TINJAUAN LITERATUR TERHADAP FAKTOR KONSTRUKSI DAN DESAIN YANG MENYEBABKAN KECELAKAAN INDUSTRI SMELTER :ANALISIS MATERIAL ALTERNATIF ALUMINA DAN MAGNESIA UNTUK MENGURANGI RISIKO KEGAGALAN MATERIAL DAN PERALATAN PADA INSIDEN LEDAKAN SMELTER TITANIUM 2023-2024

Medika Natalia Sitorus[1], Ramadhan Pradana Putra[2], Henni Susanti Pakpahan[3], Aldilah Herlambang[4], Oki Alfernano[5], Rizka Shafira[6]

[1,2,3,4,5,6]*Universitas Jambi*
E-mail : Chikasitorus21@gmail.com[1], ramadhanpradanaputra61@gmail.com[2], hennipakpahan89@gmail.com[3], alfernandooki@unja.ac.id[4], aldillah.herlambang@unja.ac.id[5], rizkashafira@unja.ac.id[6]

ABSTRAK

Kecelakaan industri pada fasilitas peleburan logam (smelter), khususnya pada smelter titanium, merupakan isu krusial dalam keselamatan proses industri karena melibatkan kondisi operasi ekstrem seperti suhu tinggi dan lingkungan kimia agresif. Insiden ledakan smelter titanium pada periode 2023–2024 menunjukkan adanya potensi kegagalan pada aspek material, peralatan, serta desain konstruksi yang belum sepenuhnya teridentifikasi secara komprehensif. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji faktor-faktor penyebab kecelakaan industri smelter dengan fokus pada kegagalan material serta mengevaluasi alternatif material yang lebih sesuai untuk meningkatkan keandalan sistem. Metode yang digunakan adalah Systematic Literature Review (SLR) dengan menganalisis publikasi ilmiah dalam rentang tahun 2021–2025 yang diperoleh dari basis data seperti Google Scholar, ScienceDirect, dan SpringerLink. Hasil kajian menunjukkan bahwa kegagalan material refractory akibat thermal shock, korosi suhu tinggi, serta penetrasi slag menjadi faktor dominan dalam memicu kerusakan furnace. Selain itu, kegagalan peralatan seperti malfunction furnace, tekanan berlebih, dan sistem pendinginan yang tidak optimal turut memperparah kondisi hingga menyebabkan ledakan. Sebagai upaya mitigasi, penelitian ini mengkaji penggunaan material alternatif berbasis alumina (Al_2O_3) dan magnesia (MgO) yang memiliki ketahanan tinggi terhadap suhu ekstrem, korosi slag, serta thermal shock. Hasil studi menunjukkan bahwa kedua material tersebut, baik secara tunggal maupun kombinasi, mampu meningkatkan ketahanan struktur refractory, mengurangi degradasi material, serta menurunkan risiko kegagalan sistem. Temuan ini menegaskan pentingnya integrasi antara pemilihan material yang tepat, desain konstruksi yang andal, serta sistem monitoring berbasis keselamatan proses untuk meminimalkan risiko kecelakaan dan meningkatkan keandalan fasilitas smelter.

Kata Kunci : *Smelter Titanium, Kegagalan Material, Material Alternatif Alumia Dan Magnesia, Keselamatan Proses, Studi Literatur.*

ABSTRACT

Industrial accidents in metal smelting facilities (smelters), particularly titanium smelters, are a crucial issue in industrial process safety due to the extreme operating conditions involved, such as high temperatures and aggressive chemical environments. The titanium smelter explosion incidents in 2023–2024 indicated potential failures in materials, equipment, and construction design that have not been comprehensively identified. This study aims to examine the factors causing smelter industrial accidents, focusing on material failure and evaluating more suitable material alternatives to improve system reliability. The method used was a Systematic Literature Review (SLR) analyzing scientific publications from 2021–2025 obtained from databases such as Google Scholar, ScienceDirect, and SpringerLink. The study results indicate that refractory material failure due to thermal shock, high-temperature corrosion, and slag penetration are the dominant factors triggering furnace failure. Furthermore, equipment failures such as furnace malfunction, excessive pressure, and suboptimal cooling systems exacerbated the situation, leading to explosions. As a mitigation measure, this study examines the use of alternative materials based on alumina (Al_2O_3) and magnesia (MgO), which offer high resistance to extreme temperatures, slag corrosion, and thermal shock. The study results show that both materials, either singly or in combination, can increase the durability of refractory structures, reduce material degradation, and lower the risk of system failure. These findings emphasize the importance of integrating appropriate material selection, reliable construction design, and a process safety-based monitoring system to minimize the risk of accidents and improve the reliability of smelter facilities.

