



KEBIJAKAN BIDANG TENAGA NUKLIR

KEGIATAN

REKOMENDASI KEBIJAKAN PENGAWASAN PLTN

SUB KEGIATAN

REKOMENDASI KEBIJAKAN KESELAMATAN

LIMBAH NUKLIR SMR DAN DEKOMISIONING

INSTALASI NUKLIR

TAHUN ANGGARAN 2025

BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR

Jl. Gajah Mada No. 8 Jakarta 10120

Telp. (62-21) 63858269 – 70, Fax. (62-21) 63858275

Dokumen ini ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat 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

	<p align="center"> 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/ </p>
	<p> Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sob judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir </p>

LEMBAR PENGESAHAN

**REKOMENDASI KEBIJAKAN KESELAMATAN
 LIMBAH NUKLIR SMR DAN DEKOMISIONING
 INSTALASI NUKLIR**

00	Paraf & Tanggal	#		
		Taruniyati Handayani	Bintoro Aji	Petit Wiringgalih
	Jabatan	Kepala P2STPIBN	Pelaksana Kegiatan PRD	Ketua Kelompok Kerja
Rev		Disahkan Oleh:	Diperiksa Oleh:	Disusun Oleh:

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

	<p style="text-align: center;"> 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/ </p>
Jenis Rekaman : Judul : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

KONTRIBUTOR

1. Dahlia Cakrawati Sinaga
2. Reno Alamsyah
3. Anggoro Septilarso
4. Rahmad Edhi Harianto
5. Agus Waluyo
6. Angga Kautsar
7. Dewi Novitasari

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2025
Revisi : 0	Hal : iii 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 : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

LEMBAR DISTRIBUSI

No. Salinan Dokumen	Nama Jabatan
4	Deputi Bidang Pengkajian Keselamatan Nuklir
4.2.0	TU Pusat Pengkajian Sistem dan Teknologi Pengawasan Instalasi dan Bahan Nuklir

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

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

	<p style="text-align: center;"> 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/ </p>
Jenis Rekaman : Judul : Sub judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, atas rahmat dan karunia-Nya, laporan rekomendasi kebijakan ini dapat diselesaikan dengan baik. Dokumen ini disusun sebagai bagian dari tanggung jawab Pusat Pengkajian Sistem dan Teknologi Pengawasan Instalasi dan Bahan Nuklir (P2STPIBN) dalam memberikan landasan ilmiah dan teknis bagi penguatan fungsi pengawasan BAPETEN.

Laporan rekomendasi kebijakan ini disusun untuk mengantisipasi proses perizinan pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) dengan reaktor garam cair (*Molten Salt Reactor/MSR*) yang pertama di Indonesia. Kajian mendalam terhadap karakteristik dan strategi pengelolaan limbah radioaktif yang akan dihasilkan dari teknologi baru ini merupakan langkah krusial untuk memastikan keselamatan, keamanan, dan keberlanjutan program ketenaganukliran nasional sejak dari tahap perencanaan sampai dengan implementasinya.

Dengan adanya rekomendasi dalam dokumen ini, diharapkan pemerintah melalui BAPETEN dapat menyusun kerangka pengawasan yang memenuhi standar internasional, selaras dengan peraturan perundang-undangan nasional, dan tetap berpegang pada prinsip pengelolaan limbah radioaktif yang baik, tanpa meninggalkan beban yang tidak semestinya bagi generasi mendatang. Hal ini sejalan dengan komitmen Indonesia pada *Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management*.

Penyusunan laporan ini merupakan hasil kerja keras dan dedikasi tim. Kami menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang tulus kepada seluruh tim penyusun, narasumber, dan pihak yang telah berkontribusi dengan penuh komitmen dalam

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sub judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

penyusunan laporan ini. Semangat kolaborasi dan keahlian yang diberikan telah menjadi modal berharga dalam menyelesaikan kajian yang kompleks ini.

Semoga rekomendasi kebijakan ini dapat bermanfaat bagi BAPETEN dan para pemangku kepentingan dalam memperkuat sistem regulasi keselamatan nuklir Indonesia. Kami menyadari bahwa dalam proses penyusunan masih terdapat keterbatasan, untuk itu saran dan masukan yang konstruktif sangat diharapkan untuk penyempurnaan dokumen ini ke depan.


Jakarta, 31 Desember 2025

Kepala P2STPIBN,



Taruniyati Handayani

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


	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

RINGKASAN EKSEKUTIF

Laporan ini memberikan analisis komprehensif tentang kesiapan hukum dan pengawasan Indonesia untuk mengelola limbah radioaktif dari Reaktor Garam Cair (*Molten Salt Reactor/MSR*) komersial pertama di Indonesia, seperti yang diusulkan yaitu ThorCon TMSR-500. Penilaian ini didasarkan pada tinjauan terhadap standar keselamatan internasional, khususnya *Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management*, dan persyaratan keselamatan seperti GSR Part 5 (*Predisposal Management of Radioactive Waste*), SSR-5 (*Disposal of Radioactive Waste*), dan NW-G-1.1 (*Policies and Strategies for Radioactive Waste Management*), serta mengacu pada karakteristik teknis unik dari aliran limbah MSR, yang pada dasarnya berbeda dari reaktor air ringan konvensional. Tantangan inti berasal dari sifat baru limbah MSR, yang meliputi garam bahan bakar bekas yang reaktif secara kimia dan penghasil panas, moderator grafit teriradiasi yang mengandung radionuklida berumur panjang seperti karbon-14, serta isotop mudah bergerak dalam jumlah signifikan seperti tritium. Karakteristik ini menghadirkan tantangan yang belum pernah ada sebelumnya untuk penanganan yang aman, penyimpanan sementara, dan pembuangan akhir geologis. Oleh karena itu, tujuan utama laporan ini adalah untuk menentukan apakah kerangka perizinan dan pengawasan Indonesia yang ada sudah cukup kuat untuk memastikan pengelolaan limbah maju ini yang aman, dari awal hingga akhir, sehingga melindungi kesehatan masyarakat, lingkungan, dan generasi masa depan sesuai dengan prinsip kesetaraan antargenerasi.

Analisis mengungkapkan beberapa kesenjangan kritis di berbagai tingkat kerangka tata kelola. Di tingkat nasional, Undang-Undang Energi Nuklir Indonesia (No. 10 Tahun 1997) dan revisi rancangannya kekurangan mandat hukum eksplisit untuk rencana pengelolaan limbah radioaktif sebagai bagian dari perizinan fasilitas, mempertahankan

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

sistem klasifikasi limbah berbasis asal usul yang tidak memadai untuk limbah tingkat menengah berumur panjang, serta tidak adanya mekanisme keuangan yang pasti untuk memastikan operator menanggung biaya penuh pengelolaan limbah dan pascaoperasi di masa depan, sehingga berisiko menimbulkan beban tanggung jawab publik. Lebih lanjut, Indonesia belum membuat keputusan strategis definitif mengenai jalur pembuangan akhir untuk limbah tingkat tinggi atau bahan bakar bekas, sebagaimana secara eksplisit disyaratkan oleh NW-G-1.1. Ambiguitas kebijakan ini menciptakan ketidakpastian mendasar bagi regulator maupun pengusaha instalasi nuklir. Di tingkat pengawasan, meskipun BAPETEN memiliki kewenangan umum yang baik, terdapat kekurangan peraturan dan pedoman yang khusus terkait MSR, terutama terkait dengan limbah radioaktif yang dihasilkannya. Aturan yang ada tidak menetapkan kriteria penerimaan limbah yang jelas untuk bentuk limbah radioaktif yang baru seperti garam fluorida yang dipadatkan. Proses perizinan di bawah Peraturan BAPETEN No. 5 Tahun 2025 juga tidak secara eksplisit mewajibkan penyerahan dan persetujuan awal dari rencana pengelolaan limbah radioaktif yang komprehensif. Ketidacukupan pengawasan ini dipersulit oleh profil limbah teknis yang khas yang membutuhkan pengawasan yang proaktif dan khusus, yang kapasitas internal BAPETEN dengan dedikasinya masih harus dibangun.

Untuk mengatasi kesenjangan yang saling terkait ini, diusulkan serangkaian aksi kebijakan terstruktur yang menargetkan semua tingkat tata kelola. Bagi Pemerintah dan DPR, sangat penting untuk mempercepat penerbitan Peraturan Presiden yang definitif tentang Kebijakan dan Strategi Nasional untuk Pengelolaan Limbah Radioaktif dan Bahan Bakar Bekas serta mengubah RUU Energi Nuklir untuk secara eksplisit mewajibkan perencanaan limbah radioaktif terintegrasi dan jaminan keuangan yang pasti dari operator. Bagi BAPETEN, langkah segera harus mencakup pengembangan dan penerbitan peraturan dan pedoman teknis spesifik MSR yang meliputi karakterisasi limbah, pengolahan, dan penyimpanan sementara. Proses perizinan harus diperkuat

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

	<p style="text-align: center;"> 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/ </p>
Jenis Rekaman : Judul : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

secara formal untuk mewajibkan rencana pengelolaan limbah radioaktif yang rinci pada tahap izin konstruksi dan bukti konklusif keamanan keuangan sebelum operasi, bersamaan dengan pembentukan tim khusus dengan keahlian dalam keselamatan limbah reaktor maju. Bagi pemegang izin, ThorCon, persyaratan wajib harus diberlakukan untuk penyerahan rencana pengelolaan limbah radioaktif yang komprehensif dan sepenuhnya didanai yang menunjukkan jalur yang kredibel secara teknis dan aman secara finansial untuk semua aliran limbah dari penghasilan hingga pembuangan akhir sebagai keibajak negara di masa depan.

Sebagai kesimpulan, pengawasan limbah MSR saat ini memerlukan peningkatan untuk dapat dengan aman dan selamat untuk bisa mengoperasikan teknologi first-of-a-kind MSR. Landasan dari strategi yang sukses adalah prinsip tanggung jawab siklus hidup terintegrasi, di mana pengelolaan limbah merupakan pertimbangan keselamatan inti dari fase desain awal PLTN. Dengan memperbaiki landasan hukum, penguatan pengawasan, dan peningkatan kapasitas SDM, Indonesia dapat menerapkan pengawasan PLTN yang ketat, memastikan bahwa upaya mengejar energi nuklir dilakukan dengan standar keselamatan, tanggung jawab, dan kepatuhan internasional tertinggi. Untuk itu, perlu tindakan proaktif adalah sekarang, sebelum limbah radioaktif apa pun yang dihasilkannya.


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

	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

DAFTAR ISI

Lembar Pengesahan.....	ii
Lembar Pengantar Pengesahan.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Kontributor	iii
Lembar Distribusi.....	iv
Kata Pengantar.....	v
Ringkasan Eksekutif.....	vii
Daftar Tabel.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Daftar Gambar	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Bab 1 Pendahuluan.....	1
Bab 2 Kerangka Hukum dan Standar Internasional terkait Limbah Radioaktif dan Bahan Bakar Bekas dari MSR.....	3
2.1 Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management.....	3
2.1.1 Prinsip dan Tanggung Jawab Pemerintah.....	3
2.1.2 Kebijakan dan Strategi Nasional	3
2.1.3 Pengelolaan Limbah Radioaktif dan Bahan Bakar Bekas	4
2.1.4 Tanggung Jawab Antar Generasi dan Transparansi	4
2.1.5 Kesimpulan.....	5
2.2 IAEA GSR Part 5 – Predisposal Management of Radioactive Waste	5
2.2.1 Prinsip dan Tanggung Jawab Pemerintah.....	5

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

	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sub judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

2.2.2	Kebijakan dan Strategi Nasional	Kesalahan!	Bookmark	tidak	
					ditentukan.
2.2.3	Persyaratan Hukum dan Peraturan Pengawasan	Kesalahan!	Bookmark		tidak ditentukan.
2.2.4	Pengelolaan Limbah Radioaktif				7
2.2.5	Transparansi dan Keadilan Antar Generasi				7
2.2.6	Kesimpulan.....				8
2.3	IAEA SSR-5 – Disposal of Radioactive Waste				8
2.3.1	Prinsip dan Tanggung Jawab Pemerintah.....				8
2.3.2	Kebijakan dan Strategi Nasional				9
2.3.3	Persyaratan Hukum dan Peraturan Pengawasan.....				9
2.3.4	Kriteria Keselamatan Pembuangan				10
2.3.5	Perlindungan Lingkungan dan Etika Antar Generasi				11
2.3.6	Kesimpulan.....				11
2.4	IAEA NW-G-1.1 – Policies and Strategies for Radioactive Waste Management				11
2.4.1	Prinsip dan Tanggung Jawab Pemerintah.....				11
2.4.2	Kebijakan dan Strategi Nasional				12
2.4.3	Prinsip-Prinsip Umum Pengelolaan Limbah				12
2.4.4	Penerapan Berdasarkan Tahap Program Nuklir				13
2.4.5	Prinsip Etika dan Keterlibatan Publik				14
2.4.6	Kesimpulan Singkat.....				14
Bab 3	Identifikasi limbah MSR				15

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	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 :	Rekaman Unit Kerja
Judul :	Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN
Sob judul :	Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

3.1	Limbah Bahan Bakar Bekas.....	15
3.2	Limbah Grafit.....	18
3.3	Limbah Logam Teraktivasi.....	20
3.4	Limbah Dekomisioning	23
Bab 4	Opsi Teknologi dan Strategi Penanganan Limbah MSR.....	25
4.1	Limbah Bahan Bakar Bekas.....	26
4.1.1	Karakteristik Penting dan Persyaratan Pembuangan	26
4.1.2	Strategi Pembuangan	27
4.1.3	Strategi Pengolahan dan Imobilisasi.....	28
4.1.4	Tantangan operasional dan penyimpanan.....	29
4.1.5	Kesenjangan Pengetahuan dan Kebutuhan Riset ke Depan	29
4.2	Limbah Grafit.....	30
4.2.1	Karakteristik Penting dan Persyaratan Pembuangan	30
4.2.2	Strategi Pembuangan	32
4.2.3	Strategi Pengolahan	33
4.2.4	Tantangan	34
4.2.5	Kesenjangan Pengetahuan dan Kebutuhan Riset.....	35
4.3	Limbah Logam Teraktivasi.....	36
4.3.1	Karakteristik Penting dan Persyaratan Pembuangan	37
4.3.2	Strategi Pembuangan	39
4.3.3	Strategi Pengolahan	39
4.3.4	Tantangan	40
4.3.5	Kesenjangan Pengetahuan dan Kebutuhan Riset.....	41

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	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 : Sub judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

4.4	Limbah Dekomisioning	43
4.4.1	Karakteristik Penting dan Persyaratan Pembuangan	44
4.4.2	Strategi Pembuangan	45
4.4.3	Strategi Pengolahan	46
4.4.4	Tantangan	47
4.4.5	Kesenjangan Pengetahuan dan Kebutuhan Riset.....	49
Bab 5	Rekomendasi Kebijakan Penanganan Limbah MSR.....	51
Bab 6	kesimpulan.....	57
	Daftar Pustaka.....	59

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	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 : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

BAB 1 PENDAHULUAN


Pemerintah Indonesia saat ini tengah mempertimbangkan pemanfaatan energi nuklir sebagai bagian dari bauran energi nasional. Di antara berbagai vendor teknologi reaktor, ThorCon telah melakukan konsultasi dengan BAPETEN terkait proses perizinan pembangunan reaktor TMSR-500 di Pulau Gelasa, Provinsi Kepulauan Bangka Belitung. Pada tanggal 13 Februari 2025, ThorCon secara resmi telah menyerahkan program evaluasi tapak untuk mendapatkan persetujuan dari BAPETEN sebagai langkah awal dalam proses perizinan pembangunan PLTN yang meliputi izin tapak, izin konstruksi, izin komisioning, dan izin operasi.

