



**INTEGRASI STANDAR KESELAMATAN IAEA DAN
PERATURAN BAPETEN UNTUK KESELAMATAN
OPERASIONAL PLTN *MOLTEN SALT REACTOR* (MSR) DI
INDONESIA**

TESIS

**UNIVERSITAS
MERCU BUANA**
PAHOTAN D.P. SILAEN
55324110001

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK INDUSTRI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MERCU BUANA
JAKARTA
2026**



**INTEGRASI STANDAR KESELAMATAN IAEA DAN
PERATURAN BAPETEN UNTUK KESELAMATAN
OPERASIONAL PLTN *MOLTEN SALT REACTOR* (MSR) DI
INDONESIA**

TESIS

PAHOTAN D.P. SILAEN

55324110001

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK INDUSTRI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MERCU BUANA
JAKARTA**

2026

HALAMAN PENYATAAN KARYA SENDIRI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Pahotan D.P. Silaen

NIM : 55324110001

Fakultas/Program Studi : Teknik/Magister Teknik Industri

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa Tesis berjudul:

“Integrasi Standar Keselamatan IAEA dan Peraturan BAPETEN untuk Keselamatan Operasional PLTN *Molten Salt Reactor* (MSR) di Indonesia” adalah hasil karya saya sendiri, tidak mengandung unsur plagiarisme, pelanggaran hak cipta, atau konten ilegal dalam bentuk apapun dan tidak melanggar hukum atau hak pihak manapun.

Apabila di kemudian hari ditemukan pelanggaran terhadap pernyataan ini, saya bersedia menanggung seluruh konsekuensi hukum dan membebaskan Universitas Mercu Buana dari segala bentuk tuntutan hukum dan saya siap mendapatkan sanksi akademis yang berlaku di Universitas Mercu Buana.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya untuk digunakan sebagaimana mestinya.

Jakarta, 22 Agustus 2026



Pahotan D.P. Silaen

SURAT KETERANGAN HASIL *SIMILARITY*

Menerangkan bahwa Jurnal / Karya Ilmiah / Laporan Tugas Akhir pada BAB I, BAB III, BAB IV, dan BAB V / Praktek Keinsinyuran atas nama:

Nama : **Pahotan D.P. Silaen**
NIM : **55324110001**
Program Studi : **Magister Teknik Industri**
Judul Tugas Akhir / Tesis
/ Praktek Keinsinyuran : **INTEGRASI STANDAR KESELAMATAN IAEA DAN PERATURAN BAPETEN UNTUK KESELAMATAN OPERASIONAL PLTN *MOLTEN SALT REACTOR* (MSR) DI INDONESIA**

Telah dilakukan pengecekan *Similarity* menggunakan aplikasi/sistem *Turnitin* pada **Sabtu, 22 Agustus 2026** dengan hasil presentase sebesar **16 %** dan dinyatakan memenuhi standar sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Fakultas Teknik Universitas Mercu Buana.

Demikian surat keterangan ini dibuat dan digunakan sebagaimana mestinya.

Jakarta, 22 Agustus 2026

Administrator Turnitin,



Itmam Haidi Syarif

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh:

Nama : Pahotan D.P. Silaen
NIM : 55324110001
Fakultas/Program Studi : Teknik/Magister Teknik Industri
Judul Tesis : Integrasi Standar Keselamatan IAEA dan
Peraturan BAPETEN untuk Keselamatan
Operasional PLTN *Molten Salt Reactor* (MSR)
di Indonesia.

Telah berhasil dipertahankan pada sidang tanggal 08 Agustus 2026 di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister pada Program Studi Magister Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana.

Disahkan oleh:

Pembimbing



(Jacky Chin, S.T., M.T., Ph.D)

NIDN: 0310078402

Jakarta, 22 Agustus 2026

Mengetahui,

Dekan
Fakultas Teknik



(Dr. Zulfa Fitri Ikatrinasari, M.T)

NIDN: 0307037202

Ketua Program Studi
Magister Teknik Industri



(Dr. Ir. Sawarni Hasibuan, M.T)

NIDN: 0416086504

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas kasih karunia, penyertaan, dan berkat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “Integrasi Standar Keselamatan IAEA dan Peraturan BAPETEN untuk Keselamatan Operasional PLTN Molten Salt Reactor (MSR) di Indonesia” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik Industri pada Program Studi Magister Teknik Industri Universitas Mercu Buana.

