Mitigasi

Beberapa tindakan mitigasi yang bisa dilakukan adalah sebagai berikut.

- a) **Pengaturan tata ruang:** menghindari pembangunan gardu listrik di bawah jalur *flight path*.
- b) **Membuat proteksi struktural:** Dalam mendesain gardu Listrik yang kritis seperti gardu Listrik untuk reaktor nuklir maka harus ada dinding pelindung atau layout yang terpisah.
- c) **Redundansi:** tersedianya jalur *backup* atau sistem *switching* otomatis untuk Tindakan isolasi.

Meskipun probabilitasnya sangat kecil tindakan mitigasi perlu dilakukan mengingat dampak yang diakibatkan sangat signifikan, seperti terjadinya pemadaman besar, kebakaran, atau kerusakan peralatan.

3.4. Analisis Risiko Probabilistik Multi-Unit

PSA (*Probabilistic Safety Assessment*) adalah metode yang digunakan untuk memperkirakan risiko yang ditimbulkan oleh sebuah PLTN. PSA dilakukan dengan menghitung nilai risiko untuk menentukan seberapa besar kemungkinan terjadi dan apa konsekuensinya. PSA memberikan informasi tentang kekuatan dan kelemahan desain serta operasi dari suatu PLTN. PSA dibagi menjadi tiga tingkat: Level 1 PSA, Level 2 PSA, dan Level 3 PSA.

Level 1 PSA: Mengidentifikasi urutan kejadian yang dapat menyebabkan kerusakan inti, dan memperkirakan frekuensi kerusakan teras (*core damage frequency / CDF*). Level 2 PSA: Menganalisis kejadian kerusakan parah pada inti reaktor yang diidentifikasi pada Level 1. Fokusnya adalah pada pelepasan zat radioaktif dari bahan bakar yang dapat berdampak ke lingkungan. PSA level ini memperkirakan frekuensi, besaran, dan karakteristik lain dari pelepasan zat

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 96 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

radioaktif ke lingkungan. Level 3 PSA: Mengevaluasi konsekuensi terhadap kesehatan masyarakat dan dampak sosial lainnya.

Meskipun PSA tradisional berfokus pada unit individu, dapat diamati bahwa unit-unit yang berada pada satu lokasi multi-unit dapat memiliki urutan kecelakaan bersama yang signifikan. Pengamatan ini memunculkan perlunya pengembangan PSA multi-unit (MUPSA). Tujuan dari MUPSA adalah untuk: menilai risiko kecelakaan yang mempengaruhi beberapa unit secara bersamaan. Untuk mengevaluasi risiko multi-unit secara akurat, diperlukan analisis yang komprehensif dan sistematis mengenai interaksi, dan ketergantungan antar unit.

MUPSA memberikan wawasan apakah tujuan keselamatan multi-unit telah tercapai atau belum. Dalam PSA, tujuan keselamatan umumnya dinyatakan sebagai kriteria risiko kuantitatif, seperti, kriteria frekuensi kerusakan teras (CDF) dan kriteria frekuensi pelepasan besar (LRF). Kriteria risiko secara umum mengacu pada parameter kuantitatif yang digunakan dalam proses pengambilan keputusan berdasarkan hasil penilaian risiko. Kriteria ini dapat berupa, tujuan (*goals*) atau batas atas (*limits*) untuk risiko yang dapat diterima. Setiap kriteria risiko selalu terkait dengan metrik risiko yang sesuai.

PSA multi-unit juga dapat membantu dalam menilai risiko pada lokasi yang memiliki beberapa reaktor modular kecil (SMR). Kemungkinan terjadinya kecelakaan yang memengaruhi lebih dari satu modul bisa lebih tinggi dibandingkan dengan situs multi-unit konvensional. Konfigurasi multi-modul dapat meningkatkan risiko karena beberapa desain dan konsep SMR memiliki lebih banyak sistem, struktur, dan komponen (SSC) yang digunakan bersama, seperti, gedung reaktor bersama, ruang kendali bersama, dan *Ultimate heat sink* bersama. Sebagai contoh, jika beberapa reaktor berada dalam gedung reaktor yang sama, maka kemungkinan besar, tidak terdapat penghalang fisik di antara mereka, dan mereka akan ditempatkan berdekatan satu sama lain.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 97 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

3.4.1 Perbandingan antara Unit dan Modul

Sebuah unit adalah satu fasilitas nuklir pembangkit listrik di dalam suatu PLTN. Biasanya, satu unit terdiri dari, sebuah reaktor, dan kolam bahan bakar bekas (*spent fuel pool*). Dalam sebagian besar kasus, satu unit memiliki izin operasi (*license*) tersendiri.

Sebaliknya, sebuah modul adalah reaktor nuklir kecil beserta struktur, sistem, dan komponennya yang terkait, yang merupakan bagian dari unit multi-modul. Istilah *unit multi-modul* merujuk pada konfigurasi beberapa modul yang berada di bawah infrastruktur yang sama dan dalam jarak berdekatan. Ciri khas konfigurasi multi-modul antara lain, modul-modul berbagi SSC lebih luas dibandingkan dengan unit reaktor tradisional, masing-masing modul dapat dioperasikan secara relatif independen, terlepas dari kondisi atau status modul lain di unit tersebut, modul-modul pada dasarnya identik, dan izin operasinya dapat berbeda dari unit konvensional. Saat ini sedang dibahas apakah akan lebih menguntungkan jika beberapa modul dapat diberi izin secara bersamaan, mengingat adanya kebutuhan untuk mengoperasikan modul secara bertahap.