Reaktor garam cair (Molten Salt Reactor/MSR) merupakan teknologi pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) generasi keempat yang menerapkan keselamatan pasif. TMSR-500 sendiri merupakan teknologi PLTN First-of-a-Kind (FOAK) yang akan dibangun di Indonesia. Teknologi ini memerlukan kajian desain yang mendalam, khususnya dalam aspek keselamatan, keamanan, dan garda aman. Selain itu, MSR menghasilkan berbagai jenis limbah radioaktif yang kompleks, sementara infrastruktur pengelolaan limbah radioaktif dan bahan bakar nuklir bekas di Indonesia masih dalam tahap pengembangan. Hingga saat ini, belum ada negara yang memiliki pengalaman dalam pengelolaan limbah MSR secara komprehensif.

Oleh karena itu, sangat penting bagi BAPETEN untuk menyusun rekomendasi teknis yang dapat mengantisipasi pengelolaan limbah radioaktif dan bahan bakar bekas dari TMSR-500, mengingat Indonesia belum memiliki rujukan langsung dari pengalaman negara lain. Hal ini sejalan dengan panduan IAEA (GSR Part 5 dan SSR-5) yang menekankan perlunya kebijakan dan strategi nasional dalam pengelolaan limbah radioaktif dan bahan bakar bekas, guna memastikan keselamatan, efektivitas teknis, dan

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 1 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
	<p>Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sub judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir</p>


efisiensi biaya dalam jangka panjang. Tanpa adanya kebijakan dan strategi yang matang, pengelolaan limbah cenderung bersifat reaktif dan tidak berkelanjutan, serta berpotensi menimbulkan beban yang tidak semestinya bagi generasi mendatang, seperti yang ditegaskan pula dalam Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management Pasal 11(vii), yang menyatakan bahwa setiap negara harus menghindari tindakan yang menimbulkan beban yang tidak semestinya bagi generasi masa depan.

Dokumen ini secara umum bertujuan untuk memberikan landasan teknis bagi BAPETEN dalam merumuskan kerangka regulasi yang sesuai untuk pengelolaan limbah dari reaktor MSR ThorCon. Adapun tujuan rekomendasi teknis ini adalah untuk:

1. Memberikan panduan kebijakan kepada BAPETEN terkait pengelolaan limbah MSR ThorCon, dengan mempertimbangkan aspek keselamatan, kesiapan teknologi, serta standar internasional;
2. Menyusun kerangka regulasi nasional yang dapat diterapkan untuk limbah MSR, selaras dengan standar IAEA, praktik terbaik internasional, serta kebijakan nasional pengelolaan limbah radioaktif;
3. Memastikan bahwa regulasi tidak membebani operator, namun tetap menjamin keselamatan jangka panjang dan mencegah beban risiko bagi generasi mendatang.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 2 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
	<p>Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sob judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir</p>

BAB 2 KERANGKA HUKUM DAN STANDAR INTERNASIONAL TERKAIT LIMBAH RADIOAKTIF DAN BAHAN BAKAR BEKAS DARI MSR

Dalam bab ini dijelaskan mengenai kerangka hukum dan standar internasional yang terkait dengan limbah radioaktif dan bahan bakar bekas dari molten salt reactor (MSR).

2.1 Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management

2.1.1 Prinsip dan Tanggung Jawab Pemerintah

Joint Convention menetapkan tanggung jawab utama pada pemerintah negara peserta untuk memastikan keselamatan dalam pengelolaan bahan bakar nuklir bekas dan limbah radioaktif. Pasal 4 Joint Convention menyatakan:

“Each Contracting Party shall take the appropriate steps to ensure that at all stages of spent fuel management, individuals, society and the environment are adequately protected against radiological hazards.”


Hal tersebut menunjukkan bahwa setiap negara harus mengembangkan sistem pengawasan dan tata kelola yang mampu menjamin keselamatan daur bahan nuklir dari bahaya radiologis.

2.1.2 Kebijakan dan Strategi Nasional

Joint Convention secara eksplisit menekankan pentingnya kebijakan dan strategi nasional. Pasal 19 Joint Convention menyebutkan perlunya kerangka hukum, institusi

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 3 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

pengawas, dan sistem perizinan yang efektif sebagai bagian dari penguatan pengelolaan limbah:

“Each Contracting Party shall establish and maintain a legislative and regulatory framework to govern the safety of spent fuel and radioactive waste management.”

Joint Convention mengisyaratkan bahwa keberadaan PLTN seperti *Molten Salt Reactor* (MSR) memerlukan kerangka kebijakan yang tidak hanya adaptif tetapi juga mampu mengantisipasi risiko baru.

2.1.3 Pengelolaan Limbah Radioaktif dan Bahan Bakar Bekas

Pasal 11 Joint Convention menjadi salah satu pasal paling relevan untuk perumusan strategi jangka panjang:

“Each Contracting Party shall take the appropriate steps to:
(ii) ensure that the generation of radioactive waste is kept to the minimum practicable;
(iii) take into account interdependencies among the different steps in radioactive waste management.”


Hal ini menjadi dasar untuk perencanaan menyeluruh yang memperhatikan keterkaitan antara penyimpanan, pengolahan, dan pembuangan akhir.

2.1.4 Tanggung Jawab Antar Generasi dan Transparansi

Pasal 4 (vii) Joint Convention menyampaikan prinsip etika:

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 4 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
	<p>Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sob judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir</p>

aim to avoid imposing undue burdens on future generations.”

Artinya, semua strategi dan kebijakan harus bertujuan untuk menyelesaikan persoalan limbah dalam generasi yang sama yang menghasilkan limbah tersebut, dan tidak mewariskan beban ke masa depan.

2.1.5 Kesimpulan

Joint Convention menegaskan pentingnya kerangka hukum dan kebijakan nasional dalam menjamin keselamatan pengelolaan limbah radioaktif dan bahan bakar bekas. Dalam konteks pengembangan PLTN seperti MSR ThorCon, konvensi ini menggarisbawahi bahwa negara wajib menyusun sistem regulasi dan pengawasan sejak dini untuk mencegah terjadinya beban jangka panjang terhadap lingkungan dan generasi mendatang.

2.2 IAEA GSR Part 5 – Predisposal Management of Radioactive Waste

2.2.1 Prinsip dan Tanggung Jawab Pemerintah


GSR Part 5 mewajibkan pembentukan kerangka hukum dan peraturan pengawasan yang memadai untuk memastikan implementasi kebijakan:

“Requirement 1: Legal and regulatory framework

The government shall provide for an appropriate national legal and regulatory framework within which radioactive waste management activities can be planned and safely carried out. This shall include the clear and unequivocal allocation of responsibilities, the securing of financial and other resources, and the provision of independent regulatory functions. Protection shall also be

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 5 dari 62

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

	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

provided beyond national borders as appropriate and necessary for neighbouring States that may be affected.”

Oleh karena itu Pemerintah harus mengatur kerangka hukum dan pemerintahan serta pembagian tanggung jawab yang sesuai antara BAPETEN selaku badan pengawas dan operator pengelola fasilitas limbah MSR.

GSR Part 5 juga menetapkan bahwa negara bertanggung jawab untuk menjamin keselamatan pada seluruh tahapan pengelolaan limbah radioaktif sebelum pembuangan akhir (predisposal), termasuk pengumpulan, pemrosesan, pengkondisian, penyimpanan, dan transportasi. Dokumen ini menekankan tanggung jawab nasional dalam mendefinisikan, menerapkan, dan mengawasi sistem keselamatan. Selain itu, GSR Part 5 secara tegas mewajibkan setiap negara untuk memiliki kebijakan dan strategi pengelolaan limbah radioaktif:

“Requirement 2: National policy and strategy on radioactive waste management

To ensure the effective management and control of radioactive waste, the government shall ensure that a national policy and a strategy for radioactive waste management are established. The policy and strategy shall be appropriate for the nature and the amount of the radioactive waste in the State, shall indicate the regulatory control required, and shall consider relevant societal factors.”

Kebijakan tersebut harus sejalan dengan prinsip keselamatan dasar dan memperhatikan ketentuan standar IAEA serta komitmen internasional. Strategi nasional ini menjadi kerangka dasar bagi pengembangan sistem perizinan, perencanaan fasilitas, dan pengawasan operasional, terutama dalam menghadapi teknologi FOAK seperti MSR ThorCon.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 6 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
	<p>Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sob judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir</p>

2.2.2 Pengelolaan Limbah Radioaktif

GSR Part 5 menjabarkan secara rinci prinsip-prinsip keselamatan teknis dalam seluruh proses predisposal, termasuk keterkaitan antar tahapan:

*“Requirement 9: Characterization and classification of radioactive waste
 At various steps in the predisposal management of radioactive waste, the radioactive waste shall be characterized and classified in accordance with requirements established or approved by the regulatory body.”*

Kegiatan predisposal mencakup karakterisasi limbah, klasifikasi, pengolahan, pengkondisian, penyimpanan, dan pengangkutan. Untuk desain MSR seperti ThorCon yang menghasilkan berbagai limbah radioaktif, mulai dari berbentuk garam cair bekas (*spent salt*) dan gas radioaktif (*off-gas*), dengan penekanan pada kebutuhan karakterisasi pada setiap jenis limbah.


2.2.3 Transparansi dan Keadilan Antar Generasi

GSR Part 5 juga menekankan pentingnya keterbukaan informasi dan keberlanjutan jangka panjang dalam manajemen limbah:

“2.2 To meet the safety objective, in considering options for the management of radioactive waste, due consideration has to be given to the protection of workers, the public (including future generations) and the environment.”

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 7 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
	<p>Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sob judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir</p>

Hal ini menunjukkan bahwa strategi pengelolaan limbah MSR ThorCon harus memperhitungkan dampak jangka panjang dan tanggung jawab terhadap generasi mendatang, termasuk dalam pengambilan keputusan pembuangan akhir.

2.2.4 Kesimpulan

GSR Part 5 relevan sebagai kerangka persyaratan keselamatan utama dalam mengelola limbah radioaktif yang dihasilkan dari Molten Salt Reactor (MSR) karena dokumen ini menetapkan prinsip dan persyaratan mendasar untuk seluruh tahap pengelolaan limbah sebelum pembuangan akhir (predisposal), yang berlaku untuk semua jenis limbah dan fasilitas nuklir, termasuk reaktor generasi baru seperti MSR. Standar IAEA ini mewajibkan karakterisasi dan klasifikasi limbah (Pasal 4.10-4.12), yang krusial bagi limbah MSR yang mungkin memiliki bentuk kimia dan fisika unik (seperti garam cair teriradiasi), serta menetapkan persyaratan untuk pengolahan, penyimpanan sementara, dan transportasi yang aman dengan pendekatan bertingkat sesuai bahaya. Selain itu, GSR Part 5 menekankan prinsip perlindungan generasi sekarang dan mendatang dan perlunya strategi nasional yang menjadi pertimbangan penting, mengingat kemungkinan limbah MSR memerlukan periode penyimpanan atau isolasi jangka panjang sebelum pembuangan akhir tersedia.

2.3 IAEA SSR-5 – Disposal of Radioactive Waste

2.3.1 Prinsip dan Tanggung Jawab Pemerintah

SSR-5 menekankan bahwa pembuangan limbah radioaktif adalah bagian dari tanggung jawab jangka panjang pemerintah dalam memastikan keselamatan publik dan perlindungan lingkungan. Ini merupakan kelanjutan dari pengelolaan predisposal (GSR Part 5), dengan fokus pada pembuangan akhir (final disposal):

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 8 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
	<p>Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sob judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir</p>

“Requirement 1: Government responsibilities

The government is required to establish and maintain an appropriate governmental, legal and regulatory framework for safety within which responsibilities shall be clearly allocated for disposal facilities for radioactive waste to be sited, designed, constructed, operated and closed.”

Ini berarti, dalam konteks Indonesia, pemerintah harus menyusun kerangka kebijakan yang mencakup pembuangan akhir limbah MSR ThorCon, termasuk jika diperlukan fasilitas khusus (*specialized repository*) untuk karakteristik limbah yang khusus.

2.3.2 Kebijakan dan Strategi Nasional

SSR-5 memperjelas bahwa kebijakan dan strategi tidak hanya diperlukan dalam pengelolaan, tetapi juga secara spesifik untuk pembuangan limbah, termasuk yang mengandung radionuklida jangka panjang (*long-lived*):

“3.7. (a) Defining the national policy for the long term management of radioactive waste of different types”

Hal ini sangat penting bagi Indonesia yang sedang berada pada fase awal program PLTN. Penentuan kebijakan sejak dini akan mencegah permasalahan pengelolaan limbah nuklir di masa mendatang.

2.3.3 Persyaratan Hukum dan Peraturan Pengawasan

SSR-5 mengharuskan adanya sistem perizinan dan pengawasan khusus untuk fasilitas pembuangan limbah:

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 9 dari 62

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

	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

“3.8. The regulatory body has to develop regulatory requirements specific to each type of disposal facility for radioactive waste, including each type that is envisaged, on the basis of national policy and with due regard to the safety objective and criteria”

Artinya, BAPETEN perlu mempersiapkan sistem perizinan yang mencakup izin pembangunan, operasi, penutupan, dan pasca-penutupan untuk fasilitas pembuangan limbah MSR, baik sementara maupun permanen.

2.3.4 Kriteria Keselamatan Pembuangan

Salah satu inti SSR-5 adalah standar keselamatan jangka panjang untuk fasilitas pembuangan, termasuk perlindungan pasca-penutupan:


“Requirement 12: Preparation, approval and use of the safety case and safety assessment for a disposal facility

A safety case and supporting safety assessment shall be prepared and updated by the operator, as necessary, at each step in the development of a disposal facility, in operation and after closure. The safety case and supporting safety assessment shall be submitted to the regulatory body for approval. The safety case and supporting safety assessment shall be sufficiently detailed and comprehensive to provide the necessary technical input for informing the regulatory body and for informing the decisions necessary at each step.”