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh perkembangan teknologi reaktor generasi lanjut, khususnya Molten Salt Reactor (MSR), yang memiliki karakteristik operasional dan keselamatan yang berbeda dibandingkan reaktor konvensional berbasis air. International Atomic Energy Agency (IAEA) melalui Safety Reports Series (SRS) No. 123 telah mengidentifikasi berbagai area kebaruan (areas of novelty) dan tantangan operasional yang perlu mendapat perhatian dalam pengoperasian MSR. Di sisi lain, Peraturan BAPETEN Nomor 6 Tahun 2023 telah menetapkan persyaratan sistem manajemen yang harus diterapkan oleh pemegang izin fasilitas nuklir di Indonesia. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengintegrasikan area-area kebaruan MSR yang diidentifikasi oleh IAEA ke dalam elemen-elemen sistem manajemen sesuai Peraturan BAPETEN Nomor 6 Tahun 2023 melalui pendekatan Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), sehingga diperoleh rekomendasi pengendalian risiko yang dapat mendukung implementasi keselamatan operasional MSR secara terstruktur dan dapat diaudit.

Dalam proses penyusunan tesis ini, penulis memperoleh banyak bantuan, bimbingan, dukungan, dan doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Prof. Dr. Andi Adriansyah, M.Eng., selaku Rektor Universitas Mercu Buana.
2. Dr. Ir. Zulfa Fitri Ikatrinasari, M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Mercu Buana.

3. Dr. Ir. Sawarni Hasibuan, M.T., selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Industri Universitas Mercu Buana.
4. Jacky Chin, S.T., M.T., Ph.D., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, masukan, serta meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran dalam mendampingi penulis hingga tesis ini dapat diselesaikan dengan baik.
5. Seluruh dosen dan civitas akademika Program Studi Magister Teknik Industri Universitas Mercu Buana yang telah memberikan ilmu pengetahuan, wawasan, dan pengalaman selama masa perkuliahan.
6. Para narasumber dan pakar yang telah berpartisipasi dalam proses *expert judgment* dan memberikan masukan yang sangat berharga dalam penelitian ini.
7. Orang tua, serta seluruh keluarga yang selalu memberikan doa dan dukungan tanpa henti kepada penulis.
8. Teman-teman Magister Teknik Industri Universitas Mercu Buana yang telah memberikan semangat, bantuan, dan kebersamaan selama menjalani proses pendidikan dan seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah membantu dan mendukung penyelesaian tesis ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga Tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Jakarta, 22 Agustus 2026



Pahotan D.P. Silaen

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR DI REPOSITORI UMB

Sebagai sivitas akademik Universitas Mercu Buana, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Pahotan D.P. Silaen
NIM : 55324110001
Fakultas/Program Studi : Teknik/Magister Teknik Industri
Judul Tesis : Integrasi Standar Keselamatan IAEA dan
Peraturan BAPETEN untuk Keselamatan
Operasional PLTN *Molten Salt Reactor* (MSR)
di Indonesia.

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, dengan ini memberikan izin dan menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Mercu Buana **Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul di atas beserta perangkat yang ada (jika diperlukan).

Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif ini Universitas Mercu Buana berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan Tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Jakarta, 22 Agustus 2026

Yang menyatakan,



Pahotan D.P. Silaen

**INTEGRASI STANDAR KESELAMATAN IAEA DAN PERATURAN
BAPETEN UNTUK KESELAMATAN OPERASIONAL PLTN *MOLTEN*
SALT REACTOR (MSR) DI INDONESIA**

PAHOTAN D.P. SILAEN

ABSTRAK

Pengembangan *Molten Salt Reactor (MSR)* sebagai salah satu teknologi reaktor Generasi IV menawarkan keunggulan keselamatan dan efisiensi dibandingkan reaktor berbasis air. Namun, karakteristik operasional MSR yang melibatkan bahan bakar garam cair, sistem keselamatan pasif, dan produk samping radioaktif memerlukan penguatan sistem manajemen yang belum sepenuhnya terakomodasi dalam regulasi nasional. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi *gap* teknologi operasional MSR berdasarkan IAEA *Safety Reports Series (SRS)* No. 123, memetakannya terhadap elemen Sistem Manajemen Terintegrasi dalam PerBAPETEN Nomor 6 Tahun 2023, serta menentukan prioritas risiko dan usulan mitigasinya menggunakan metode *Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)*. Penelitian menggunakan pendekatan kualitatif-deskriptif yang dipadukan dengan analisis semi-kuantitatif. Identifikasi *gap* dilakukan melalui *compliance mapping* antara persyaratan keselamatan operasional MSR dan ketentuan sistem manajemen yang berlaku, kemudian dilanjutkan dengan penilaian risiko berbasis *expert judgment* oleh empat pakar melalui dua putaran FMEA. Hasil penelitian mengidentifikasi sepuluh *gap* utama keselamatan operasional MSR. Hasil FMEA Putaran I menunjukkan delapan *gap* berada pada kategori kritis dan dua *gap* berada pada kategori tinggi. Setelah penerapan usulan mitigasi dan penilaian ulang pada Putaran II, seluruh *gap* mengalami penurunan tingkat risiko, dengan enam *gap* berada pada kategori rendah dan empat *gap* berada pada kategori sedang. Nilai *Risk Priority Number (RPN)* mengalami penurunan sebesar 75,56% hingga 91,48%. Berdasarkan hasil tersebut, penelitian menghasilkan kerangka penguatan sistem manajemen keselamatan operasional MSR yang mengintegrasikan kebutuhan pengendalian teknis khas MSR ke dalam elemen sistem manajemen keselamatan.