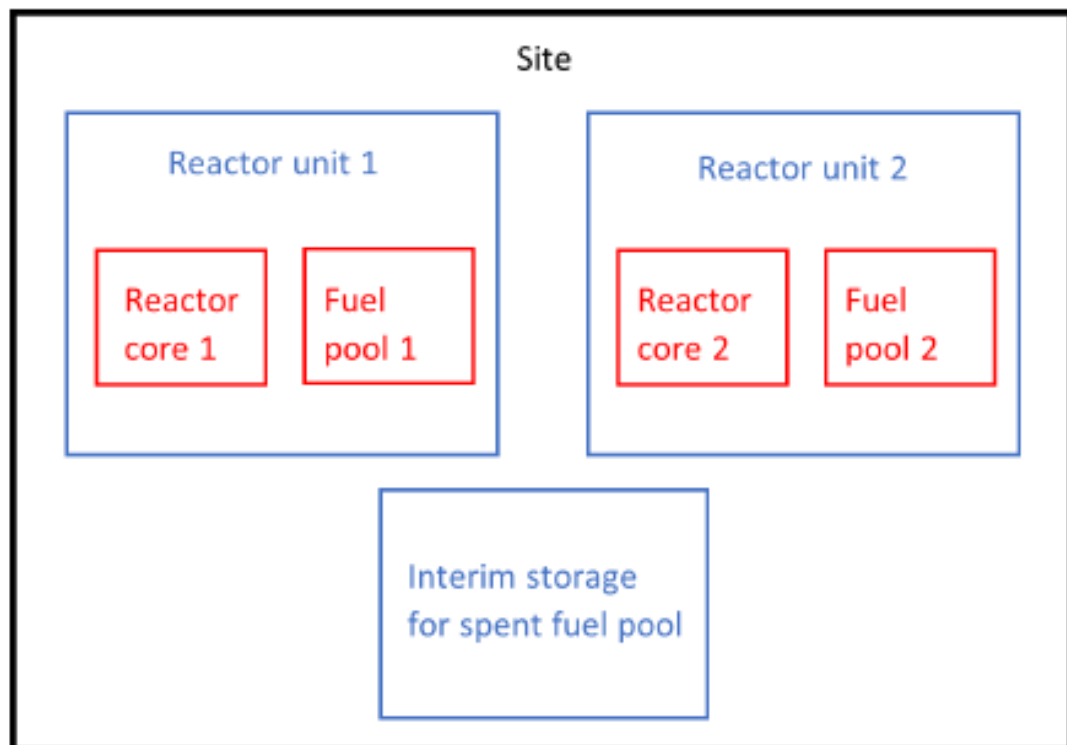
Fakta-fakta di atas menunjukkan bahwa "unit" dan "modul" adalah dua konsep yang berbeda. Pada reaktor konvensional berukuran besar, konsep situs multi-unit dan multi-modul sering dianggap setara, karena, setiap unit dalam situs multi-unit hampir sepenuhnya otonom, dan SSK dibagi seminimal mungkin. Menurut [Cederlof, 2024] "*Sebuah modul SMR mungkin tidak sepenuhnya otonom dan mungkin tidak selalu memiliki sistem keselamatan individual maupun sistem pendukung keselamatan sendiri seperti heat sink terpisah atau catu daya AC terpisah*". Seperti telah diketahui secara umum bahwa antara beberapa modul di desain SMR berbagi gedung reaktor dan ruang kendali dalam penggunaannya.

Dengan demikian, dalam kajian ini, istilah unit merujuk pada fasilitas nuklir yang tidak memiliki ketergantungan besar terhadap fasilitas lain. Unit dalam situs multi-unit dapat berbeda satu sama lain, dan masing-masing memiliki izin

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 98 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

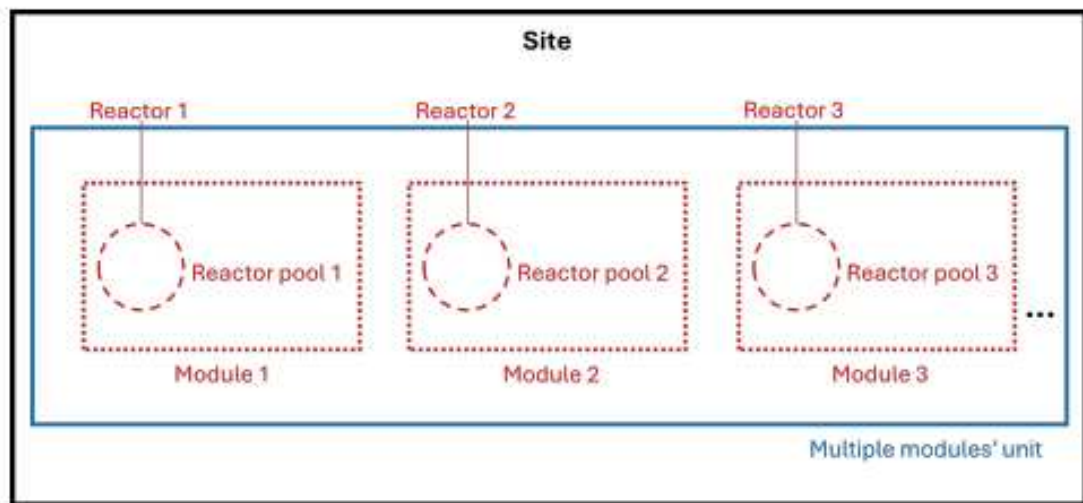
operasinya sendiri. Sebaliknya, modul adalah instalasi yang berada sangat dekat dengan instalasi lain yang serupa dalam satu gedung reaktor yang sama. Modul-modul ini dapat memiliki ketergantungan yang signifikan, dan bersama-sama membentuk unit multi-modul, dengan kemungkinan bahwa beberapa modul berbagi izin operasi yang sama.



Gambar 3.11 Ilustrasi “situs multi-unit” dan “unit-unit”.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 99 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal



Gambar 3.12 Ilustrasi situs dengan satu “unit multi-modul” dan beberapa “modul SMR”.

3.4.2 Pohon Kejadian dan Pohon Kegagalan

Analisis pohon kejadian (*Event Tree / ET*) adalah metode yang umum digunakan untuk menganalisis perkembangan kecelakaan dalam analisis risiko dan keandalan. Pohon kejadian merupakan diagram logika yang dimulai dari suatu peristiwa pemicu dasar, lalu secara sistematis menelusuri urutan kejadian yang mengarah ke berbagai kemungkinan hasil atau konsekuensi.