Hal ini menegaskan pentingnya justifikasi ilmiah dan teknis dari operator (ThorCon), yang kemudian harus dievaluasi secara menyeluruh oleh BAPETEN.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 10 dari 62

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 : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

2.3.5 *Perlindungan Lingkungan dan Etika Antar Generasi*

SSR-5 kembali menegaskan prinsip etika internasional bahwa pembuangan limbah harus melindungi generasi mendatang:

“2.4 ... disposal facilities are to be developed in such a way that people and the environment are protected both now and in the future”

Dengan karakteristik limbah MSR yang dapat mengandung radionuklida berumur panjang, prinsip tersebut menjadi sangat penting bagi Indonesia.

2.3.6 *Kesimpulan*

SSR-5 memberikan panduan komprehensif mengenai pembuangan akhir limbah radioaktif, yang sangat relevan bagi Indonesia dalam merancang strategi jangka panjang untuk limbah dari reaktor MSR ThorCon. SSR-5 menekankan bahwa kebijakan pembuangan harus dirancang sejak awal, dengan penekanan pada perlindungan jangka panjang dan kerangka perizinan yang transparan. SSR-5 juga menggarisbawahi tanggung jawab etis negara untuk tidak mewariskan risiko tak terselesaikan kepada generasi berikutnya.

2.4 **IAEA NW-G-1.1 – Policies and Strategies for Radioactive Waste Management**

2.4.1 *Prinsip dan Tanggung Jawab Pemerintah*

NW-G-1.1 memberikan panduan kepada negara anggota IAEA dalam menyusun dan mengimplementasikan kebijakan dan strategi nasional. Ditekankan bahwa tanggung jawab akhir atas pengelolaan limbah radioaktif berada di tangan pemerintah:

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 11 dari 62

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

	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

“Governments should also ensure that arrangements are implemented for the safe long term management of radioactive waste.”

Dalam konteks Indonesia, ini berarti pemerintah harus menetapkan arah kebijakan yang jelas untuk limbah MSR seperti ThorCon sejak tahap perencanaan teknologi.

2.4.2 Kebijakan dan Strategi Nasional

NW-G-1.1 membedakan secara gamblang antara *policy* dan *strategy*:

“Ideally, countries should have a national policy and a technical strategy, or strategies, for the management of radioactive waste. The two components are linked - the policy establishes the principles for radioactive waste management and the strategy contains the approaches for the implementation of the policy.”

Kebijakan berfungsi sebagai arah normatif (apa yang ingin dicapai), sedangkan strategi adalah rencana aksi konkret (bagaimana mencapainya). Bagi Indonesia yang sedang merintis program PLTN, dokumen ini menjadi acuan utama dalam menyusun dua dokumen kunci tersebut secara paralel.


2.4.3 Prinsip-Prinsip Umum Pengelolaan Limbah

IAEA menyarankan agar kebijakan dan strategi mengacu pada prinsip-prinsip keselamatan fundamental, antara lain:

- Justifikasi;
- Optimalisasi perlindungan;

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 12 dari 62

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

	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sub judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

- Batas dosis dan kontrol pelepasan radioaktif;
- Pencegahan beban yang tidak semestinya kepada generasi masa depan.

Hal ini dijelaskan dalam dokumen NW-G-1.1 sebagai berikut:

“The national policy for spent fuel and radioactive waste management may need to be updated to improve parts of the policy based on experience of its application and to reflect the changing circumstances in the country and in the world.”

Hal ini selaras dengan tuntutan penyusunan kebijakan untuk MSR ThorCon yang merupakan reaktor FOAK tanpa preseden global.

2.4.4 Penerapan Berdasarkan Tahap Program Nuklir


NW-G-1.1 menekankan pentingnya menyesuaikan kompleksitas strategi dengan fase pengembangan program nasional:

“The national policy for radioactive waste management should reflect the magnitude and scale of the hazard posed by the waste (a graded approach). While countries having radioactive waste from a large nuclear industry, which might include uranium mining and milling, nuclear fuel production and reprocessing, and nuclear power generation, as well as the institutional use of radioisotopes, may require an elaborate and comprehensive policy for the management of their radioactive waste”

Untuk negara embarking seperti Indonesia, strategi yang disusun harus bersifat bertahap, fleksibel, dan berbasis risiko. Ini menjadi dasar penting dalam penetapan

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 13 dari 62

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

	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sub judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

kebijakan terkait *interim storage*, pengolahan *off-gas*, dan pembuangan akhir *spent salt* dari MSR.

2.4.5 Prinsip Etika dan Keterlibatan Publik

Sejalan dengan dokumen IAEA lainnya, NW-G-1.1 juga menekankan prinsip etika antar generasi dan transparansi:

“Public participation in decision making: Decisions which may have a potential health, social or environmental impact should be made in consultation with those who may be affected (the regional Aarhus Convention [6])”


Partisipasi pemangku kepentingan dan komunikasi publik juga dianggap sebagai elemen kunci dalam legitimasi kebijakan.

2.4.6 Kesimpulan Singkat

NW-G-1.1 merupakan dokumen rujukan utama bagi negara yang sedang menyusun atau memperbarui kebijakan dan strategi pengelolaan limbah radioaktif. Dokumen ini menetapkan kerangka konseptual yang membedakan antara kebijakan dan strategi, serta prinsip-prinsip keselamatan dan etika yang mendasarinya. Bagi Indonesia yang tengah memproses perizinan PLTN pertama dengan teknologi MSR (ThorCon), panduan ini sangat relevan untuk membangun sistem regulasi yang kokoh, progresif, dan berkelanjutan.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 14 dari 62

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 : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

BAB 3 IDENTIFIKASI LIMBAH MSR

Operasi reaktor spektrum termal berbahan bakar garam cair (MSR) yang menggunakan garam fluorida dan siklus bahan bakar sekali pakai menghasilkan beberapa aliran limbah yang berbeda. Berbeda dengan reaktor air ringan (LWR) berbahan bakar padat konvensional, sifat limbah MSR berasal dari konfigurasi bahan bakar fluida, interaksi langsung produk fisi dengan material sistem, dan suhu operasi yang tinggi. Memahami karakteristik fisik, kimia, dan radiologi dari aliran limbah ini sangat penting untuk menginformasikan kebijakan regulasi masa depan, strategi pembuangan, dan peningkatan desain.

Bab ini memberikan tinjauan teknis rinci tentang enam kategori utama limbah MSR:

1. Garam bahan bakar bekas;
2. Limbah grafit;
3. Limbah logam teraktivasi; dan
4. Limbah dekomisioning.


Setiap bagian menyajikan karakterisasi asal limbah, inventaris radionuklida utama, mekanisme degradasi material, dan sifat-sifat yang relevan untuk klasifikasi, transportasi, dan penyimpanannya.

3.1 Limbah Bahan Bakar Bekas

Pada reaktor spektrum termal berbahan bakar cair garam cair (MSR) seperti TMSR-500, garam bahan bakar bekas merupakan aliran limbah beraktivitas tinggi yang paling menonjol. Berbeda dengan reaktor air ringan (LWR) konvensional yang menggunakan batang bahan bakar tetap dilapisi paduan zirkonium, MSR beroperasi dengan bahan fisil yang dilarutkan dalam garam fluorida cair yang bersirkulasi—biasanya campuran LiF-

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 15 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
	<p>Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sob judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir</p>

BeF₂-ZrF₄-UF₄. Garam bahan bakar ini berfungsi sebagai bahan bakar dan pendingin, menciptakan profil limbah radiologi dan kimia yang unik pada akhir masa operasinya [150, hal. 10; 154].


Garam bekas mengakumulasi berbagai radionuklida melalui fisi berkelanjutan dan aktivasi neutron. Produk fisi meliputi lantanida terlarut (mis., Nd, Ce, La), logam alkali dan alkali tanah (mis., Cs, Rb, Sr, Ba), logam transisi (mis., Mo, Ru, Rh, Pd), dan halida volatil (mis., I, Br). Aktinida minor seperti Np, Am, dan Cm juga dapat menumpuk tergantung pada spektrum neutron dan pemanfaatan bahan bakar. Radionuklida ini ada dalam berbagai bentuk kimia—spesi ionik, logam, dan kompleks—yang mengubah perilaku termodinamika garam seiring waktu [151, hal. 29–31; 152, hal. 97].

Produk fisi volatil dan semi-volatil seperti gas mulia (Xe, Kr), iodin, telurium, dan sesium menunjukkan interaksi kompleks dengan garam dan komponen internal reaktor. Sementara gas mulia sebagian besar lolos ke sistem gas buang, yang lain tetap terlarut sebagian atau mengendap pada permukaan yang lebih dingin, berkontribusi pada distribusi aktivitas yang heterogen. Interaksi ini menghasilkan profil radiologi dan kimia yang berlapis, terutama di sekitar penukar panas dan zona mati dalam loop reaktor [149, hal. 2; 152, hal. 98].

Komposisi garam yang terus berkembang memengaruhi sifat material utama. Penambahan produk fisi dan korosi mengubah viskositas, konduktivitas listrik, densitas, dan potensial redoks garam. Logam mulia seperti Mo, Ru, dan Pd dapat mengendap sebagai partikel tidak larut, memengaruhi sedimentasi dan dinamika aliran. Sebaliknya, fluorida lantanida tetap larut tetapi berkontribusi pada perubahan penyerapan neutron dan kapasitas termal [151, hal. 31–33].

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 16 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
	<p>Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sob judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir</p>

Isotop fisil sisa—termasuk ^{235}U , ^{233}U (dalam siklus berbasis torium), dan plutonium hasil breeding—tetap ada dalam garam pada akhir masa operasi. Isotop-isotop ini, bersama dengan penyerap neutron kuat seperti lantanida fisi, mendefinisikan profil kritikalitas garam. Karena sifat cair bahan bakar, tidak adanya geometri tetap mengharuskan pemahaman yang kuat tentang koefisien reaktivitas dan bahaya konfigurasi pasca-operasional, terutama saat transisi ke keadaan limbah [150, hal. 7–9].

Karakteristik termal garam bekas didominasi oleh produk fisi berumur menengah dan panjang seperti ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{144}Ce , dan produk aktivasi. Ini berkontribusi pada panas peluruhan tinggi, laju dosis gamma, dan efek radiolitik potensial. Selain itu, titik pemadatan garam yang relatif tinggi (400–500°C) berarti bahwa setelah pendinginan, bahan bakar akan memadat di tempat dalam pipa atau wadah penyimpanan, memengaruhi pemeliharaan dan pengambilan pasca-shutdown [151, hal. 30–31].

Produk korosi yang berasal dari material struktural reaktor (mis., Ni, Cr, Fe) juga masuk ke dalam garam seiring waktu. Ini dapat membentuk fluorida kompleks atau koloid logam yang memengaruhi daya tahan kimia dan perilaku fase garam limbah. Kromium khususnya berpartisipasi dalam reaksi redoks, menstabilkan atau mendestabilisasi spesies garam utama tergantung pada kondisi elektrokimia sistem. Jalur korosi ini tidak hanya berkontribusi pada degradasi material tetapi juga meningkatkan kompleksitas matriks limbah [152, hal. 100; 155, hal. 66].

Secara ringkas, garam bahan bakar bekas dalam MSR berbasis fluorida adalah campuran multiphase yang sangat dinamis, terdiri dari residu fisil, beragam produk fisi dan aktivasi, serta spesies hasil korosi. Limbah ini berbeda secara fundamental dari bahan bakar nuklir bekas (SNF) konvensional dalam bentuk dan perilakunya, dengan aktivitas radiologi tinggi, reaktivitas kimia, dan keluaran termal. Atribut ini

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 17 dari 62

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

	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

menjadikannya bentuk limbah unik yang memerlukan integrasi awal penanganan limbah, imobilisasi, dan analisis keselamatan ke dalam desain dan operasi reaktor.

3.2 Limbah Grafit

Pada reaktor garam cair (MSR) spektrum termal berbasis fluorida, material grafit dan karbon digunakan secara ekstensif sebagai moderator neutron, reflektor, dan penyangga struktural. Dalam desain seperti ThorCon TMSR-500, garam bahan bakar cair bersirkulasi melalui saluran-saluran yang tertanam dalam matriks grafit berukuran besar yang tetap. Paparan langsung terhadap fluks neutron tinggi dan suhu elevasi ini menghasilkan jalur degradasi dan kontaminasi unik yang mendefinisikan karakteristik limbah grafit.

Iradiasi neutron menginduksi perubahan struktural signifikan pada grafit seiring waktu. Neutron cepat menggeser atom karbon dari posisi kisi mereka, menghasilkan cacat titik, loop dislokasi, dan kluster vakansi. Efek ini termanifestasi secara makroskopis sebagai perubahan dimensi anisotropik: penyusutan pada perpindahan atom (dpa) rendah, diikuti oleh pemuaian melebihi ambang batas dpa kritis. Perubahan demikian menurunkan integritas mekanik dan konduktivitas termal, berpotensi menyebabkan retakan atau delaminasi blok moderator [Forsberg, 2024]. Akumulasi kerusakan iradiasi bervariasi secara spasial, dengan degradasi lebih tinggi di daerah fluks neutron termal puncak.

Secara paralel, grafit menjadi teraktivasi secara radiologis. Produk aktivasi paling signifikan adalah karbon-14 (^{14}C), terutama terbentuk melalui reaksi $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ dari impuritas nitrogen jejak dalam matriks grafit. Meskipun upaya meminimalkan nitrogen selama manufaktur, reaksi ini tetap berkontribusi terhadap inventaris ^{14}C berumur panjang, yang memiliki waktu paruh 5.730 tahun dan membentuk spesies radiokarbon

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 18 dari 62

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

	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

mobil dalam kondisi oksidatif. Jalur sekunder adalah reaksi $^{13}\text{C}(n,\gamma)^{14}\text{C}$, yang terjadi bahkan pada grafit ultra-murni [174†NW-T-1.7, p. 21].


Generasi dan retensi tritium (^3H) merupakan fitur dominan lain dari limbah grafit MSR. Tritium diproduksi melalui reaksi $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$ dalam garam cair berbasis litium dan berdifusi ke grafit adjacent karena ukuran atom kecil dan permeabilitas tinggi. Setelah terserap, tritium bermigrasi melalui kisi grafit dan terdistribusi secara heterogen, sering terkonsentrasi pada cacat permukaan dan void interstitial. Berbeda dengan produk aktivasi yang terfiksasi dalam kisi, tritium dapat terlepas pada suhu elevasi atau selama pemrosesan limbah, menimbulkan risiko pelepasan gas dan kontaminasi sekunder [Forsberg, 2024].

Selain itu, permukaan grafit dalam MSR mengadsorpsi atau mengendapkan produk fisi volatil dan semi-volatil yang dilepaskan dari garam bahan bakar cair. Ini mencakup isotop iodin (misal ^{129}I), sesium, telurium, rutenium, dan logam mulia seperti paladium dan rodium. Adsorpsi permukaan difasilitasi oleh porositas tinggi dan kepadatan cacat grafit, sementara pengendapan logam mulia terjadi melalui interaksi redoks-driven di daerah matriks grafit yang lebih dingin. Spesies-spesies ini tidak terdistribusi merata dan dapat terakumulasi hingga level signifikan tergantung jalur aliran garam dan gradien suhu inti [Forsberg, 2024].