Kata kunci: *Molten Salt Reactor (MSR)*, sistem manajemen keselamatan, IAEA SRS No. 123, PerBAPETEN Nomor 6 Tahun 2023, *Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)*.

**INTEGRASI STANDAR KESELAMATAN IAEA DAN PERATURAN
BAPETEN UNTUK KESELAMATAN OPERASIONAL PLTN MOLTEN
SALT REACTOR (MSR) DI INDONESIA**

PAHOTAN D.P. SILAEN

ABSTRACT

Molten Salt Reactor (MSR) technology offers significant safety and efficiency advantages compared with conventional water-cooled reactors. However, its unique operational characteristics, including liquid fuel salt, passive safety systems, and radioactive by-product management, require management system provisions that are not yet fully addressed in existing national regulations. This study aims to identify MSR operational safety gaps based on IAEA Safety Reports Series (SRS) No. 123, map these gaps to the Integrated Management System elements specified in BAPETEN Regulation No. 6 of 2023, and evaluate their risk priorities using the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) method. A qualitative-descriptive approach combined with semi-quantitative analysis was applied. Gap identification was conducted through compliance mapping, followed by a two-round FMEA assessment involving four experts from regulatory, academic, technical, and safety engineering backgrounds. The study identified ten major operational safety gaps related to MSR implementation. The first-round FMEA classified eight gaps as critical and two as high risk. After the proposed mitigation measures were incorporated and reassessed in the second round, all gaps showed reduced risk levels, with six categorized as low risk and four as medium risk. The Risk Priority Number (RPN) decreased by 75.56%–91.48%, indicating the effectiveness of the proposed mitigation measures. Based on these findings, a framework for strengthening the MSR operational safety management system was developed by integrating MSR-specific safety requirements into existing management system elements.

Keywords: *Molten Salt Reactor (MSR), safety management system, IAEA SRS No. 123, BAPETEN Regulation No. 6 of 2023, Failure Mode and Effects Analysis (FMEA).*

DAFTAR ISI

HALAMAN PENYATAAN KARYA SENDIRI	iii
SURAT KETERANGAN HASIL <i>SIMILARITY</i>	iv
HALAMAN PENGESAHAN	v
KATA PENGANTAR.....	vi
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR DI REPOSITORI UMB.....	viii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	x
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	7
1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian	7
1.3.1 Tujuan Penelitian	7
1.3.2 Manfaat Penelitian	8
1.4 Pembatasan Penelitian.....	8
BAB II KAJIAN PUSTAKA.....	9
2.1 Landasan Teori	9
2.2 Keselamatan Industri Nuklir	9
2.3 <i>International Atomic Energy Agency</i> (IAEA)	11
2.4 Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN).....	13
2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) dan MSR	14
2.6 Penelitian Terdahulu dan SOTA	15
2.6.1 Penelitian Terdahulu	15

2.6.2 Tabel SOTA	17
2.7 Kerangka Pemikiran	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	19
3.1 Jenis dan Desain Penelitian	19
3.2 Data dan Informasi	19
3.3 Teknik Pengumpulan Data	20
3.3.1 Studi Literatur	20
3.3.2 Studi Dokumentasi.....	20
3.3.3 <i>Expert Judgment</i>	21
3.4 Teknik Analisis Data	21
3.4.1 Identifikasi Gap Teknologi Operasional MSR	21
3.4.2 Pemetaan Gap terhadap Elemen Sistem Manajemen BAPETEN	22
3.4.3 Analisis Risiko Menggunakan FMEA	22
3.4.4 Perumusan Kerangka Integrasi	23
3.4.5 Evaluasi Perubahan Prioritas Risiko.....	23
3.5 Kriteria Penilaian <i>Severity</i> , <i>Occurrence</i> , dan <i>Detection</i> pada FMEA	24
3.6 Penentuan Pakar	26
3.7 Validitas Data	26
3.8 Langkah-langkah Penelitian	27
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	29
4.1 Hasil Analisis Deskriptif Dokumen	29
4.1.1 IAEA SRS No. 123.....	30
4.1.2 PerBAPETEN No. 6 Tahun 2023	34
4.2 Perumusan <i>Requirement</i> dan Pemetaan Gap	35
4.3 Hasil Analisis FMEA dan Perhitungan RPN (Putaran 1).....	39
4.3.1 Nilai S, O, D dan RPN Awal (Putaran 1)	39