Sebuah pohon kejadian (*event tree*) mencakup urutan-urutan kejadian yang mungkin timbul dari suatu peristiwa pemicu. Sebuah peristiwa pemicu memiliki konsekuensi yang dapat memicu kejadian lain, yang kemudian juga memiliki konsekuensi, dan seterusnya. Sistem yang dirancang dengan baik akan dilengkapi dengan sistem keselamatan yang bertujuan untuk menghentikan atau mengurangi konsekuensi dari peristiwa pemicu tersebut. Biasanya, pohon kejadian dikembangkan dengan menganalisis apakah, ada kejadian yang dapat terus berkembang, atau sistem keselamatan gagal atau berhasil, sampai tercapai suatu keadaan akhir (*end state*). Artinya, setiap kejadian dibagi secara biner: ya atau

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 100 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

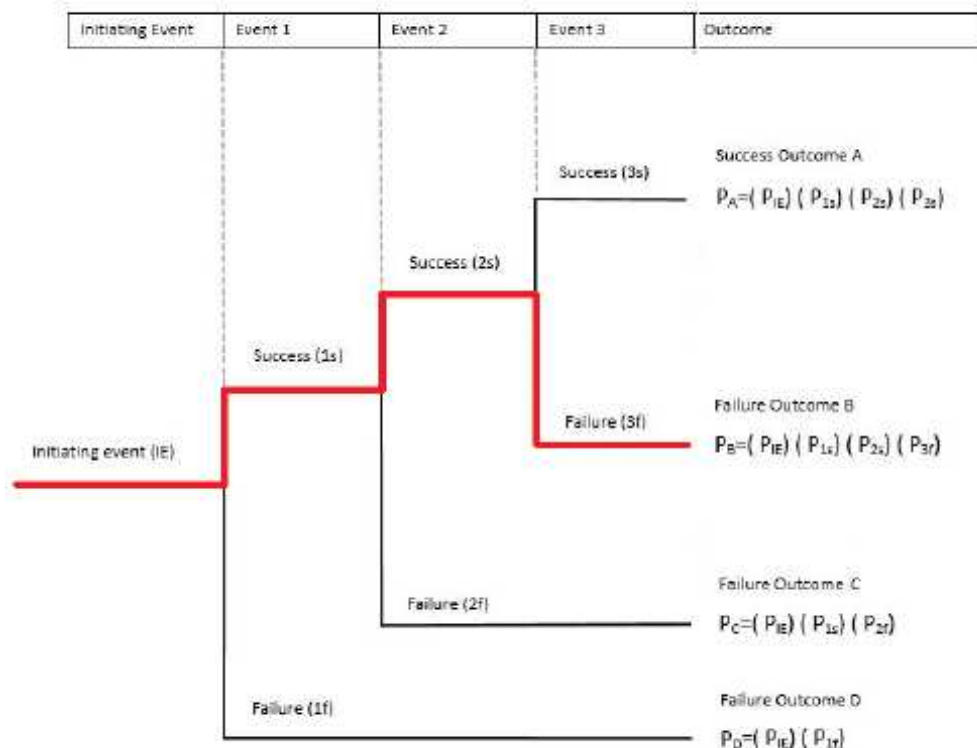
tidak, gagal atau berhasil, hingga diperoleh suatu hasil akhir tertentu. Probabilitas dari setiap cabang biner ini dapat dievaluasi. Akhirnya, dengan menggunakan probabilitas kondisional, probabilitas dari suatu hasil akhir dapat dihitung.

Gambar 3.13 menunjukkan contoh sebuah pohon kejadian, di mana jalur berwarna merah merupakan contoh urutan kejadian (*event sequence*). Contohnya, dengan tiga kejadian antara, urutannya bisa sebagai berikut, terjadi sebuah ledakan sebagai peristiwa pemicu (*frekuensi $f = 10^{-2}$ per tahun*), ledakan tersebut memicu kebakaran (*probabilitas sukses $p_{1s} = 0.8$*), sistem sprinkler berfungsi (*$p_{2s} = 0.99$*). namun, alarm kebakaran tidak aktif (*$p_3f = 0.001$*). Hasil akhir dari urutan kecelakaan ini adalah kebakaran yang terkendali tanpa alarm aktif. Dengan mengasumsikan bahwa setiap urutan kejadian bersifat saling bebas (*independen*), maka probabilitas dari hasil akhir tersebut dapat dihitung sebagai berikut:

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 101 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

$$P = f \cdot p_{1s} \cdot p_{2s} \cdot p_{3f} = 10^{-2} \frac{1}{a} \cdot 0.8 \cdot 0.99 \cdot 0.001 \approx 7.9 \cdot 10^{-6} \frac{1}{a}$$



Gambar 3.13 Contoh sebuah pohon kejadian dan ilustrasi urutan kejadian.

Metode lain yang juga umum digunakan untuk mempelajari risiko dan keandalan suatu sistem adalah analisis pohon kegagalan (*Fault Tree / FT*). Seperti pohon kejadian, pohon kegagalan juga merupakan diagram logika, tetapi dengan pendekatan yang berbeda. Pohon kegagalan menunjukkan hubungan antara suatu peristiwa kritis dalam sistem dengan penyebab-penyebab potensial dari peristiwa tersebut. Artinya, pohon kegagalan menganalisis bagaimana suatu kejadian yang tidak diinginkan atau kegagalan sistem dapat terjadi. Sebagai perbandingan, pohon kejadian (ET) menganalisis urutan kejadian (baik keberhasilan maupun kegagalan), pohon kegagalan (FT) fokus pada sebab-akibat dari satu kegagalan utama. Pohon

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 102 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

kegagalan pada dasarnya adalah model kualitatif, tetapi dapat dianalisis secara kuantitatif.

Peristiwa yang dianalisis dalam pohon kegagalan disebut sebagai peristiwa puncak (*top event*), yaitu hasil yang tidak diinginkan. Sesuai namanya, peristiwa ini diletakkan di bagian paling atas dari diagram pohon kegagalan (lihat Gambar 3.14). Karena FT menganalisis peristiwa puncak tertentu, maka diagram ini hanya mencakup kegagalan-kegagalan yang berkontribusi pada peristiwa tersebut. Jika suatu kejadian tidak dapat diuraikan lebih lanjut, maka disebut sebagai peristiwa dasar (*basic event* / BE). BE umumnya berupa jenis kegagalan, seperti, kesalahan manusia atau kegagalan proses. Untuk BE, dilakukan evaluasi terhadap probabilitas kegagalan.

Pohon kegagalan terdiri dari elemen yang disebut gerbang (*gates*), yang berfungsi untuk mengizinkan atau menghambat alur logika kegagalan ke atas dalam pohon. Gerbang menunjukkan hubungan antara beberapa kejadian yang diperlukan agar suatu kejadian tingkat lebih tinggi dapat terjadi. Peristiwa yang lebih tinggi menjadi output dari gerbang, sedangkan peristiwa di bawahnya menjadi input-nya. Tabel 3.8 menyajikan simbol-simbol umum yang digunakan untuk menggambarkan kejadian dan gerbang dalam pohon kegagalan. Selain itu, Gambar 3.14 menunjukkan bagaimana simbol-simbol tersebut diterapkan dalam praktik.