Interaksi kimia antara garam cair dan grafit menghasilkan mekanisme degradasi tambahan. Fluorinasi permukaan grafit dapat terjadi karena keberadaan HF, UF_6 atau spesies volatil mengandung fluorin lainnya, membentuk kompleks karbon-fluorida permukaan. Reaksi ini dapat menyebabkan kehilangan material, peningkatan porositas, dan pelemahan ikatan struktural. Tingkat korosi ini bergantung pada potensial redoks garam, kontrol impuritas, dan kondisi termal lokal. Konsentrasi BeF_2 atau ZrF_4 yang

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 19 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
	<p>Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sob judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir</p>

tinggi dalam garam memperparah serangan oksidatif dengan mengubah potensial kimia fluorida [Riley, 2019].

Secara volume, grafit membentuk porsi substansial dari total inventaris limbah operasi MSR. Pada reaktor dengan rasio moderator-bahan bakar tinggi seperti MSR spektrum termal, volume matriks grafit dapat melebihi volume garam bahan bakar dengan faktor lima atau lebih. Bentuk fisiknya—massif, berpori, dan berpotensi terkontaminasi—menghadirkan tantangan penyimpanan dan penanganan jangka panjang. Penting dicatat bahwa kandungan radionuklida, khususnya ¹⁴C dan produk fisi terserap, dapat mengategorikan sebagian limbah ini sebagai level menengah atau tinggi dalam skema klasifikasi berlaku [NW-T-1.7].


Secara ringkas, limbah karbon dan grafit dari MSR berbahan bakar cair merepresentasikan aliran material yang terdegradasi struktural, teralterasi kimia, dan heterogen secara radiologis. Sifatnya didefinisikan oleh kerusakan akibat iradiasi, akumulasi produk aktivasi, deposisi produk fisi permukaan, dan korosi berbasis fluorinasi. Karakteristik ini harus dipahami dan dikarakterisasi sepenuhnya untuk menginformasikan strategi penanganan limbah, pemantauan, dan kondisionering berikutnya yang disesuaikan dengan perilaku spesifik grafit teriradiasi.

3.3 Limbah Logam Teraktivasi

Pada reaktor garam cair (MSR) spektrum termal berbasis fluorida, material struktural-terutama baja tahan karat dan paduan berbasis nikel - membentuk aliran limbah signifikan akibat aktivasi neutron dan kontaminasi permukaan. Dalam desain TMSR-500, limbah logam teraktivasi berasal dari komponen seperti penukar panas, pipa, pompa garam, dan bagian internal bejana reaktor yang terpapar langsung atau tidak langsung terhadap fluks neutron dan garam cair bersuhu tinggi. Seiring waktu,

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 20 dari 62

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 : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

bombardemen neutron menginduksi radioaktivitas pada komponen logam ini, mengubah material yang semula inert menjadi sumber radiasi dan limbah berumur panjang.


Komponen baja tahan karat, khususnya yang dibuat dari grade AISI 316 atau serupa yang digunakan dalam loop garam sekunder dan sistem bantu, mengalami aktivasi neutron terhadap unsur penyusun seperti besi, kromium, nikel, dan molibdenum. Produk aktivasi utama mencakup isotop seperti ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{63}Ni , ^{55}Fe , dan ^{51}Cr . Di antaranya, ^{60}Co ($t_{1/2} \sim 5,3$ tahun) sangat signifikan karena emisi gamma kuat dan produksinya melalui reaksi (n,γ) pada impuritas kobalt stabil ^{59}Co . Keberadaannya meningkat bahkan oleh kandungan kobalt jejak dalam paduan dan material pengelasan [Kitcher, 2020]. Isotop nikel seperti ^{59}Ni dan ^{63}Ni juga berkontribusi terhadap radiotoksitas jangka panjang tetapi terutama merupakan pemancar beta dengan bahaya eksternal rendah.

Selain aktivasi bulk, deposisi berbantuan korosi menyebabkan kontaminasi permukaan bagian logam. Produk korosi yang dilepaskan dari komponen sirkuit primer larut dalam garam cair, diangkut melalui aliran konvektif, dan terdeposisi kembali pada permukaan logam yang lebih dingin seperti tubing penukar panas atau bodi katup. Permukaan ini kemudian menjadi penampung spesies teraktivasi seperti ^{60}Co , ^{58}Co , dan ^{54}Mn , mengakibatkan distribusi aktivitas tidak homogen dan pembentukan hotspot dosis tinggi [Riley, 2019]. Endapan ini sulit dihilangkan dan mungkin tertanam dalam lapisan oksida atau batas butir, mempersulit dekontaminasi dan karakterisasi limbah.

Sementara paduan berbasis nikel seperti Hastelloy-N menunjukkan ketahanan korosi superior dalam garam fluorida dan telah diuji ekstensif dalam kondisi MSR, material ini tidak kebal terhadap kerusakan iradiasi. Pada paparan berkepanjangan, paduan ini dapat mengalami pembentukan gelembung helium, pembengkakan, dan penggetasan,

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 21 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir


terutama dengan kehadiran produk fisi seperti telurium yang dapat melemahkan batas butir [Kitcher (2020), Riley (2018)]. Mekanisme penggetasan meningkatkan kerentanan terhadap kegagalan mekanik dan mempersulit operasi pembongkaran serta pemotongan untuk penanganan limbah.

Profil aktivasi dan perilaku degradasi material setiap komponen logam sangat bergantung pada kondisi paparannya - intensitas fluks neutron, durasi iradiasi, komposisi paduan, dan jarak dari inti reaktor. Permukaan internal bejana dan rumah batang kendali biasanya menunjukkan aktivitas tertinggi, sementara struktur perifer mungkin memiliki aktivasi marginal atau dapat diabaikan. Namun, bahkan komponen yang berada dalam loop sekunder bebas garam dapat mengakumulasi aktivitas melalui paparan terhadap tritium bermigrasi atau deposisi aerosol produk fisi, khususnya logam mulia dan spesies iodin.

Limbah logam teraktivasi yang dihasilkan bersifat heterogen baik dalam profil radiologis maupun stabilitas kimia. Komponen struktural bulk cenderung mengandung produk aktivasi dengan waktu paruh bulanan hingga dekade, sementara komponen terkontaminasi permukaan mungkin mengandung isotop terikat longgar dengan potensi pelindian atau volatilisasi. Dualitas ini memerlukan estimasi inventaris nuklida rinci, seringkali melalui pemodelan transport neutron dan deplesi, untuk menginformasikan strategi perisai, penyimpanan, dan klasifikasi yang sesuai. Meskipun banyak komponen mungkin memenuhi kriteria limbah level menengah (ILW), beberapa mungkin melebihi ambang batas generasi panas atau laju dosis, mendorongnya ke klasifikasi limbah level tinggi (HLW) di bawah peraturan IAEA atau nasional [Matteo (2023), NW-T-1.7].

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 22 dari 62

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

	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

3.4 Limbah Dekomisioning


Proses dekomisioning reaktor garam cair (MSR) berbasis fluorida berbahan bakar cair seperti TMSR-500 menghasilkan beragam limbah radioaktif yang kompleks. Limbah ini berasal dari pembongkaran komponen reaktor, penghilangan kontaminasi radioaktif yang tertanam, serta pengelolaan sisa garam dan struktur teraktivasi. Karena konfigurasi dan karakteristik operasional unik MSR, khususnya penggunaan bahan bakar garam cair dan moderator grafit bersuhu tinggi, inventaris dan sifat limbah dekomisioning berbeda secara signifikan dari reaktor berbahan bakar padat konvensional.

Sebagian besar limbah dekomisioning berasal dari komponen sirkuit primer, termasuk bejana reaktor, struktur grafit internal, dan pipa tertanam. Komponen ini, yang beroperasi dalam kontak langsung dengan garam bahan bakar, mengakumulasi produk fisi sisa dan produk aktivasi. Garam fluorida sisa dapat memadat dalam celah sistem atau menempel sebagai endapan kristalin pada permukaan logam maupun grafit. Residu ini sering mengandung aktinida, lantanida, dan produk fisi halida seperti ^{129}I dan ^{137}Cs , serta menunjukkan reaktivitas kimia tinggi atau kelarutan air yang menyulitkan proses dekontaminasi dan pengemasan [Kitcher (2020), Riley (2019)].

Blok moderator grafit yang menjadi bagian integral desain TMSR-500 merupakan aliran limbah utama selama dekomisioning. Seperti telah dibahas sebelumnya, blok ini mengandung produk aktivasi seperti ^{14}C dan ^3H , serta produk fisi terdeposit seperti iodin dan sesium. Paparan berkepanjangan terhadap uap garam dan spesies fluorin meningkatkan fluorinasi permukaan, memperbesar porositas dan menjebak residu garam. Selama pembongkaran, potensi pecah mekanis dan pembentukan debu tinggi, meningkatkan risiko kontaminasi udara dan memerlukan tindakan penahanan khusus selama proses pengangkatan dan pengemasan [Forsberg {2024)].

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 23 dari 62

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 : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sob judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

Selain material bulk, proses dekontaminasi menghasilkan limbah sekunder seperti larutan pembersih kimia, lumpur, resin, dan perkakas sekali pakai. Metode dekontaminasi kimia—termasuk pencucian asam tahan fluorida atau perlakuan reduktif alkali—memobilisasi radionuklida terikat permukaan dan lapisan korosi, menghasilkan efluen mengandung fluorida terlarut dan partikulat bermuatan aktinida. Limbah sekunder ini memerlukan stabilisasi atau solidifikasi lebih lanjut sebelum penyimpanan. Dekontaminasi fisik melalui peledakan, penggerindaan mekanis, atau pad abrasif juga menghasilkan partikulat terkontaminasi yang harus ditangkap dan diperlakukan sebagai limbah operasional LLW atau ILW, tergantung kandungan nuklida dan laju dosis [Riley (2018), Matteo (2023)].

Karakteristik unik limbah dekomisioning MSR adalah tingkat heterogenitas radiologis yang tinggi akibat sifat kontaminasi yang tertanam. Bagian sistem tertentu seperti bagian internal bejana dan segmen loop bawah mungkin mengandung hotspot lokal dari deposisi produk korosi atau zona garam stagnan. Sebaliknya, struktur perifer mungkin hanya menyimpan kontaminasi jejak. Pemetaan radiologis komprehensif melalui assay non-destruktif dan pencitraan gamma menjadi penting untuk mengidentifikasi ambang klasifikasi dan mengoptimasi strategi segmentasi untuk transportasi dan pembuangan. Secara keseluruhan, dekomisioning MSR menghasilkan berbagai material limbah yang reaktif secara kimia dan kompleks secara radiologis, memerlukan strategi karakterisasi dan isolasi limbah yang khusus.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 24 dari 62

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

	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

BAB 4 OPSI TEKNOLOGI DAN STRATEGI PENANGANAN LIMBAH MSR

Bab ini membahas secara komprehensif berbagai opsi teknologi dan strategi pengelolaan limbah yang dihasilkan dari sistem reaktor garam cair (*molten salt reactor/MSR*), khususnya untuk desain spektrum termal berbahan bakar cair berbasis fluorida dengan siklus bahan bakar tanpa pengolahan (*once-through*). Pendekatan ini digunakan untuk memastikan keselamatan jangka panjang, kelayakan teknis, serta kepatuhan terhadap prinsip-prinsip perlindungan radiasi dan pengelolaan limbah radioaktif sebagaimana diatur dalam standar IAEA dan praktik terbaik internasional.


Limbah yang dihasilkan dari operasi MSR memiliki karakteristik unik karena keterlibatannya langsung dengan media garam cair sebagai bahan bakar sekaligus pendingin. Oleh karena itu, pengelolaan limbah MSR memerlukan strategi khusus yang berbeda dari reaktor air ringan (LWR). Bab ini menguraikan enam kategori utama limbah radioaktif yang mungkin timbul, yaitu:

1. garam bahan bakar bekas (*spent fuel salt*),
2. limbah grafit,
3. limbah logam teraktivasi, dan
4. limbah dekomisioning serta dekontaminasi.

Untuk setiap kategori, dibahas secara rinci karakteristik kimia dan radiologis, strategi pengolahan dan imobilisasi, opsi pembuangan, serta tantangan dan kesenjangan pengetahuan yang masih perlu dijawab melalui riset dan pengembangan.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 25 dari 62

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

	<p style="text-align: center;"> 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/ </p>
	<p> Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sob judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir </p>

4.1 Limbah Bahan Bakar Bekas

Garam bahan bakar bekas dari reaktor garam cair, MSR, spektrum termal berbahan bakar cair yang beroperasi dengan siklus bahan bakar sekali lewat merupakan arus limbah beraktivitas tinggi yang paling menonjol [11]. Berbeda dari reaktor air ringan konvensional, MSR memanfaatkan bahan fisil yang dilarutkan di dalam garam cair, umumnya campuran fluorida, yang berfungsi sekaligus sebagai bahan bakar dan pendingin [15]. Hal ini menghasilkan profil limbah radiologis dan kimia yang khas [11]. Untuk pendekatan sekali lewat, meskipun mungkin terdapat perlakuan minimal di tapak, misalnya pembuangan off-gas, strategi utamanya adalah mengimobilisasi dan membuang seluruh volume garam bekas tanpa pemrosesan ulang yang ekstensif untuk mendaur ulang komponen mayor [7; 16].

4.1.1 Karakteristik Penting dan Persyaratan Pembuangan

4.1.1.1 Karakteristik Kimiawi dan Radiologis

Garam bahan bakar bekas yang dilepas dari MSR termal berbasis fluorida, misalnya komposisi UF₄-BeF₂-LiF [15], memiliki aktivitas tinggi, reaktivitas kimia tinggi, dan keluaran panas peluruhan yang tinggi [11].

- Komposisi dan bahaya: Arus ini merupakan campuran residu fisil, berbagai produk fisi dan aktivasi, serta spesies hasil korosi [11]. Residu mencakup uranium, plutonium hasil breeding, dan penyerap neutron kuat seperti lantanida hasil fisi [11];
- Kelarutan air: Garam bekas larut dalam air. Jika dibuang tanpa perlakuan, radionuklida dapat bermigrasi ke air tanah apabila ruang penyimpanan terpapar media berair [7; 17];
- Radiolisis dan pembangkitan gas: Jika garam fluorida memadat dan tidak diolah, radiolisis dapat terus membangkitkan gas fluor, F₂, sehingga menaikkan tekanan

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 26 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
	<p>Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sub judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir</p>

dalam paket limbah. Untuk garam yang mengandung litium, pembangkitan tritium, H-3, menjadi sumber gas tambahan [7].

4.1.1.2 Persyaratan Pembuangan

Karena sifat dan tingkat aktivitasnya, garam bahan bakar bekas dikelola sebagai arus limbah yang sangat diawasi ketat.