4.4 Usulan Mitigasi Risiko Hasil FGD Putaran 1	46
4.4.1 Gambaran Umum Usulan Mitigasi	46
4.4.2 Mitigasi pada Pengelolaan Produk Radioaktif.....	48
4.4.3 Mitigasi pada Sistem Keselamatan Pasif	48
4.4.4 Mitigasi pada Pengendalian Kimia, Proses, dan Instrumentasi	49
4.4.5 Mitigasi pada Aspek SDM dan organisasi.....	51
4.4.6 Sintesis Hasil Mitigasi	51
4.5 Hasil Analisis FMEA dan Perhitungan RPN (Putaran 2).....	52
4.5.1 Nilai Rata-Rata <i>Severity</i> , <i>Occurrence</i> , <i>Detection</i> , dan <i>RPN</i>	52
4.5.2 Prioritas Risiko Berdasarkan Nilai <i>RPN</i> Putaran 2.....	54
4.5.3 Perubahan Profil Risiko dari Putaran 1 ke Putaran 2.....	56
4.5.4 Implikasi Hasil Putaran 2.....	57
4.6 Perbandingan Hasil <i>FMEA</i> Putaran 1 dan Putaran 2.....	58
4.6.1 Perubahan Tingkat Risiko.....	58
4.6.2 Besaran Penurunan Nilai <i>RPN</i>	59
4.6.3 Implikasi Perbandingan Dua Putaran	61
4.7 Kerangka Integrasi Sistem Manajemen Keselamatan Operasional <i>Molten Salt Reactor (MSR)</i>	62
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	67
5.1 Kesimpulan.....	67
5.2 Saran	68
DAFTAR PUSTAKA	70
LAMPIRAN.....	75

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian terdahulu.....	16
Tabel 2.2 Tabel SOTA	17
Tabel 3.1 Keterangan <i>gap to SM Mapping matrix</i>	22
Tabel 3. 2 Skala <i>Severity</i> (S)	24
Tabel 3. 3 Skala <i>Occurrence</i> (O)	25
Tabel 3. 4 Skala <i>Detection</i> (D).....	25
Tabel 3. 5 Kriteria Tingkat Risiko dan Tindakan Berdasarkan Nilai RPN.....	25
Tabel 4.1 Kelompok Pembahasan Area Kebaruan <i>Molten Salt Reactor</i> Berdasarkan IAEA SRS No. 123	31
Tabel 4.2 Area Kebaruan MSR dalam IAEA SRS No. 123 dalam Aspek Keselamatan Operasional.....	33
Tabel 4.3 Klausul PerBAPETEN No. 6/2023 Relevan dengan Keselamatan Operasional MSR.....	34
Tabel 4.4 Pemetaan <i>Requirement</i> IAEA SRS No. 123 dengan PerBAPETEN No. 6/2023.....	36
Tabel 4.5 <i>Gap Register</i>	38
Tabel 4.6 Penilaian dan Perhitungan Rata-rata FMEA pada putaran 1	41
Tabel 4.7 Urutan Prioritas Risiko.....	43
Tabel 4.8 Usulan Mitigasi Berdasarkan <i>Expert Judgment</i>	47
Tabel 4.9 Hasil Penilaian dan Perhitungan Rata-rata FMEA pada putaran 2.....	53
Tabel 4.10 Perbandingan Hasil FMEA Putaran 1 dan Putaran 2	59
Tabel 4.11 Kerangka Integrasi <i>Requirement</i> Keselamatan Operasional MSR ke dalam Sistem Manajemen	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Rata-rata emisi CO ₂	1
Gambar 1.2 Produksi listrik PLTN global	2
Gambar 1.3 Kecelakaan Three Mile Island.....	3
Gambar 1.4 Kecelakaan Chernobyl	3
Gambar 1.5 Kecelakaan Fukushima	4
Gambar 2.1 <i>Defense-in-depth</i>	10
Gambar 2.2 <i>Safety Fundamental</i>	12
Gambar 2.3 <i>Design MSR</i>	14
Gambar 2.4 Kerangka pemikiran	18
Gambar 3.1 Langkah-langkah penelitian	28
Gambar 4.1 Alur Analisis Dokumen.....	30
Gambar 4.2 Perubahan Nilai RPN pada FMEA Putaran 1 dan Putaran 2	58
Gambar 4.3 Persentase Penurunan Nilai RPN Setelah Mitigasi	60
Gambar 4. 4 Alur Pemetaan Requirement Keselamatan Operasional MSR terhadap Elemen Sistem Manajemen.....	66

UNIVERSITAS
MERCU BUANA

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi FGD.....	75
Lampiran 2. Hasil Pengisian Putaran 1	76
Lampiran 3. Hasil Pengisian FMEA Putaran 2	91
Lampiran 4. Hasil Turnitin.....	102