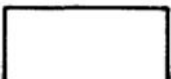
Bagian penting dari analisis pohon kegagalan adalah *cut sets* dan *minimal cut sets*. *Cut set* adalah sekumpulan peristiwa dasar yang jika terjadi secara bersamaan, akan mengakibatkan terjadinya peristiwa puncak. *Minimal cut set* adalah *cut set* yang tidak lagi menjadi *cut set* jika satu saja peristiwa dasarnya dihilangkan. Pada Gambar 3.14, terdapat peristiwa puncak T dan peristiwa dasar A, B, C, dan D. Salah satu minimal cut set dari pohon tersebut adalah: A terjadi, B terjadi, dan C atau D terjadi. Representasi minimal cut set dengan probabilitas akan ditunjukkan pada bagian selanjutnya.

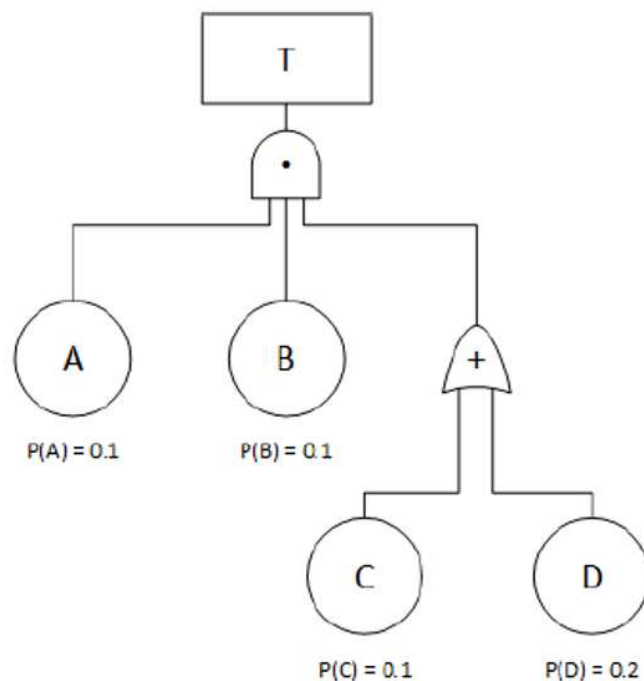
No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 103 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

$$P(T) = P(A) \cdot P(B) \cdot [P(C) + P(D)] \quad (\text{III.14})$$

Tabel 3.8 Contoh simbol dari *Fault Tree*

	Basic event
	Top event/Intermediate event
	And-gate
	Or-gate



Gambar 3.14 Contoh *Fault Tree* Sederhana

3.4.3 Metrik Risiko dan Ukuran Kepentingan (*Importance Measures*)

Dalam penilaian keselamatan nuklir, metrik risiko (*risk metric* / RM) adalah ukuran kuantitatif yang digunakan untuk mengevaluasi, kemungkinan terjadinya

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 104 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

kecelakaan atau insiden, serta konsekuensinya, yang melibatkan bahan radioaktif. Pada PSA unit tunggal tradisional, metrik risiko yang biasanya digunakan antara lain: frekuensi kerusakan teras (*Core Damage Frequency / CDF*) dan Frekuensi Pelepasan Besar atau Dini (*Large/Early Release Frequency / LRF* atau *ERF*). Metrik-metrik ini biasanya dinyatakan dalam jumlah kejadian per tahun reaktor. Namun, jika PSA dilakukan terhadap seluruh situs (misalnya dalam MUPSA), maka metrik risiko harus diperluas untuk mencakup keseluruhan situs dan dinyatakan dalam jumlah kejadian per tahun situs (*events per site year*). Oleh karena itu, metrik risiko tradisional tidak lagi cukup untuk PSA multi-unit, dan perlu ditambahkan metrik risiko tambahan.

Ukuran kepentingan (*Importance Measures / IM*) digunakan untuk memberi peringkat komponen sistem berdasarkan kriteria tertentu yang relevan dengan masalah pengambilan keputusan. Beberapa IM yang umum digunakan dan dibahas secara singkat dalam kajian ini adalah: *Fussell-Vesely (FV)*, *Risk Achievement Worth (RAW)* (juga dikenal sebagai *Risk Increase Factor / RIF*) dan *Birnbaum Importance (BI)*. Ukuran-ukuran ini memberikan wawasan yang sangat berguna tentang, tingkat kepentingan relatif dari berbagai komponen system dalam model PSA yang dikaji pada kajian ini. Namun, penerapan praktis dari IM tersebut tidak dibahas secara rinci dalam kajian ini.

3.4.3.1 Frekuensi Kerusakan Bahan Bakar dan Inti Reaktor (*Fuel and Core Damage Frequency*)

Salah satu metrik risiko tradisional (RM) yang digunakan untuk satu reaktor adalah frekuensi kerusakan teras (*Core Damage Frequency / CDF*). CDF didefinisikan sebagai ukuran kemungkinan bahwa teras reaktor mengalami kerusakan akibat suatu kecelakaan. CDF digunakan dalam PSA level-1, dan dinyatakan dalam satuan: [1/reaktor-tahun]. Dalam konteks MUPSA, metrik risiko tradisional seperti ini harus diperluas untuk mempertimbangkan seluruh situs, dan beberapa reaktor yang ada di dalamnya. [Cederlof, 2024] Berikut adalah beberapa

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 105 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

metrik risiko yang umum digunakan dalam MUPSA untuk kerusakan inti sebagai berikut.

- a) *Single Unit Core Damage Frequency* (SUCDF), merupakan ukuran yang ekuivalen dengan CDF tradisional. Namun, SUCDF mewakili semua reaktor di satu situs, hanya mencakup urutan kecelakaan yang menyebabkan kerusakan teras pada satu unit saja;
- b) *Multi-Unit Core Damage Frequency* (MUCDF). mengukur kemungkinan bahwa dua atau lebih teras reaktor pada situs multi-unit mengalami kerusakan akibat kecelakaan;
- c) *Site Core Damage Frequency* (SCDF), mengukur kemungkinan bahwa satu atau lebih teras reaktor mengalami kerusakan pada suatu situs.