- Klasifikasi limbah: Garam bahan bakar yang tidak dipisahkan dan ditujukan untuk pembuangan umumnya diklasifikasikan sebagai limbah tingkat tinggi, HLW [5; 7]. Selain itu, garam yang tidak diolah dan material yang terkontaminasi garam dari MSR berpotensi termasuk limbah campuran berbahaya karena toksisitas, misalnya berilium, atau reaktivitas, misalnya garam yang mengandung litium, sehingga diklasifikasikan sebagai hazardous mixed waste [16];
- Persyaratan penyimpanan: Selama pendinginan dan penyimpanan sebelum pembuangan, garam bekas yang telah memadat harus tetap memenuhi fungsi pendinginan, perisai radiasi, dan subkritis [3];
- Pra-pembuangan: Untuk mencegah migrasi radionuklida ke air tanah, garam bahan bakar umumnya perlu diimobilisasi sebelum dibuang pada fasilitas penyimpanan lestari yang digali [5].


4.1.2 Strategi Pembuangan

Untuk garam bahan bakar bekas MSR pada siklus sekali lewat dengan pemrosesan rendah, terdapat dua strategi utama pada akhir masa pakai garam.

- Pembuangan langsung di repository garam: Garam bekas yang telah memadat dapat langsung dibuang pada repository garam [17], karena tantangan pelarutan

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 27 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
	<p>Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sub judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir</p>

limbah garam sejalan dengan karakter geologi garam yang sulit ditembus media berair [7];

- Imobilisasi dan pembuangan di repository tambang: Jika repository garam khusus tidak tersedia, garam bekas harus dikonversi menjadi bentuk limbah yang kuat dan layak untuk berbagai lingkungan geologi [3]. Jalur sekali lewat yang diolah mencakup pemrosesan garam padat untuk menghasilkan bentuk HLW yang tahan lama [7].

4.1.3 Strategi Pengolahan dan Imobilisasi

Fokus pengolahannya adalah imobilisasi untuk mencapai bentuk limbah yang stabil secara kimia dan tahan lama untuk pembuangan geologi [5].

- Tantangan imobilisasi: Membuat satu bentuk limbah yang dapat menahan seluruh ragam spesies dalam garam, termasuk aktinida, produk fisi, dan garam pembawa, sangat menantang [5]. Vitrifikasi gelas konvensional pada umumnya tidak mampu menampung konsentrasi halida yang besar pada matriks garam MSR [16];
- Kandidat bentuk HLW, WF 5a-c: Untuk campuran garam klorida atau fluorida pada siklus sekali lewat yang diolah, tiga bentuk HLW yang dikaji secara konseptual adalah gelas fosfat, WF 5a, komposit keramik-logam atau cermet, WF 5b, dan keramik berikatan gelas, glass-bonded ceramic, WF 5c [7];
- Opsi gelas khusus fluorida: BeF_2 adalah satu-satunya komponen fluorida yang dapat membentuk gelas. Gelas fluorida logam berat, HMF, misalnya ZBLAN, telah disintesis dan ditunjukkan mampu menginkorporasi fluorida aktinida serta fluorida tanah jarang [16].

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 28 dari 62

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

	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

4.1.4 Tantangan operasional dan penyimpanan

Arus limbah garam cair memunculkan tantangan unik terkait bahaya termal, kimia, dan fisik yang berbeda dari elemen bahan bakar padat tradisional.

- Penyimpanan dan radiolisis: Garam fluorida bekas yang memadat di dalam wadahnya tetap membangkitkan F_2 , yang sangat korosif, akibat radiolisis sehingga menaikkan tekanan paket limbah. Pada garam litium, tritium menambah tekanan internal [7];
- Manajemen panas: Arus garam MSR dapat mengalami panas peluruhan relatif tinggi dibandingkan bahan bakar keramik LWR, sehingga bentuk limbah harus tahan pada temperatur tinggi dan tetap memenuhi batas termal paket [16];
- Kesulitan penanganan operasional: Pengalaman penanganan masih terbatas. Sebagai contoh, pengambilan garam bekas MSRE dari tangki pembuangan di Oak Ridge National Laboratory, ORNL, terbukti menantang [7].


4.1.5 Kesenjangan Pengetahuan dan Kebutuhan Riset ke Depan

Kesenjangan pengetahuan yang signifikan harus ditangani untuk memastikan pembuangan garam bahan bakar bekas dari MSR termal berbahan bakar cair sekali lewat berjalan aman dan efektif.

- Pengembangan bentuk limbah untuk garam fluorida: Penelitian yang secara khusus mengevaluasi dan mengembangkan bentuk limbah yang mampu menahan beban halida tinggi pada garam fluorida masih sangat sedikit. Diperlukan uji ruang lingkup terhadap beban garam halida tinggi, kinerja, dan stabilitas pada kondisi penyimpanan jangka panjang, seperti radiasi dan panas [16];

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 29 dari 62

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 : Sub judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

- Validasi kinerja bentuk limbah: Penyelidikan lebih lanjut diperlukan untuk menilai perilaku degradasi dan kinerja gelas fosfat, cermet, dan glass-bonded ceramic, WF 5c, di lingkungan pembuangan generik [7];
- Data material dan keselamatan: Data kelarutan gas pada limbah garam multikomponen yang kompleks diperlukan untuk penilaian kinerja dan keselamatan yang akurat di berbagai repository [7];
- Inventaris radionuklida dan kritikalitas: Kekurangan informasi khusus mengenai inventaris radionuklida dan muatan fisil menyulitkan penilaian beban panas dan potensi kritikalitas untuk bentuk limbah akhir [7];
- Penetapan proses: Proses yang dapat digunakan untuk menciptakan bentuk limbah yang lebih stabil dari garam bekas belum ditetapkan dengan jelas [7].

4.2 Limbah Grafit

Pada reaktor garam cair (MSR) spektrum termal berbahan bakar cair berbasis fluorida, material karbon dan grafit berfungsi sebagai moderator, reflektor, serta penyangga internal, sehingga menjadi arus limbah radioaktif yang khas dan juga berjumlah besar [3; 5; 6]. Berbeda dari elemen bahan bakar padat, grafit pada MSR terpapar secara terus-menerus terhadap garam bahan bakar yang bersirkulasi, menghasilkan profil kontaminasi yang unik [5].


4.2.1 Karakteristik Penting dan Persyaratan Pembuangan

4.2.1.1 Karakteristik Kimiawi dan Radiologis

Limbah grafit ditandai sebagai material yang mengalami degradasi struktural, perubahan kimia, serta bersifat heterogen secara radiologis [6]. Arus limbah ini sering menjadi yang terbesar dari segi volume [3].

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 30 dari 62

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 : Sub judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

- **Produk aktivasi berumur panjang:**

Iradiasi grafit menghasilkan isotop C-14 dan H-3. Tritium terutama terbentuk dari reaksi neutron dengan litium di dalam garam, kemudian diserap oleh grafit yang berperan sebagai getter [3; 5; 9]. C-14 menjadi perhatian utama dalam pembuangan karena memiliki waktu paruh yang sangat panjang [9];

- **Kontaminasi garam dan produk fisi:**

Kontak dengan garam menyebabkan impregnasi garam dan bahan fisil sisa, serta deposisi logam mulia pada permukaan grafit yang menghasilkan medan gamma tinggi [1; 3; 5]. Produk fisi juga dapat tertanam di lapisan permukaan akibat recoil atau peluruhan spesies volatil [3; 15];

- **Perubahan kimia:**

Paparan garam fluorida dapat memicu fluorinasi pada grafit, yang mempengaruhi sifat kimia dan keutuhan strukturalnya [3; 14].

4.2.1.2 Persyaratan Pembuangan

Pengelolaan grafit teriradiasi bersifat kompleks karena variasi inventaris radionuklida dan sifat fisik materialnya. Jalur pembuangan sangat dipengaruhi oleh kandungan C-14, H-3, dan pengotor lainnya [5].

- **Klasifikasi limbah:**

Setelah menjalani pengolahan yang memadai, limbah grafit biasanya dikategorikan sebagai limbah tingkat rendah (LLW) atau sedang (ILW). Komponen dengan kandungan logam mulia berumur panjang atau unsur transuranik (TRU) yang tinggi mungkin memerlukan pembuangan pada repository geologi [3; 4; 5];

- **Pengelolaan tritium:**

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 31 dari 62

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

	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sub judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

Karena H-3 sangat mudah berdifusi, pemuatan tritium yang tinggi dalam grafit harus dipertimbangkan selama penyimpanan dan transportasi. Perlakuan harus memastikan pelepasan H-3 sebelum pembuangan akhir atau daur ulang [1; 5];

- **Sisa garam:**

Keberadaan jejak garam perlu dievaluasi dampaknya terhadap integritas jangka panjang wadah penyimpanan dan operasi repository. Paparan air terhadap karbida grafit dapat menghasilkan gas yang mudah terbakar [3; 9].

4.2.2 Strategi Pembuangan

- **Pembuangan langsung setelah pengkondisian:**

Grafit bersifat inert dan rapat, sehingga dapat berfungsi sebagai bentuk limbah monolitik yang baik. Berdasarkan tingkat aktivitasnya, grafit dapat dibuang di fasilitas *near surface disposal*, atau fasilitas penyimpanan lestari [3; 5];

- **Daur ulang dan guna ulang:**

Penggunaan kembali grafit teriradiasi yang telah dibersihkan sebagai komponen baru merupakan strategi menarik untuk mengurangi volume limbah dan memanfaatkan kembali material bernilai [3; 5];

- **Oksidasi dan sekuestrasi:**

Grafit dapat dioksidasi menjadi CO₂, kemudian disekuestrasi secara geologis. Co-sequestration dengan CO₂ industri juga dapat membantu mendilusi C-14 hingga tingkat aman [5];

- **Injeksi geologi:**

Sebagai alternatif, grafit dapat dipulverisasi dan diinjeksi ke dalam formasi geologi, mungkin dengan penambahan grout berbasis semen [5].

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 32 dari 62

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

	<p>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/</p>
	<p>Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sub judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir</p>


4.2.3 Strategi Pengolahan

- **Pelepasan tritium dan isotop volatil:**

Perlakuan termal dalam atmosfer inert pada sekitar 1300 °C dapat memutus ikatan H-3 – karbon. Oksidasi pada 1000°C dalam 2 persen O₂/Ar dapat mengurangi kandungan C-14 [3; 5; 12];

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 33 dari 62

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 : Sub judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

- **Dekontaminasi garam dan produk fisi:**

Pulverisasi dan etsa asam digunakan untuk melindi sebagian besar produk fisi dan komponen garam, kemudian dilanjutkan dengan etsa lebih lanjut untuk menghilangkan sisa isotop setelah perlakuan panas [3; 13; 12];

- **Proses daur ulang grafit:**

Bubuk grafit hasil pulverisasi dapat digunakan kembali sebagai pengganti filler kokas pada pembuatan grafit nuklir baru, kemudian diimpregnasi dengan pitch untuk penguatan. Penggunaan proporsi bubuk daur ulang yang tinggi tidak menurunkan mutu material akhir pada skala kecil [3; 10].

4.2.4 Tantangan

- **Aktivitas dan heterogenitas:**

Kandungan residu bahan bakar dan logam mulia pada grafit MSR menimbulkan medan gamma tinggi serta kesulitan dalam penanganan dan dekontaminasi [3; 5]. Material ini tidak homogen secara radiologis, dengan variasi kontaminasi dari permukaan hingga bagian dalam, yang mempersulit klasifikasi dan pengolahan [3];

- **Mobilitas radionuklida:**


Tritium sangat mobil, sehingga berpotensi lepas selama penyimpanan atau transportasi. Dampak keberadaan jejak garam terhadap kinerja fasilitas penyimpanan dan pembuangan harus dievaluasi dengan hati-hati. Radiasi yang terjadi pada garam fluorida padat dapat membangkitkan fluor bebas (F) yang bersifat korosif terhadap wadah dan lingkungan sekitarnya [1; 3; 5];

- **Hambatan regulasi dan penerapan:**

Karakterisasi arus limbah grafit masih pada tahap awal. Form of Record (FOR) khusus untuk limbah grafit MSR belum mapan, sehingga belum tersedia pedoman baku untuk klasifikasi dan pembuangan. Selain itu, keberadaan C-14

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 34 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
	<p>Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sub judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir</p>

dan potensi reaktivitas kimia menghasilkan tantangan klasifikasi ganda antara limbah radioaktif dan limbah berbahaya [3; 8; 9];

- **Kontaminasi kimia dan fisik:**

Sisa garam fluorida yang melekat dapat bersifat higroskopis dan menghasilkan asam korosif bila bersentuhan dengan kelembapan udara. Hal ini menimbulkan risiko bagi pekerja serta dapat mempercepat degradasi permukaan grafit dan wadah penyimpanan [3; 5];

- **Keterbatasan data radiologi:**

Perbedaan riwayat iradiasi dan operasi antar-reaktor menyebabkan variasi besar dalam inventaris radionuklida. Kurangnya data isotopik yang terperinci menyulitkan perencanaan strategi pembuangan terstandar untuk limbah grafit dari berbagai desain MSR [3; 6].

4.2.5 Kesenjangan Pengetahuan dan Kebutuhan Riset

Kebutuhan riset untuk limbah grafit MSR masih sangat besar dan mencakup aspek ilmiah, teknis, serta pengawasan.

- **Perumusan Form of Record (FOR):**


Diperlukan pengembangan FOR untuk limbah karbon/grafit MSR yang mencakup karakteristik fisik, kimia, dan radiologis, serta kesesuaiannya dengan konsep repository generik [3; 5];

- **Studi sistematis pendekatan ekonomis:**

Kajian menyeluruh terhadap biaya, manfaat, dan kelayakan teknologi pengolahan—terutama untuk opsi daur ulang grafit, oksidasi-sekuestrasi, dan injeksi geologi—masih belum tersedia [3; 5];

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 35 dari 62

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

	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

- **Pemahaman kimia C-14 dan H-3:**

Diperlukan penelitian mendalam mengenai bentuk kimia C-14 dan H-3 dalam matriks grafit, laju pelepasan isotop-isotop ini selama perlakuan panas maupun penyimpanan, serta interaksinya dengan gas dan uap air [3; 5];

- **Uji skoping untuk opsi perlakuan dan daur ulang:**

Eksperimen skala laboratorium hingga pilot harus dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas proses pelindian asam, perlakuan termal, dan penghilangan tritium, serta dampaknya terhadap stabilitas mekanik material [3; 7];

- **Demonstrasi bentuk limbah log karbon:**

Konsep carbon HLW log perlu dibuktikan melalui pengujian performa jangka panjang, termasuk integritas struktural, pelepasan gas, dan kompatibilitas dengan kondisi repository [3];

- **Validasi pemodelan migrasi tritium:**

Pemodelan difusi dan pelepasan tritium dari grafit selama penyimpanan memerlukan data empiris tambahan, termasuk efek suhu dan tingkat kerusakan radiasi [5];

- **Evaluasi potensi pemulihan isotop bernilai guna:**

Beberapa radionuklida, seperti logam mulia hasil fisi yang terdeposit di grafit, memiliki nilai ekonomi potensial. Kajian pemisahan dan daur ulang isotop tersebut dapat mendukung konsep waste-to-resource untuk siklus bahan bakar MSR [3; 16].

4.3 Limbah Logam Teraktivasi

Arus limbah ini mencakup komponen logam struktural dan bantu yang menjadi radioaktif melalui aktivasi neutron atau kontaminasi permukaan, termasuk penukar panas, pipa, rumah pompa, elemen reflektor, dan berbagai komponen reaktor lainnya [1; 2; 3; 4; 9]. Fokus utama dalam pengelolaannya adalah pada reduksi volume,

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 36 dari 62

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

	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

dekontaminasi permukaan, dan konversi ke bentuk limbah monolitik yang stabil untuk pembuangan jangka panjang [1].

4.3.1 Karakteristik Penting dan Persyaratan Pembuangan

4.3.1.1 Karakteristik Kimiawi dan Radiologis

Komposisi limbah logam ditentukan oleh jenis paduan yang digunakan dalam sistem MSR untuk menghadapi kondisi operasi garam fluorida bersuhu tinggi.

- **Material konstruksi:**

Material utama yang digunakan untuk komponen logam dalam MSR mencakup paduan Hastelloy-N, berbagai jenis baja tahan karat, Inconel, Alloy 800H, dan paduan eksperimental seperti MONICR [1; 2; 18]. Penggunaan paduan eksotik yang dirancang untuk ketahanan terhadap korosi dan suhu tinggi dapat menghasilkan produk aktivasi yang tidak umum dalam sistem nuklir konvensional [7; 14];

- **Produk aktivasi:**


Aktivasi neutron pada elemen logam menghasilkan isotop pemancar gamma berenergi tinggi seperti Co-60, yang menjadi perhatian utama untuk proteksi radiasi. Unsur-unsur korosi seperti Cr, Ni, dan Fe juga memperkaya inventaris radionuklida [7; 13];

- **Kontaminasi produk fisi dan garam:**

Permukaan logam yang terpapar garam bahan bakar bersirkulasi dapat tertutupi oleh lapisan garam residu dan produk fisi. Logam mulia yang memiliki kelarutan rendah, seperti Mo, Ru, Rh, Pd, dan Ag, cenderung mengendap di permukaan bagian dalam, terutama di penukar panas [3; 8];

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 37 dari 62

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 : Sub judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

- **Difusi tritium:**

Tritium yang dihasilkan dalam garam yang mengandung litium dapat dengan mudah berdifusi melalui bagian logam panas, terutama penukar panas, dan berpotensi menyebabkan pelepasan dari sistem keterkungkungan. Oleh karena itu, strategi pengendalian yang ketat diperlukan untuk mengelola migrasi tritium [4; 16; 17].

4.3.1.2 Persyaratan Pembuangan

- **Klasifikasi limbah:**

Setelah mengalami proses reduksi ukuran, dekontaminasi, dan pengemasan, sebagian besar limbah logam akan dikategorikan sebagai limbah tingkat rendah (LLW) atau tingkat medium (ILW). Limbah ILW memerlukan fasilitas pembuangan khusus atau fasilitas penyimpanan lestari [2; 5];

- **Manajemen bahaya:**


Jika logam dikondisikan dengan metode sementasi, ada potensi pembangkitan gas hidrogen akibat reaksi dengan air, sehingga metode alternatif seperti peleburan atau pemadatan lebih disukai karena menghasilkan bentuk limbah yang lebih stabil [7];

- **Pra-pembuangan:**

Logam dengan kandungan logam mulia atau kontaminasi produk fisi yang tinggi perlu diturunkan aktivitasnya terlebih dahulu, serta dikonversi ke bentuk limbah yang tahan korosi dan termal sebelum pembuangan [1; 12].

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 38 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
	<p>Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sob judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir</p>

4.3.2 Strategi Pembuangan

- **Monolitik (bentuk logam padat):**

Komponen logam yang telah digunakan, seperti pipa, pelat reflektor, atau penukar panas, dipotong menjadi ukuran kecil kemudian dilebur atau dipadatkan menjadi bentuk monolitik untuk penyimpanan dan pembuangan akhir. Strategi ini banyak digunakan dalam pengelolaan limbah logam beraktivitas tinggi [1; 2];

- **Daur ulang:**

Komponen logam dengan tingkat kontaminasi rendah atau yang dapat didekontaminasi secara efektif memiliki potensi untuk didaur ulang menjadi material industri atau bahan konstruksi reaktor baru setelah pemurnian [2; 6];

- **Pembuangan geologi:**

Setelah diproses menjadi bentuk logam paduan yang tahan terhadap korosi, misalnya melalui proses peleburan campuran logam limbah dengan serpih cladding, produk akhirnya dapat dibuang dalam repository geologi. Salah satu contoh bentuk limbah logam yang dikembangkan dari penelitian piroprosesing adalah paduan antara logam mulia hasil fisi dengan sisa cladding baja tahan karat [11; 12].

4.3.3 Strategi Pengolahan

- **Reduksi ukuran dan dekontaminasi:**

Semua arus logam, baik dari kegiatan dekomisioning (D&D) maupun operasi rutin, biasanya dipotong sesuai ukuran yang diizinkan dan didesinfeksi permukaannya melalui metode mekanik atau kimia, sebelum dikemas dan diproses sesuai klasifikasi (LLW atau ILW) [2; 3];

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 39 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
	<p>Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sub judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir</p>

- **Peleburan dan paduan logam:**

Peleburan pada suhu tinggi dilakukan untuk membentuk bentuk limbah logam yang menginkorporasikan kontaminan dan logam mulia ke dalam paduan stabil. Contoh komposisi yang telah diuji meliputi SS-15Zr dan Zr-8SS, yang dilebur pada sekitar 1600 °C untuk menghasilkan produk yang rapat dan tahan korosi [11];

- **Komposit bentuk limbah (Cermet):**

Logam teraktivasi juga dapat digunakan sebagai komponen dalam cermet (komposit keramik-logam), yang diusulkan sebagai bentuk limbah tingkat tinggi (HLW) untuk arus garam produk fisi yang terpisah [5].

4.3.4 Tantangan

- **Volatilisasi produk fisi:**

Selama proses peleburan atau pemadatan, beberapa produk fisi yang bersifat volatil dapat terlepas, sehingga diperlukan sistem penangkapan dan pengendalian gas volatil untuk mencegah pelepasan radionuklida ke lingkungan [2];

- **Dekontaminasi garam dan logam mulia:**

Permukaan logam pada sistem MSR sering terlapisi garam bekas yang mengandung produk fisi dan logam mulia. Penghilangan lapisan ini sebelum proses peleburan atau daur ulang sangat penting untuk menurunkan tingkat aktivitas dan mencegah terjadinya reaksi kimia berbahaya antara garam dan logam [1; 9];

- **Migrasi tritium:**

Tritium memiliki kemampuan difusi tinggi dan dapat menembus lapisan logam selama penyimpanan atau pengolahan termal. Migrasi tritium perlu dikendalikan

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 40 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
	<p>Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sub judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir</p>

dengan pendekatan rekayasa, seperti penggunaan lapisan penghalang difusi atau kontrol tekanan parsial gas hidrogen di atmosfer proses [16; 17; 20];

- **Penanganan material beraktivitas tinggi:**

Beberapa komponen logam yang terpapar langsung dengan garam bahan bakar memiliki aktivitas tinggi akibat plating logam mulia yang menghasilkan medan gamma besar. Hal ini menimbulkan tantangan signifikan terhadap pengangkatan, pengemasan, dan proses peleburan yang aman [1; 13];

- **Korosi logam di bawah kondisi penyimpanan:**

Sisa garam yang higroskopis dapat menimbulkan korosi pada permukaan logam selama penyimpanan sementara. Reaksi antara garam fluorida dan kelembapan udara dapat membentuk HF(g), yang bersifat korosif dan beracun, sehingga diperlukan kontrol kelembapan dan pelapisan pelindung wadah [4];

- **Keterbatasan teknologi imobilisasi:**

Teknologi yang mampu menstabilkan limbah logam radioaktif bercampur produk fisi dalam satu bentuk paduan atau matriks masih berada pada tahap konseptual. Optimasi proses peleburan dan karakterisasi jangka panjang terhadap kestabilan produk masih menjadi area riset penting [5].

4.3.5 Kesenjangan Pengetahuan dan Kebutuhan Riset

Kesenjangan riset dan teknologi dalam pengelolaan limbah logam teraktivasi dari MSR mencakup pemahaman material, metode pengolahan, serta pengujian kinerja jangka panjang.

- **Neraca massa dan inventaris radionuklida:**

Diperlukan penyusunan neraca massa yang komprehensif dan inventaris radionuklida referensi untuk seluruh arus efluen logam, termasuk kontaminan

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 41 dari 62


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

	<p style="text-align: center;"> 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/ </p>
Jenis Rekaman : Judul : Sub judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

produk fisi, aktivasi, dan residu garam. Data ini penting untuk mendukung analisis keselamatan dan perancangan fasilitas pembuangan [2];

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 42 dari 62

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

	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sub judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

- **Uji volatilitas pada proses peleburan dan paduan:**

Diperlukan eksperimen skala laboratorium hingga pilot untuk mengevaluasi volatilitas isotop seperti Cs, Sr, Ru, dan Mo selama peleburan, serta pengaruh atmosfer dan fluks pada tingkat retensi radionuklida [4; 7];

- **Validasi pemodelan transport tritium pada dinding logam:**

Pemodelan difusi tritium memerlukan data eksperimen yang menggambarkan perilaku transport tritium pada berbagai paduan logam MSR, di bawah kondisi termal dan redoks yang berbeda [17; 19];

- **Pemantauan korosi daring:**

Pengembangan sistem pemantauan korosi in-situ untuk lingkungan garam cair berfluorida akan mendukung strategi perawatan prediktif dan memperpanjang masa operasi komponen logam sebelum menjadi limbah [14];

- **Karakterisasi produk aktivasi dari paduan eksotik:**

Penelitian terhadap produk aktivasi dari paduan eksotik seperti Hastelloy-N, MONICR, dan Alloy 800H masih terbatas. Pemahaman mengenai isotop dominan, distribusi radionuklida, dan peluruhan jangka panjang diperlukan untuk menentukan jalur pengelolaan akhir yang sesuai [7; 14];

- **Evaluasi jangka panjang bentuk limbah logam:**


Uji ketahanan terhadap korosi, panas, dan radiasi perlu dilakukan untuk paduan hasil peleburan atau bentuk cermet yang diusulkan sebagai bentuk limbah stabil. Validasi perilaku mekanik dan kimia produk dalam kondisi repository geologi akan menjadi dasar persetujuan pengawasan di masa depan [11; 12].

4.4 Limbah Dekomisioning

Arus limbah ini mencakup komponen struktural, peralatan bantu, dan material non-struktural yang dihasilkan selama kegiatan pembersihan akhir dan pembongkaran fasilitas reaktor garam cair (MSR) pada akhir masa layanannya.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 43 dari 62

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

	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

Proses dekomisioning dan dekontaminasi (D&D) pada MSR memiliki isu yang unik dibandingkan reaktor konvensional karena adanya kontaminasi luas oleh garam fluorida yang bersifat korosif serta adanya produk fisi beraktivitas tinggi yang melekat pada komponen sistem sirkuit primer [2; 6].

4.4.1 Karakteristik Penting dan Persyaratan Pembuangan

4.4.1.1 Karakteristik Kimiawi dan Radiologis

- **Kontaminasi residu garam:**

Tantangan utama dalam D&D MSR adalah keberadaan residu garam fluorida yang tersisa dan dapat mengeras di celah-celah atau menempel sebagai kristal pada permukaan logam maupun grafit.

Residu tersebut berasal dari bahan bakar bekas yang beraktivitas tinggi dan sering mengandung aktinida, lantanida, serta halida berumur panjang seperti I-129 dan Cs-137.

Sifat kimia garam yang sangat reaktif dan kelarutan air yang tinggi menjadikannya sumber utama kesulitan dalam proses pembersihan dan pengemasan limbah [305].

- **Material terkontaminasi:**

Material dari pembongkaran sistem proses, hot cell, peralatan penanganan jarak jauh, tangki penyimpanan, serta area pengolahan limbah seringkali mengandung residu kimia korosif dan radionuklida pemancar alfa dengan aktivitas tinggi.

Kontaminasi ganda antara bahan logam, polimer, dan garam memperumit pemisahan serta klasifikasi limbah [7; 280].

- **Komponen teraktivasi:**

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 44 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
	<p>Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sob judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir</p>

Selain kontaminasi permukaan, beberapa komponen mengalami aktivasi neutron jangka panjang, terutama di daerah teras dan reflektor reaktor.

Berbeda dari reaktor konvensional, limbah dari fasilitas siklus bahan bakar pada MSR lebih didominasi oleh kontaminasi permukaan akibat kontak langsung dengan garam [3; 7].

4.4.1.2 Persyaratan Pembuangan

Prinsip perencanaan dan pelaksanaan D&D untuk MSR mengikuti pendekatan terstruktur yang telah diterapkan pada reaktor konvensional:

limbah yang dihasilkan harus dipotong, didesinfeksi, dikemas, dan diklasifikasikan sesuai tingkat aktivitasnya sebelum diproses sebagai LLW (Low-Level Waste) atau ILW (Intermediate-Level Waste) [2].

Selain itu, setiap proyek D&D harus menyertakan:

- Rencana dekomisioning lengkap, termasuk estimasi kuantitas, klasifikasi, dan karakteristik limbah yang akan dihasilkan;
- Dokumentasi desain fasilitas dan gambar as-built, untuk mendukung kegiatan segmentasi dan perhitungan dosis radiasi pekerja;
- Tujuan kondisi akhir yang aman (end-state), baik berupa green field maupun brown field, sesuai dengan kriteria yang ditetapkan oleh badan pengawas [9].


4.4.2 *Strategi Pembuangan*

Strategi pembuangan limbah D&D dari MSR berfokus pada pengurangan volume, dekontaminasi, dan pembuangan aman, yang disesuaikan dengan tingkat aktivitas material:

- **Reduksi ukuran dan pengemasan:**

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 45 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
	<p>Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sub judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir</p>

Komponen besar seperti bejana reaktor, pipa, dan sistem penukar panas dipotong menjadi bagian yang lebih kecil agar mudah dikemas dan diangkut ke fasilitas pengolahan [3];

- **Daur ulang komponen tertentu:**

Beberapa material logam atau struktur dengan kontaminasi rendah dapat didaur ulang atau dilebur ulang setelah menjalani dekontaminasi untuk mengurangi biaya dan volume pembuangan;

- **Dekontaminasi area bangunan:**

Setelah sistem dan komponen radioaktif diangkat, permukaan bangunan dilakukan dekontaminasi kimia atau mekanik untuk menurunkan tingkat radiasi sebelum bangunan dimanfaatkan kembali [3];

- **Pembuangan akhir pada repository yang sesuai:**

Material dengan aktivitas tinggi atau yang mengandung kontaminasi garam tetap harus dibuang di fasilitas penyimpanan lestari untuk menjamin keselamatan jangka panjang [30].