Semua metrik di atas dinyatakan dalam satuan: [kejadian/situs-tahun]. Perlu dicatat bahwa metrik-metrik risiko di atas hanya mempertimbangkan kerusakan pada teras reaktor. Namun, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.14, sangat mungkin (dan bahkan sangat lazim) bahwa terdapat lokasi bahan bakar lain selain teras reaktor, misalnya, kolam bahan bakar bekas, lokasi penyimpanan bahan bakar sementara, dan sebagainya. Oleh karena itu, dalam beberapa kasus, mungkin diperlukan analisis kerusakan bahan bakar di lokasi-lokasi lain. Untuk situasi ini, dapat digunakan metrik risiko tambahan, misalnya menurut:

- 1) *Multi-Source Fuel Damage Frequency* (MSFDF), mewakili kemungkinan bahwa bahan bakar dari dua atau lebih sumber berbeda mengalami kerusakan akibat suatu kecelakaan;
- 2) *Site Fuel Damage Frequency* (SFDF), merupakan ukuran dari kemungkinan terjadinya kecelakaan yang menyebabkan kerusakan bahan bakar pada satu atau lebih lokasi di sebuah situs multi-unit.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 106 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Kedua metrik ini dinyatakan dalam satuan: [kejadian/situs-tahun], sama seperti metrik risiko multi-unit lainnya. Terdapat perbedaan penting antara dua metrik risiko ini, SFDF *tidak* mencakup kerusakan bahan bakar dalam teras reaktor, sedangkan MSFDF (atau yang serupa) mencakup kerusakan bahan bakar di lokasi mana pun, termasuk di dalam teras reaktor.

3.4.3.2 Frekuensi Pelepasan Besar atau Dini (*Large or Early Release Frequency*)

Metrik risiko tradisional lainnya dalam PSA adalah frekuensi pelepasan besar atau dini (*Large or Early Release Frequency / LRF atau ERF*). LRF atau ERF didefinisikan sebagai ukuran dari kemungkinan terjadinya pelepasan signifikan zat radioaktif dari fasilitas nuklir selama tahap awal suatu kecelakaan. (Setiap negara mungkin memiliki batas regulasi tersendiri; misalnya, di Finlandia, pelepasan besar didefinisikan sebagai 100 TBq Cs-137). LRF atau ERF digunakan dalam PSA level-2 (dan level-3) dan nilainya dinyatakan dalam satuan [kejadian/reaktor-tahun].

Sebagaimana CDF, LRF atau ERF juga perlu dimodifikasi agar sesuai untuk digunakan pada PSA tingkat situs. Metrik risiko untuk PSA multi-unit level-2 (dan level-3) meliputi hal berikut.

- 1) *Site Large or Early Release Frequency* (SLRF atau SERF), ekuivalen dengan LRF atau ERF tradisional, namun mencakup pelepasan besar atau dini baik dari satu atau lebih reaktor, maupun dari fasilitas di dalam situs;
- 2) *Site Release Category Frequency* (SRCF), merupakan ukuran kemungkinan terjadinya pelepasan untuk setiap kategori pelepasan dalam PSA level-2 MUPSA. Kategori pelepasan meliputi: Kategori yang telah ditentukan dalam PSA unit tunggal level-2 (SUPSA) untuk tiap reaktor atau fasilitas, Dan juga kategori untuk kecelakaan yang melibatkan beberapa reaktor atau fasilitas di situs.

Kedua metrik ini juga dinyatakan dalam satuan: [kejadian/situs-tahun]

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 107 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

3.4.3.3 Ukuran Kepentingan (*Importance Measures*)

Ukuran kepentingan (*Importance Measures/IM*) memberikan gambaran tentang: Kontribusi relatif dari berbagai objek terhadap risiko kegagalan suatu sistem. Objek ini dapat berupa: komponen tertentu, sub-sistem, peristiwa dasar (*basic event*), atau bagian dari suatu proses. Nilai absolut dari ukuran kepentingan mungkin tidak sepenting peringkat relatifnya. Peringkat tersebut memberikan informasi tentang, kontributor paling dominan terhadap risiko, Dan mengarahkan proses peningkatan keselamatan dan keandalan sistem.

Ukuran kepentingan (*importance measures*) dapat menunjukkan sub-sistem mana yang paling bernilai untuk ditingkatkan keandalannya, dalam rangka menurunkan risiko sistem secara keseluruhan. Selain itu, ukuran ini dapat digunakan dalam penerapan pendekatan bertingkat (*graded approach*) pada pemodelan risiko, yaitu: menunjukkan bagian-bagian sistem yang paling signifikan terhadap risiko dan harus dimodelkan secara akurat, serta bagian-bagian yang dampaknya kecil terhadap risiko sistem, dan dapat dimodelkan secara lebih sederhana. Contoh penggunaan lainnya dari *importance measures* termasuk untuk menentukan klasifikasi keselamatan suatu SSC, dan mengoptimalkan interval pengujian maupun waktu perbaikan yang diperbolehkan.

Langkah pertama untuk memahami *importance measures* adalah menemukan representasi matematis dari risiko. Jika kita tertarik pada suatu faktor risiko tertentu i (misalnya suatu peristiwa dasar dalam *fault tree*), maka risiko dapat direpresentasikan sebagai fungsi (multi)linier, dengan asumsi bahwa i tidak bergantung pada peristiwa dasar lainnya dalam fungsi.

$$R(X_i) = aX_i + b \quad (3.15)$$

di mana, aX_i : menyatakan kontribusi *cut set* minimal yang mencakup i dengan probabilitas kegagalan X_i , dan b : menyatakan kontribusi dari *cut set* yang tidak mencakup i . Sebagai contoh, dalam pohon kegagalan yang dijelaskan di bab sebelumnya, representasi *minimal cut set*-nya adalah:

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 108 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

$$P_{top\ event} = A . B . (C + D) = A . B . C + A . B . D \quad (3.16)$$

Maka, sebagai contoh: $R(C) = aC + b$, di mana: $a = A \cdot B$ dan $b = A \cdot B \cdot D$

Sebagian besar *importance measures* dapat dibagi ke dalam tiga kelompok utama: *Risk Reduction* (RR), *Risk Achievement* (RA) dan *Partial Derivative* (PD). Salah satu ukuran kepentingan RR yang paling umum digunakan adalah Fussell-Vesely (FV). FV mewakili probabilitas bahwa suatu peristiwa dasar, komponen, atau cut set tertentu adalah penyebab dari terjadinya peristiwa puncak. FV dihitung sebagai: Kontribusi fraksional terhadap hasil, atau dengan kata lain: "Probabilitas peristiwa puncak hanya akibat cut set yang menjadi perhatian" dibagi dengan "Probabilitas total peristiwa puncak".