4.4.3 Strategi Pengolahan

Fokus strategi pengolahan limbah D&D dari MSR adalah menghilangkan residu garam radioaktif dan bahan berbahaya dari permukaan komponen sebelum pembuangan atau daur ulang.

- **Pembersihan kimia:**

Metode berbasis pelarut atau larutan asam digunakan untuk melarutkan dan menyingkirkan garam fluorida yang melekat pada permukaan logam. Proses ini sering disertai dengan rinsing dan pengeringan agar tidak meninggalkan sisa pelarut higroskopis [3; 4];

- **Dekontaminasi organik berbasis gel atau mousse:**

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 46 dari 62

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 : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sub judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

Pendekatan baru yang sedang dikembangkan menggunakan sistem berbasis gel dengan oksidator kuat, seperti Ce(IV), yang dapat menurunkan laju dosis pada baja tahan karat terkontaminasi aktinida. Metode ini diadaptasi dari aplikasi industri dan dapat diaplikasikan pada permukaan kompleks [37];

- **Dekontaminasi mekanik:**

Pengamplasan, pemotongan dengan jet air bertekanan tinggi, dan abrasive blasting digunakan untuk permukaan besar yang tidak dapat dipindahkan, dengan pengumpulan limbah sekunder yang terkontrol [3];

- **Klasifikasi ulang dan penyimpanan sementara:**

Material yang berhasil didekontaminasi hingga di bawah batas aktivitas yang diizinkan dapat diklasifikasikan ulang sebagai clearable waste atau recyclable metal, sedangkan material yang masih beraktivitas tinggi disimpan sementara sebelum pembuangan akhir [4].

4.4.4 Tantangan

- **Kontaminasi garam yang sangat korosif dan beraktivitas tinggi:**

Salah satu tantangan terbesar dalam kegiatan D&D MSR adalah penanganan residu garam fluorida yang bersifat higroskopis dan korosif.

Residu ini dapat menghasilkan gas fluor (F_2) atau asam fluorida (HF) bila terpapar kelembapan udara, menimbulkan risiko keselamatan bagi pekerja dan mempercepat korosi peralatan serta wadah penyimpanan limbah [30].

Selain itu, karena garam mengandung produk fisi dan aktinida, tingkat radiasi permukaan komponen yang terkontaminasi dapat sangat tinggi, mempersulit pengangkatan dan segmentasi [63; 25].

- **Potensi limbah campuran (radioaktif dan berbahaya):**

Banyak komponen pada sistem garam MSR yang terkontaminasi baik oleh radionuklida maupun senyawa kimia toksik atau reaktif. Akibatnya, sebagian

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 47 dari 62

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

	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sub judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

besar limbah D&D tergolong sebagai mixed waste yang memerlukan kepatuhan ganda terhadap regulasi limbah radioaktif dan limbah berbahaya, termasuk uji TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) untuk penetapan klasifikasi [25].

- **Kesulitan dalam pembersihan total sistem garam:**

Karena garam dapat mengeras di celah pipa, pompa, dan penukar panas, tidak semua residu dapat dihilangkan melalui proses kimia atau mekanik.

Kontaminasi residu ini menuntut strategi segmentasi komponen yang cermat dan desain fasilitas pengolahan dengan sistem ventilasi berkapasitas tinggi untuk mengelola gas korosif yang dihasilkan selama pembersihan [6];

- **Paparan dosis radiasi tinggi selama pembongkaran:**

Tingkat radiasi dari residu garam bekas dan produk fisi menyebabkan paparan eksternal yang signifikan pada pekerja, terutama selama pembongkaran sistem sirkuit primer. Prosedur kerja jarak jauh (remote handling) dan penggunaan robotik menjadi sangat penting untuk mengurangi dosis kolektif [3];

- **Manajemen limbah sekunder:**

Proses dekontaminasi kimia dan mekanik menghasilkan limbah sekunder seperti larutan asam terkontaminasi, lumpur, filter, dan residu abrasif.

Limbah sekunder ini memerlukan pengolahan lebih lanjut sebelum dapat dibuang atau disimpan dengan aman [27];


- **Keterbatasan pengalaman praktis:**

Karena belum ada fasilitas MSR komersial yang mengalami dekomisioning penuh, pengalaman langsung dalam skala besar masih sangat terbatas.

Sebagian besar data yang tersedia berasal dari eksperimen kecil di Oak Ridge National Laboratory (ORNL) atau dari proyek reaktor riset, sehingga masih diperlukan pembelajaran operasional yang signifikan sebelum penerapan aktual [25].

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 48 dari 62

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

	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sub judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

4.4.5 Kesenjangan Pengetahuan dan Kebutuhan Riset

Untuk memastikan bahwa proses D&D pada fasilitas MSR dapat dilakukan dengan aman, efisien, dan ekonomis, berbagai bidang riset teknis dan regulatori perlu diperkuat.

- **Neraca massa dan komposisi limbah D&D:**

Diperlukan pengembangan baseline yang mencakup neraca massa serta komposisi kimia dan radiologis dari seluruh arus limbah D&D.

Data ini akan menjadi acuan penting untuk desain fasilitas pengolahan, pengemasan, dan repository akhir [36];

- **Pengembangan Form of Record (FOR) awal untuk limbah MSR:**

Belum ada FOR khusus yang mendokumentasikan karakteristik dan klasifikasi limbah hasil D&D MSR. Pengembangan FOR diperlukan agar sistem pengelolaan limbah nasional selaras dengan konsep repository generik dan standar IAEA [38];

- **Penelitian mekanisme degradasi material:**

Studi eksperimental tentang mekanisme korosi dan degradasi material struktural akibat interaksi jangka panjang dengan garam fluorida masih terbatas.

Pengetahuan ini penting untuk memprediksi integritas struktural selama operasi, D&D, dan pembuangan akhir [30];

- **Teknologi karakterisasi non-destruktif (NDT):**

Diperlukan pengembangan metode karakterisasi radiologi dan kimia non-destruktif untuk mendeteksi kontaminasi internal pada pipa, bejana, atau sistem tertutup, sehingga dapat mengoptimalkan segmentasi dan meminimalkan limbah [38];

- **Evaluasi bentuk limbah dengan kontaminasi garam:**

Riset perlu difokuskan pada pembuatan bentuk limbah (waste form) yang mampu menahan efek korosif dari garam fluorida.

Pendekatan berbasis komposit atau matriks polimer-inert mungkin dapat digunakan untuk menstabilkan sisa garam sebelum pembuangan [3];

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 49 dari 62

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


	<p style="text-align: center;"> 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/ </p>
Jenis Rekaman : Judul : Sub judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

- **Pengembangan metodologi optimasi D&D MSR:**

Model optimasi yang mengintegrasikan risiko radiologis, biaya ekonomi, dan dampak lingkungan perlu dikembangkan untuk membantu pengambil keputusan dalam menentukan prioritas pembongkaran dan strategi pembuangan [30].

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 50 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
	<p>Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sob judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir</p>

BAB 5 REKOMENDASI KEBIJAKAN PENANGANAN LIMBAH MSR

5.1 Pendahuluan

Berdasarkan kajian mendalam terhadap karakteristik unik dan kompleksitas limbah *Molten Salt Reactor* (MSR) serta kerangka hukum internasional yang berlaku, Bab ini menyusun rekomendasi kebijakan pengawasan bagi BAPETEN. Rekomendasi ini dirumuskan untuk mengantisipasi tahap permohonan perizinan PLTN TMSR-500 oleh ThorCon, dengan fokus pada aspek pengelolaan limbah radioaktif dan bahan bakar bekas. Tujuannya adalah membangun kerangka regulasi yang proaktif, spesifik, dan robust, guna menjamin keselamatan jangka panjang, memenuhi kewajiban internasional, sebagaimana tercatuman pada *Joint Convention*, serta mencegah beban yang tidak semestinya bagi generasi mendatang, sebagaimana ditekankan dalam Pasal 11(vii) *Joint Convention* dan standar keselamatan IAEA.


5.2 Rekomendasi Kerangka Regulasi dan Perizinan Terintegrasi

BAPETEN perlu segera mereview dan mengembangkan kerangka regulasi serta sistem perizinan yang secara eksplisit mengakomodasi karakteristik khusus MSR. Prinsip "integrasi dari awal" harus diterapkan, di mana aspek pengelolaan limbah menjadi bagian tak terpisahkan dari setiap tahap perizinan.

1. **Pengembangan Peraturan Teknis Khusus MSR:** BAPETEN perlu menyusun atau merevisi peraturan teknis (Perka BAPETEN) dan panduan keselamatan yang secara khusus mengatur desain, operasi, dan dekomisioning MSR, termasuk klasifikasi limbahnya. Peraturan ini harus selaras dengan **IAEA GSR Part 5 (Pre-disposal Management)** dan **SSR-5 (Disposal of Radioactive**

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 51 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
	<p>Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sub judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir</p>

Waste), yang menekankan tanggung jawab regulator untuk menetapkan kerangka hukum yang jelas (Requirement 3 GSR Part 5 dan Requirement 1 SSR-5).


2. **Integrasi Persyaratan Limbah ke dalam Tahap Perizinan:** Setiap tahap perizinan (izin lokasi, konstruksi, komisioning, operasi) harus mengandung persyaratan spesifik terkait pengelolaan limbah MSR yang progresif dan terverifikasi.
 - a. **Persetujuan Tapak dan Izin Konstruksi:** Persyaratan harus mencakup analisis dampak lingkungan yang mendalam terkait seluruh aliran limbah MSR, serta desain awal fasilitasi penanganan dan penyimpanan limbah.
 - b. **Persetujuan Komisioning dan Izin Operasi:** Persyaratan harus mewajibkan adanya prosedur operasional terperinci untuk penanganan, karakterisasi, dan pemantauan limbah, termasuk sistem manajemen darurat untuk insiden terkait limbah.
3. **Penerapan Prinsip Kebijakan dan Strategi Nasional:** Sesuai IAEA NW-G-1.1, BAPETEN, dalam koordinasi dengan pemerintah, harus memastikan bahwa persyaratan perizinan untuk PLTN MSR selaras dengan dan mendukung terwujudnya Kebijakan dan Strategi Nasional Pengelolaan Limbah Radioaktif yang komprehensif dan memiliki kekuatan hukum.

5.3 Rekomendasi Persyaratan Khusus bagi Operator

Sebagai bagian dari proses perizinan, BAPETEN harus menetapkan persyaratan wajib yang harus dipenuhi dan dibuktikan oleh calon operator (ThorCon) sebagai bagian dari dokumentasi keselamatan.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 52 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
	<p>Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sob judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir</p>

5.3.1 Rencana Pengelolaan Limbah Terpadu

Operator wajib menyusun dan menyerahkan **Rencana Pengelolaan Limbah Terpadu (Integrated Waste Management Plan)** yang komprehensif sejak permohonan izin konstruksi. Rencana ini harus mencakup seluruh siklus hidup instalasi dan menguraikan secara rinci untuk setiap aliran limbah (garam bekas, grafit, logam teraktivasi, limbah dekomisioning): strategi penanganan, pengolahan, kondisioning, penyimpanan sementara, transportasi, dan pembuangan akhir, termasuk perkiraan biaya dan skema pendanaan yang terjamin. Hal ini selaras dengan **Requirement 2 GSR Part 5** yang mewajibkan adanya strategi pengelolaan limbah.

5.3.2 Karakterisasi dan Klasifikasi Limbah

Operator wajib mengembangkan dan mendapatkan persetujuan BAPETEN atas protokol karakterisasi limbah yang spesifik untuk MSR. Protokol ini harus mampu mengidentifikasi secara akurat komposisi kimia, fisika, dan radiologi limbah yang kompleks, termasuk inventaris radionuklida seperti C-14, H-3, dan logam mulia fisi. Hasil karakterisasi harus menjadi dasar klasifikasi limbah (LLW, ILW, HLW) sesuai peraturan yang berlaku, dengan mempertimbangkan potensi klasifikasi sebagai *hazardous mixed waste* akibat toksisitas kimia (misalnya, Be, Li).

5.3.3 Desain Sistem dan Fasilitas Penanganan Limbah

Desain semua sistem penanganan limbah harus memenuhi prinsip keselamatan terdalam (*defence in depth*) dan mengatasi tantangan operasional unik MSR.

- 1. Keselamatan Pasif dan Pengendalian Korosi:** Sistem harus dirancang untuk meminimalisir intervensi operator, terutama dalam menangani garam bekas

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 53 dari 62

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

	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sub judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

bersuhu tinggi dan korosif. Material yang digunakan harus tahan terhadap korosi fluorida dan degradasi radiasi.

2. **Manajemen Gas:** Desain harus menyertakan sistem penanganan dan pemrosesan gas (off-gas) yang efektif untuk menangkap dan memproses produk volatil (F₂, gas mulia) dan tritium (H-3), mencegah akumulasi tekanan berbahaya dan pelepasan ke lingkungan.
3. **Kemudahan Dekomisioning:** Prinsip *Design for Decommissioning* harus diterapkan, termasuk dokumentasi material yang terperinci dan pertimbangan untuk segmentasi dan pembongkaran di masa depan.

5.3.4 Penyimpanan Sementara dan Strategi Pembuangan Akhir

Operator wajib memberikan kajian kelayakan dan komitmen pendanaan yang terikat secara hukum untuk kedua aspek berikut:

1. **Fasilitas Penyimpanan Sementara (*Interim Storage*):** Kajian harus mencakup desain fasilitas penyimpanan sementara yang aman untuk semua bentuk limbah terkondisi (terutama garam bekas yang diimobilisasi), dengan durasi penyimpanan yang jelas, mempertimbangkan tantangan panas peluruhan, radiolisis, dan korosi jangka panjang.
2. **Strategi Pembuangan Akhir (*Final Disposal*):** Operator harus mengajukan strategi pembuangan akhir yang konkret, termasuk identifikasi opsi repositori geologi yang sesuai (misalnya, formasi garam, batuan keras) untuk setiap kelas limbah, beserta roadmap pengembangannya. Hal ini merupakan amanat dari SSR-5 (**Requirement 4**) yang mewajibkan adanya *safety case* untuk fasilitas pembuangan.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 54 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
	<p>Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sob judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir</p>

5.4 Rekomendasi Program Verifikasi dan Pemantauan

BAPETEN perlu mengembangkan kapasitas dan program khusus untuk memverifikasi kepatuhan operator terhadap semua persyaratan terkait limbah.

1. **Program Inspeksi Khusus MSR:** Menyusun pedoman inspeksi yang mencakup titik kritis (critical points) dalam sistem pengelolaan limbah MSR, seperti proses imobilisasi garam, dekontaminasi grafit, dan manajemen sistem off-gas.
2. **Verifikasi Data Karakterisasi Limbah:** Membangun atau mengakreditasi kapasitas laboratorium untuk melakukan analisis independen dan verifikasi terhadap data karakterisasi limbah yang disampaikan operator.
3. **Pemantauan Lingkungan Spesifik:** Mengembangkan program pemantauan lingkungan di tapak dan sekitarnya yang secara khusus dapat mendeteksi potensi pelepasan radionuklida khas MSR (seperti F-18, H-3, C-14) dan parameter kimia terkait (fluorida, berilium).

5.5 Rekomendasi Pengembangan Kapasitas dan Riset Pengawasan

Agar dapat melaksanakan peran pengawasan secara efektif, BAPETEN harus secara strategis membangun kompetensi internal.

1. **Pembangunan Kompetensi SDM:** Melaksanakan program pelatihan khusus dan berkelanjutan bagi staf pengawas dan penilai keselamatan (safety assessor) pada teknologi MSR, kimia garam fluorida, dan teknik pengelolaan limbah maju.
2. **Roadmap Riset Pengawasan:** Memimpin atau berpartisipasi aktif dalam program riset nasional dan internasional untuk mengisi *knowledge gap* yang diidentifikasi dalam Bab 4, khususnya terkait:
 - a. Validasi bentuk limbah (waste form) stabil untuk garam fluorida (gelas fosfat, cermet).
 - b. Metode dekontaminasi dan daur ulang untuk grafit teriradiasi.
 - c. Pemodelan migrasi tritium dan radionuklida lain di lingkungan.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 55 dari 62

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

	<p style="text-align: center;">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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sub judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

d. Kajian keselamatan (safety assessment) khusus untuk repositori yang akan menerima limbah MSR.

3. Kerja sama Internasional: Memperkuat jejaring dengan badan regulator negara lain yang mengkaji teknologi MSR dan dengan IAEA, untuk berbagi pengetahuan dan pengalaman dalam menilai aspek keselamatan limbah dari reaktor generasi IV ini.

Dengan mengimplementasikan rekomendasi kebijakan di atas, BAPETEN akan memiliki fondasi yang kuat untuk mengawasi pengelolaan limbah MSR secara komprehensif, memastikan bahwa perkembangan energi nuklir di Indonesia dilakukan dengan prinsip keselamatan tertinggi dan keberlanjutan yang bertanggung jawab.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 56 dari 62

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

	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

BAB 6 KESIMPULAN

Kajian ini disusun sebagai respons proaktif BAPETEN terhadap rencana pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) pertama di Indonesia yang menggunakan teknologi reaktor garam cair (Molten Salt Reactor/MSR) TMSR-500. Tujuannya adalah untuk memberikan landasan teknis dan rekomendasi kebijakan pengawasan yang solid, guna memastikan aspek keselamatan pengelolaan limbah radioaktif dan bahan bakar bekas yang unik dari teknologi ini terintegrasi sejak dini ke dalam kerangka regulasi nasional.

Tantangan pengawasan utama yang dihadapi BAPETEN bersifat multidimensi. Pertama, teknologi MSR merupakan *first-of-a-kind* (FOAK) tanpa preseden pengalaman operasional dan pengelolaan limbah yang komprehensif di tingkat global. Kedua, karakteristik limbahnya sangat kompleks dan berbeda dari reaktor konvensional, meliputi garam bahan bakar bekas yang reaktif dan beraktivitas tinggi, limbah grafit dengan kandungan C-14 dan tritium, limbah logam teraktivasi, serta limbah dekomisioning yang terkontaminasi garam fluorida korosif. Ketiga, terdapat kesenjangan signifikan antara kebutuhan pengelolaan limbah MSR tersebut dengan infrastruktur regulasi, fasilitas, dan kapasitas teknis yang saat ini dimiliki Indonesia.

Jawaban atas tantangan-tantangan mendasar tersebut terletak pada pembangunan sebuah kerangka regulasi yang proaktif, spesifik, dan kokoh. Seperti dirinci dalam Bab 5, kerangka ini harus bersifat terintegrasi, mencakup penguatan peraturan teknis, penyempurnaan sistem perizinan dengan persyaratan limbah yang ketat, serta pengembangan kapasitas pengawasan yang mumpuni. Seluruh rekomendasi tersebut berlandaskan pada prinsip-prinsip keselamatan internasional (Joint Convention, IAEA

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 57 dari 62

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

	<p style="text-align: center;"> 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/ </p>
	<p> Jenis Rekaman : Rekaman Unit Kerja Judul : Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Sob judul : Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir </p>

GSR Part 5, SSR-5) dan prinsip kehati-hatian (precautionary principle), dengan tujuan akhir melindungi masyarakat dan lingkungan baik untuk masa kini maupun masa depan. Implementasi dari rekomendasi kebijakan ini bersifat mendesak dan harus segera dimulai. Tindak lanjut konkret perlu meliputi sosialisasi dan internalisasi rekomendasi di seluruh unit kerja BAPETEN, koordinasi intensif dengan kementerian/lembaga terkait untuk menyusun strategi nasional, serta komunikasi yang jelas dengan calon operator mengenai ekspektasi dan kewajiban regulasi. Kesiapan sistem pengawasan limbah yang matang bukanlah pilihan, melainkan prasyarat mutlak yang harus dipenuhi sebelum izin pembangunan dan operasi PLTN MSR dapat diterbitkan.

Dengan mengadopsi dan melaksanakan rekomendasi kebijakan dalam dokumen ini, Indonesia akan membuktikan komitmennya untuk mengembangkan energi nuklir secara bertanggung jawab. Pendekatan ini akan memastikan bahwa pemanfaatan teknologi baru dilakukan dengan standar keselamatan tertinggi, berwawasan keberlanjutan, dan secara etis memenuhi kewajiban untuk tidak mewariskan beban pengelolaan risiko yang belum terselesaikan kepada generasi mendatang. Dengan demikian, kemandirian energi dapat diraih tanpa mengorbankan prinsip perlindungan keselamatan yang menjadi landasan utama pengawasan ketenaganukliran.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 58 dari 62

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


	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

DAFTAR PUSTAKA

1. Riley, B. J., McFarlane, J., DelCul, G. D., Vienna, J. D., Contescu, C. I., and Forsberg, C. W. 2019. "Molten Salt Reactor Waste and Effluent Management Strategies: A Review." *Nuclear Engineering and Design* 345:94-109.
2. Riley, B. J., McFarlane, J., DelCul, G. D., Vienna, J. D., Contescu, C. I., Hay, L. M., Savino, A. V., and Adkins, H. E. 2018. "Identification of Potential Waste Processing and Waste Form Options for Molten Salt Reactors." NTRD-MSR-2018-000379, PNNL-27723.
3. Kitcher, E. D. 2020. "A White Paper: Potential Disposition Options for a Liquid-Fueled Molten Salt Reactor at INL." INL/EXT-20-57831.
4. McFarlane, J., Riley, B. J., Holcomb, D. E., Lines, A., Andrews, H. B., Bryan, S. A., Chapel, A. S., Ezell, N. D. B., Felmy, H. M., Greenwood, M. S., Humrickhouse, P. W., and Myhre, K. G. 2020. "Molten Salt Reactor Engineering Study for Off-Gas Management." ORNL/TM-2020/1602, PNNL-30159.
5. Forsberg, C. W., Peterson, P. F., and Blandford, E. 2024. "Roadmap of Graphite Moderator and Graphite-Matrix TRISO Fuel Management Options." *Nuclear Technology* 210:1623-1638.
6. Compilation Notes. Chapter 3: Identification of MSR Waste Streams. Unpublished Internal Summary.
7. International Atomic Energy Agency. 2013. "Waste from Innovative Types of Reactors and Fuel Cycles." IAEA Nuclear Energy Series NW-T-1.7.
8. Riley, B. J. and Vienna, J. D. 2022. "Nuclear Waste Management Strategy for Molten Salt Reactor Systems." GIF Webinar.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 59 dari 62


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 : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

9. Matteo, E., Price, L., Pulido, R., Weck, P., Taconi, A., Mariner, P., Hadgu, T., Park, H., Greathouse, J., and Sassani, D. 2023. "Advanced Reactors Spent Fuel and Waste Streams Disposition Strategies." SAND2023-08602R.
10. Burchell, T. and Pappano, P. 2010. "The Characterization of Grade PCEA Recycle Graphite Pilot Scale Billets." ORNL/TM-2010/00169.
11. Westsik Jr., J. H., Cantrell, K. J., Serne, R. J., Qafoku, N. P., 2014. "Technetium Immobilization Forms Literature Survey." PNNL-23329, EMSP-RPT-023.
12. Andrews, H. B., McFarlane, J., Chapel, A. S., Ezell, N. D. B., Holcomb, D. E., de Wet, D., Greenwood, M. S., Myhre, K. G., Bryan, S. A., Lines, A., Riley, B. J., Felmy, H. M., and Humrickhouse, P. W. 2021. "Review of Molten Salt Reactor Off-Gas Management Considerations." Radioanalytical and Nuclear Chemistry 332(6).
13. Forsberg, C. W., Lam, S., Carpenter, D. M., Whyte, D. G., Scarlet, R., Contescu, C., Wei, L., Stempien, J., and Blandford, E. 2017. "Tritium Control and Capture in Salt-Cooled Fission and Fusion Reactors: Status, Challenges, and Path Forward." Nuclear Technology 197(2):119-139.
14. Felmy, H. M., A. J. Clifford, A. S. Medina, R. M. Cox, J. M. Wilson, A. M. Lines, and S. A. Bryan. 2021. "On-Line Monitoring of Gas-Phase Molecular Iodine Using Raman and Fluorescence Spectroscopy Paired with Chemometric Analysis." Environ. Sci. Technol. 93(14):5890-5896.
15. Vienna, J. D., E. D. Collins, J. V. Crum, W. L. Ebert, S. M. Frank, T. G. Garn, D. Gombert, R. Jones, R. T. Jubin, V. C. Maio, J. C. Marra, J. Matyas, T. M. Nenoff, B. J. Riley, G. J. Sevigny, N. R. Soelberg, D. M. Strachan, P. K. Thallapally, and J. H. Westsik. 2015. "Closed Fuel Cycle Waste Treatment Strategy." FCRD-MRWFD-2015-000674, PNNL-24114.
16. International Atomic Energy Agency. 1987. "Design of Off-Gas and Air Cleaning Systems at Nuclear Power Plants." IAEA-Technical Reports No. 274.

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 60 dari 62


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

	<p>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/</p>
Jenis Rekaman : Judul : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

17. Nuclear Regulatory Commission. 2015. "Standard Review Plan for Fuel Cycle Facilities License Applications." NUREG-1520 Rev. 2, ML15176A258.
18. Wu, H., F. Carotti, R. Gakhar, N. Patel, and R. Scarlet. 2018. "Fluorination of nuclear graphite IG-110 in molten 2LiF-BeF₂ (FLiBe) salt at 700 °C." Journal of Fluorine Chemistry.
19. Haubenreich, P. N. and J. R. Engel. 1970. "Experience with the molten-salt reactor experiment." Nuclear Applications & Technology 8(2):118-136.
20. Young, M., H. Wu, and R. Scarlet. 2015. "Characterization of tritium transport in the FLiBe-graphite system, for in-situ tritium absorption by the fuel elements of the fluoride-salt-cooled high-temperature reactor (FHR)." Proceedings of NURETH-16.
21. Riley, B. J. 2020. "Electrochemical salt wasteform development: A review of salt treatment and immobilization options." Industrial & Engineering Chemistry Research 59(21):9760-9774.
22. Drzewiecki, K., L. M. Toth, G. D. DelCul, E. M. Kitcher, J. D. Vienna, A. V. Savino, A. Lines, S. A. Bryan, and B. J. Riley. 2022. "Molten Salt Reactor Waste Management for the U.S. Context." NUREG-2246.
23. G. D. DelCul. 2018. "Recycling graphite through pulverization and acid leaching."
24. von Lensa, W., D. Vulpius, H.-J. Steinmetz, N. Girke, D. Bosbach, B. T. Jülich, A. W. Banford, D. Bradbury, B. Grambow, M. J. Grave, A. N. Jones, L. Petit, and G. Pina. 2011. "Treatment and disposal of irradiated graphite and other carbonaceous waste." ATW - International Journal for Nuclear Power.
25. Andrews, N., M. Higgins, A. Taconi, and J. Leute. 2021. "Preliminary Radioisotope Screening for Off-site Consequence Assessment of Advanced Non-ALWR Systems." SAND2021-11703.
26. U.S. Department of Energy. 1998. "Record of Decision for Interim Action to Remove Fuel and Flush Salts from the Molten Salt Reactor Experiment Facility at

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 61 dari 62

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 : Sob judul :	Rekaman Unit Kerja Rekomendasi Kebijakan Pengawasan PLTN Rekomendasi Kebijakan Keselamatan Limbah Nuklir SMR dan Dekomisioning Instalasi Nuklir

the Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee." DOE/OR/02-1671&D2.

27. Hollenbach, D. F. and C. M. Hopper. 1996. "Criticality Safety Study of the MSRE Auxiliary Charcoal Bed." ORNL/M-5450.
28. Trowbridge, L. D. 1997. "Technical Basis for the Use of CIF3 in the MSRE Reactive Gas Removal Project at Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee." ORNL/ER-402.
29. Zhao, H., C. Yan, L. Sun, K. Zhao, and D. Fa. 2015. "Design of a natural draft air-cooled condenser and its heat transfer characteristics in the passive residual heat removal system for 10 MW molten salt reactor experiment." Applied Thermal Engineering 76:423-434.
30. Vienna, J. D., N. R. Soelberg, W. L. Ebert, J. L. Willit, M. A. Williamson, S. M. Frank, G. Fredrickson, and B. J. Riley. 2015. "Initial Salt Waste Management Trade Study." FCRD-MRWFD-2015-000469.
31. U.S. Department of Energy. 2008. "Yucca Mountain Repository License Application." DOE/RW-0573, Update No. 1, NRC Docket No. 63-001.
32. U.S. Environmental Protection Agency. 1983. "Identification and Listing of Hazardous Waste." 40 CFR 261.
33. Foust, L. D. 1994. "Decision Regarding the Acceptance of Strontium Fluoride and Cesium Chloride as a Waste Form for the Repository." LY.SER.WFV.2/94-046.
34. U.S. Department of Energy. 2014. "Evaluation of Options for Permanent Geologic Disposal of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste in Support of a Comprehensive National Nuclear Fuel Cycle Strategy." SAND2014-0187P, SAND2014-0189P.
35. Paviet, P. 2022. "RIC Fuel Cycle MSR." ML22140A369.
36. Pereira, C. 2020. "MSRs recycle options."

No Rek : LT/STI/KN00/P2STPIBN/17/2025	Tanggal : 31 Desember 2023
Revisi : 0	Hal : 62 dari 62

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