Contoh ukuran RA (*Risk Achievement*) yang umum digunakan adalah *Risk Achievement Worth* (RAW). RAW didefinisikan sebagai peningkatan risiko jika suatu komponen dianggap gagal atau tidak ada, atau dengan kata lain: "Probabilitas peristiwa puncak dengan asumsi komponen gagal (probabilitas = 1)" dibagi dengan "Probabilitas peristiwa puncak".

Terakhir, ukuran kepentingan *partial derivative* (PD) yang umum digunakan Adalah Birnbaum Importance (BI). *Birnbaum Importance* diterapkan pada probabilitas peristiwa puncak dalam pohon kegagalan. BI mewakili kemungkinan bahwa sistem berada dalam keadaan di mana suatu komponen tertentu bersifat kritis, artinya kegagalan komponen tersebut akan menyebabkan kegagalan sistem secara keseluruhan. Nilainya dapat dihitung dengan cara: Mengurangi probabilitas peristiwa puncak saat probabilitas kegagalan komponen = 0 dari probabilitas peristiwa puncak saat probabilitas kegagalan komponen = 1.

3.4.4 Pemodelan Kegagalan Penyebab Umum (*Common Cause Failure / CCF*)

Tujuan dari pemodelan CCF adalah untuk memodelkan setiap kejadian CCF secara eksplisit menggunakan pohon kegagalan (fault tree). Namun, beberapa CCF terlalu kompleks untuk dimodelkan secara eksplisit, atau tidak memiliki data yang

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 109 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

memadai, sehingga memerlukan pendekatan implisit dengan model probabilistik CCF. Model CCF implisit ini termasuk metode parametrik seperti: Model Faktor Beta (Beta Factor Model / BFM), Model Huruf Yunani Ganda (Multiple Greek Letter Model / MGLM) dan Model Faktor Alpha (Alpha Factor Model / AFM).

Model Faktor Beta (β -Factor Model), model ini mungkin adalah pendekatan yang paling banyak digunakan di berbagai sektor industri. Model ini memiliki dua parameter input, Q_{tot} untuk menunjukkan ketidaktersediaan total untuk setiap *basic event* dalam kelompok CCF. Ketidaktersediaan ini biasanya dihitung oleh perangkat lunak PSA. β (beta) ini menunjukkan fraksi dari laju kegagalan total sistem subsistem yang disebabkan oleh kegagalan penyebab umum. Misalnya, jika $\beta = 0,1 \rightarrow$ artinya 10% dari semua kegagalan berasal dari sebab yang sama (common cause). Namun, sistem yang memiliki tiga atau lebih subsistem redundan tidak dapat dimodelkan dengan model β -factor. Model ini tidak mampu membedakan antara kegagalan dua subsistem dan tiga atau lebih subsistem.

Model Huruf Yunani Ganda (MGLM), MGLM digunakan untuk memodelkan sistem dengan tiga atau lebih redundansi, atau sistem yang membutuhkan n dari m subsistem agar dapat beroperasi. Model ini memiliki parameter tambahan dibandingkan model β , sehingga kadang disebut juga sebagai model β yang diperluas. Setiap parameter dalam MGLM mewakili probabilitas kondisional untuk kegagalan akibat penyebab umum tingkat berikutnya.

β -factor menunjukkan probabilitas bahwa setidaknya satu komponen lain gagal akibat penyebab umum, setelah satu komponen telah gagal. γ -factor menunjukkan probabilitas bahwa setidaknya satu komponen lagi gagal, setelah dua komponen telah gagal karena penyebab umum. Sedangkan δ -factor menunjukkan Probabilitas bahwa komponen keempat gagal, setelah tiga komponen sudah gagal. Saat ini, model α -factor (Alpha Factor Model) lebih sering digunakan dibanding MGLM, karena parameter α lebih cocok untuk analisis ketidakpastian.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 110 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Seperti telah disebutkan sebelumnya, model α -factor (AFM) biasanya digunakan sebagai pengganti MGLM. AFM memodelkan semua kemungkinan kombinasi dari kejadian kegagalan ganda (*multiple failure events*). Dalam kajian ini, AFM diterapkan di dalam model PSA. Menurut [Cederlof, 2024], faktor α (α -factor) mewakili rasio antara probabilitas kejadian kegagalan yang melibatkan k komponen terhadap total probabilitas semua kejadian kegagalan dalam suatu kelompok m komponen. Dengan kata lain: "Probabilitas kejadian yang melibatkan k kegagalan komponen dalam satu kelompok penyebab umum yang terdiri dari m komponen", dibagi dengan "Jumlah seluruh probabilitas kejadian kegagalan dalam kelompok tersebut". Secara matematis, α -factor dapat direpresentasikan sebagai:

$$a_k = \frac{\binom{m}{k} Q_k}{\sum_{k=1}^m \binom{m}{k} Q_k} \quad (3.17)$$

di mana: faktor α untuk kegagalan sejumlah k komponen.

$$Q_k = \frac{k}{\binom{N-1}{k-1} a_{tot}} Q_{tot} \quad (3.18)$$

Dimana N adalah jumlah peristiwa dasar (*basic events*) dalam kelompok CCF

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 111 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

BAB IV

SIMPULAN DAN REKOMENDASI

4.1. Simpulan

Kajian ini menegaskan bahwa perkembangan teknologi PLTN, khususnya *Small Modular Reactors* (SMR) dengan desain multi-modul, membawa implikasi keselamatan baru yang harus diantisipasi oleh Bapeten dalam proses evaluasi tapak dan desain. PLTN multi-modul memiliki karakteristik penggunaan bersama struktur, sistem, dan komponen sehingga penilaian terhadap bahaya eksternal menjadi lebih kompleks dibandingkan reaktor konvensional.

Melalui telaah komprehensif terhadap peraturan nasional, standar internasional IAEA, dan standar teknis nasional (SNI), kajian ini mengidentifikasi bahwa aspek geoteknik, kegunungapian, dan kejadian akibat ulah manusia (KAUM) merupakan sumber bahaya eksternal yang paling berpengaruh dan relevan. Masing-masing aspek memerlukan kriteria desain khusus, baik berbasis deterministik maupun probabilistik, yang harus dipenuhi oleh PLTN multi-modul dalam proses perizinan dan evaluasi keselamatan.

Kajian ini juga menemukan bahwa regulasi yang ada sudah memadai sebagai dasar, namun belum sepenuhnya mengakomodasi karakteristik desain multi-modul. Karena itu, diperlukan penyempurnaan regulasi dan pedoman teknis, terutama dalam hal berikut:

- a) Penentuan parameter desain terhadap bahaya eksternal;
- c) Pengelompokan PIE dan kategori kecelakaan untuk kondisi multi-modul;
- d) Metodologi evaluasi kestabilan geoteknik dan struktur Bersama;
- e) Analisis bahaya vulkanik dan KAUM yang mempertimbangkan konfigurasi multi-modul;
- f) Penyusunan kesiapsiagaan dan penanggulangan darurat yang sesuai dengan konfigurasi multi-modul.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 112 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Hasil akhir kajian ini berupa rekomendasi kriteria keberterimaan desain yang dapat digunakan oleh Direktorat Perizinan Instalasi Bahan Nuklir dan Direktorat Pengaturan Pengawasan Instalasi dan Bahan Nuklir Bapeten sebagai dasar pengembangan regulasi baru maupun revisi regulasi existing untuk mendukung pengawasan PLTN multi-modul di Indonesia. Selain itu, kajian ini meningkatkan kapasitas teknis P2STPIBN sebagai internal TSO dalam mendukung pengaturan, perizinan, dan inspeksi pada era penerapan teknologi SMR di Indonesia.

4.2. Rekomendasi

Berdasarkan kegiatan kajian keselamatan desain PLTN Multi-Modul terhadap Bahaya Eksternal ini diperoleh beberapa rekomendasi sebagai berikut.

A. Rekomendasi Kebijakan untuk Direktorat Perizinan Instalasi Bahan Nuklir (DPIBN)

1. Persyaratan Evaluasi Tapak Khusus PLTN Multi-Modul

DPIBN perlu mewajibkan pemohon PLTN multi-modul untuk menyampaikan evaluasi tapak terintegrasi yang mencakup:

- Analisis bahaya eksternal yang mempertimbangkan penggunaan bersama struktur, sistem dan komponen antar modul;
- Interaksi antar modul terhadap kegagalan berantai;
- Analisis gabungan kejadian multi-hazard (misal gempa yang memicu likuifaksi sehingga mengakibatkan kegagalan struktur bersama).

2. Penetapan Parameter Dasar Desain

DPIBN harus mewajibkan penetapan parameter desain spesifik multi-modul, termasuk:

- PGA khusus tapak multi-modul (menyesuaikan SNI 1726:2019);
- Parameter bahaya vulkanik probabilistik (abu, piroklastik, rudal vulkanik);
- Parameter KAUM (pesawat jatuh, ledakan, tabrakan kapal, fluida berbahaya) berbasis pendekatan deterministik dan probabilistik.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 113 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

3. Persyaratan Analisis Kategori Kecelakaan Multi-Modul

Mengacu pada Perka 3/2011, pemohon harus:

- Mendefinisikan PIE khusus multi-modul untuk geoteknik, vulkanologi, dan KAUM;
- Mengelompokkan PIE ke kategori AOO, DBA, dan BDBA dengan mempertimbangkan kemungkinan satu modul mempengaruhi modul lain;
- Menyediakan analisis *intermodular accident progression*;

4. Kriteria Keberterimaan untuk Sistem Keselamatan Bersama

DPIBN perlu mewajibkan pemohon untuk membuktikan:

- sistem, struktur dan komponen bersama tetap berfungsi saat satu modul mengalami kecelakaan;
- redundansi dan independensi keselamatan tidak terganggu oleh arsitektur multi-modul;
- potensi “*single failure*” pada struktur bersama tidak menyebabkan kegagalan fungsi keselamatan pada modul lain.

5. Persyaratan Dokumen Pemantauan Tapak Berkelanjutan

DPIBN perlu menguatkan bahwa pemegang izin wajib menyediakan program pemantauan tapak untuk:

- pergerakan tanah, penurunan diferensial, kondisi hidrogeologi;
- aktivitas vulkanik regional; dan
- perubahan tata guna lahan terkait KAUM.

6. Penguatan Persyaratan Kesiapsiagaan Darurat Multi-Modul

DPIBN perlu mengintegrasikan hasil kajian dengan Perka Nomor 1/2010:

- Satu modul dapat masuk kelas kedaruratan berbeda dari modul lain, harus ada *scenario-based emergency planning*;
- Zona perlindungan darurat harus mempertimbangkan total inventori multi-modul.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 114 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

B. Rekomendasi Kebijakan untuk Direktorat Pengaturan Pengawasan Instalasi Bahan Nuklir (DP2IBN)

1. Penyusunan Peraturan Khusus Evaluasi Desain PLTN Multi-Modul

DP2IBN perlu menyusun atau merevisi regulasi untuk mengisi gap/kekosongan mengenai:

- definisi formal multi-modul dalam regulasi nasional;
- kriteria keselamatan desain khusus multi-modul;
- batasan minimum independensi antar modul (electrical, cooling, I&C);
- Regulasi perlu selaras dengan standar IAEA SSR-2/1 dan SSG-68.

2. Integrasi *Multi Hazard Approach* dalam Regulasi Tapak

Berdasarkan Perba 4/2018, Perba 4/2008, Perba 5/2015, dan Perba 6/2019, DP2IBN perlu mengembangkan ketentuan yang lebih spesifik terkait:

- bahaya kombinasi (*compound and cascading hazards*);
- metode analisis probabilistik *multi-hazard*;
- standarisasi teknik penapisan (*screening*) bahaya eksternal untuk multi-modul.

3. Penetapan Kriteria Keberterimaan (Acceptance Criteria)

DP2IBN perlu menetapkan kriteria terukur bagi PLTN multi-modul, meliputi:

- batas toleransi penurunan tanah untuk struktur bersama;
- batas ketebalan jatuhan abu yang masih dapat diterima;
- batas probabilitas KAUM (cut-off $<10^{-7}$ per tahun);
- kriteria kegagalan maksimum pada sistem bersama tanpa menyebabkan efek domino.

4. Penyusunan Pedoman Teknis Evaluasi Desain (Regulatory Guide)

Perlu diterbitkan pedoman rinci mengenai hal berikut.

- Evaluasi interaksi tanah–struktur multi-modul.
- Evaluasi kestabilan kolam reaktor bersama.
- Evaluasi probabilistik seismik untuk multi-modul (mengacu SSG-89).
- Pedoman PIE untuk multi-modul.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 115 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

5. Harmonisasi dengan Standar Nasional Indonesia

DP2IBN perlu mengintegrasikan SNI 1726:2019 dan SNI 8460:2017 ke dalam regulasi nuklir, khususnya:

- penetapan parameter seismik tapak;
- persyaratan investigasi geoteknik minimum;
- perbaikan tanah wajib untuk kondisi high risk.

6. Pembentukan Ketentuan Kesiapsiagaan Darurat Khusus Multi-Modul

Peraturan perlu untuk mengatur:

- skema kedaruratan multi-level antar modul;
- batasan dosis terpadu berdasarkan total inventori seluruh modul;
- prosedur pemadaman dan mitigasi yang tidak dapat dilakukan serempak bila beberapa modul terdampak.

C. Rekomendasi Kebijakan Umum

- Pembentukan kerangka regulasi berbasis risiko dengan mengadopsi pendekatan PSA dan probabilistik multi hazard untuk seluruh evaluasi PLTN multi-modul;
- Pembaruan terintegrasi regulasi desain & tapak. Regulasi tapak perlu terhubung langsung dengan regulasi desain agar parameter tapak otomatis menjadi dasar keselamatan desain;
- Penguatan peran TSO. Perlu ada mekanisme resmi bahwa semua permohonan desain multi-modul wajib memperoleh kajian teknis TSO sebelum persetujuan;
- Pengembangan database nasional bahaya eksternal untuk PLTN untuk meningkatkan konsistensi penilaian antara pemohon dan regulator.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 116 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

DAFTAR PUSTAKA

Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 8460:2017 persyaratan perancangan geoteknik*. Jakarta: BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 1726:2019 tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non-gedung*. Jakarta: BSN.

Berg, H.-P. (2011). Risk assessment of aircraft crash onto a nuclear power plant. *RT&A*, 2, 38–51.

Cederlof, N. (2024). *Probabilistic risk assessment modeling for multi-module small modular reactors*. Aalto University, Finland.

Federal Agency for Nuclear Control. (2015). *Class I guidances: Guideline on the categorization and assessment of accidental aircraft crashes in the design of new class I nuclear installations*.

International Atomic Energy Agency. (2002). *External human induced events in site evaluation for nuclear power plants* (Safety Guide No. NS-G-3.1). Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency. (2010). *Development and application of level 1 probabilistic safety assessment for nuclear power plants* (Specific Safety Guide No. SSG-3 Rev. 1). Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency. (2010). *Licensing process for nuclear installations* (Specific Safety Guide No. SSG-12). Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency. (2016). *Design of electrical power systems for nuclear power plants* (Safety Guide No. SSG-34 Rev. 1). Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency. (2016). *Safety assessment for facilities and activities* (Safety Requirements No. GSR Part 4 Rev. 1). Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency. (2016). *Safety of nuclear power plants: Commissioning and operation* (Safety Requirements No. SSR-2/2 Rev. 1). Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency. (2016). *Safety of nuclear power plants: Design* (Safety Requirements No. SSR-2/1 Rev. 1). Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency. (2019). *Site evaluation for nuclear installations* (Safety Requirements No. SSR-1). Vienna: IAEA.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 117 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

International Atomic Energy Agency. (2021). *Design of nuclear installations against external events* (Specific Safety Guide No. SSG-68). Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency. (2023). *Multi-unit probabilistic safety assessment* (Safety Report Series No. SRS-110). Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency. (2024). *Evaluation of seismic safety for nuclear installations* (Safety Guide No. SSG-89). Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency. (2024). *Small modular reactor technology catalogue: A supplement to the advanced reactors information system (ARIS)*. Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency. (2025). *Development and application of level 2 probabilistic safety assessment for nuclear power plants* (Specific Safety Guide No. SSG-4 Rev. 1). Vienna: IAEA.

International Civil Aviation Organization. (2017). *Accident statistics*.

International Civil Aviation Organization. (2017). *Official accidents*.

Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 85.K/TL.01/MEM.L/2025. (2025). *Rencana umum ketenagalistrikan nasional*. Jakarta.

Kobayashi, T. (1988). *Probability of an aircraft crash to a nuclear power plant*.

Peraturan Bapeten Nomor 4 Tahun 2018. (2018). *Ketentuan keselamatan evaluasi tapak instalasi nuklir*. Jakarta.

Peraturan Bapeten Nomor 6 Tahun 2019. (2019). *Evaluasi tapak instalasi nuklir untuk aspek kejadian eksternal akibat ulah manusia*. Jakarta.

Peraturan Kepala Bapeten Nomor 1 Tahun 2010. (2010). *Kesiapsiagaan dan penanggulangan kedaruratan nuklir*. Jakarta.

Peraturan Kepala Bapeten Nomor 3 Tahun 2011. (2011). *Ketentuan keselamatan desain reaktor daya*. Jakarta.

Peraturan Kepala Bapeten Nomor 4 Tahun 2008. (2008). *Evaluasi tapak reaktor daya untuk aspek geoteknik dan pondasi reaktor daya*. Jakarta.

Peraturan Kepala Bapeten Nomor 5 Tahun 2015. (2015). *Evaluasi tapak instalasi nuklir untuk aspek kegunungapian*. Jakarta.

Peraturan Pemerintah Nomor 2 Tahun 2014. (2014). *Perizinan instalasi nuklir dan pemanfaatan bahan nuklir*. Jakarta.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 118 dari 119

	BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR (Bapeten) Jalan Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120 Telp. (021) 63858269 – 70, Fax. (021) 63858275 URL : http://www.bapeten.go.id/
Jenis Rekaman Judul	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Desain PLTN Multi Modul Terhadap Bahaya Eksternal

Peraturan Pemerintah Nomor 54 Tahun 2012. (2012). *Keselamatan dan keamanan instalasi nuklir*. Jakarta.

U.S. Nuclear Regulatory Commission. (n.d.). *NUREG-0800: Standard review plan 3.5.1.6*.

Wall, I. B. (1972). Probabilistic assessment of aircraft risk for nuclear power plants. *Nuclear Safety*, 15(3), 276–284.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/04/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : 119 dari 119