Keywords : *Titanium Smelter, Material Failure, Alternative Materials Alumia And Magnesia, Process Safety, Literature Review.*

PENDAHULUAN

Hilirisasi melalui industri peleburan atau *smelter* memegang peranan krusial dalam rantai pasok material strategis global. Salah satu komoditas yang menjadi perhatian utama adalah titanium, di mana keberadaannya sangat menentukan performa sektor kedirgantaraan, industri kimia, hingga manufaktur berbasis teknologi tinggi. Proses smelter beroperasi pada kondisi ekstrem yang melibatkan temperatur tinggi, reaksi kimia agresif, serta beban termal dan mekanik yang kompleks, sehingga sistem sangat rentan terhadap kegagalan apabila desain dan pemilihan material tidak sesuai dengan kondisi operasi.

Stabilitas operasional furnace sangat bergantung pada integritas komponen krusial seperti tuyere, lining refractory, hingga sistem pendinginannya. Gangguan pada elemen-elemen tersebut tidak hanya menghambat proses produksi, tetapi juga berisiko tinggi memicu insiden fatal seperti ledakan. Secara teknis, kegagalan ini biasanya dipicu oleh sinergi antara thermal fatigue, erosi, serta anomali distribusi panas akibat malfungsi sistem pendingin. Dalam konteks material, refractory memiliki titik lemah pada degradasi akibat thermal shock, korosi temperatur tinggi, dan penetrasi slag, yang secara kolektif dapat mengikis integritas struktur furnace dalam jangka panjang

Selain aspek teknis material, konfigurasi desain dan variabel operasional turut menjadi determinan utama dalam eskalasi risiko kegagalan sistem. Hal ini sering kali berakar pada ketidaksesuaian spesifikasi material dengan kebutuhan lapangan, integritas desain yang belum optimal, serta keterbatasan pada sistem monitoring dan kontrol. Pada akhirnya, insiden pada unit smelter jarang sekali dipicu oleh faktor tunggal; melainkan merupakan manifestasi dari interaksi kompleks antara degradasi material, malfungsi peralatan, dan kelemahan pada arsitektur desain sistem secara keseluruhan.

Oleh karena itu, pemilihan material refractory yang tepat menjadi faktor krusial untuk menjaga reliabilitas dan keamanan operasional smelter. Mengingat material konvensional sering mengalami degradasi cepat akibat korosi slag dan suhu tinggi, penggunaan alternatif seperti alumina (Al_2O_3) dan magnesia (MgO) menjadi sangat relevan. Karakteristik stabilitas termal dan ketahanan kimia yang dimiliki kedua material ini diharapkan mampu mengoptimalkan performa sistem sekaligus menekan risiko kegagalan struktur di lapangan.

Studi ini difokuskan pada analisis sistematis mengenai faktor pemicu kecelakaan di *smelter* titanium, khususnya yang berakar dari kegagalan material dan peralatan. Selain itu, penelitian ini mengevaluasi sejauh mana material berbasis alumina dan magnesia dapat diimplementasikan sebagai solusi mitigasi risiko guna meningkatkan aspek keamanan operasional. Metode yang digunakan adalah Systematic Literature Review (SLR) dengan menganalisis berbagai publikasi ilmiah dalam rentang tahun 2021–2025. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan desain sistem yang lebih aman, pemilihan material yang lebih tepat, serta peningkatan keselamatan proses pada industri smelter modern.

Kajian Literatur Terhadap Material Alternatif Faktor Kontruksi Untuk Mengurangi Risiko Kecelakaan Industri Smelter

Faktor konstruksi dan desain merupakan elemen kritis dalam menjamin keandalan sistem smelter yang beroperasi pada kondisi ekstrem. Kegagalan pada aspek ini tidak hanya berdampak pada penurunan performa system. Kegagalan pada aspek ini tidak hanya menyebabkan penurunan kinerja sistem, tetapi juga berpotensi memicu kecelakaan serius seperti kebakaran dan ledakan pada furnace industri. Kesalahan desain pada sistem furnace sering dikaitkan dengan

ketidaksesuaian spesifikasi komponen terhadap kondisi operasi aktual. Studi menunjukkan bahwa kegagalan blast furnace tuyere dipengaruhi oleh ketidakseimbangan distribusi panas, gangguan sistem pendinginan, serta desain aliran termal yang tidak optimal, yang pada akhirnya mempercepat terjadinya thermal fatigue dan erosi material (Zhang et al., 2024). Selain itu, beban operasi yang melebihi kapasitas dapat menyebabkan degradasi struktural secara progresif (Zhang et al., 2024).

Dari sisi material konstruksi, pemilihan material yang tidak sesuai dengan kondisi suhu dan lingkungan kimia ekstrem menjadi faktor utama kegagalan sistem smelter. Refractory sebagai material pelapis furnace sering mengalami kerusakan akibat kesalahan desain ketebalan lining, distribusi panas yang tidak merata, serta ketidaksesuaian karakteristik material dengan slag proses. Kajian terbaru menunjukkan bahwa degradasi refractory seperti spalling dan cracking dipengaruhi oleh interaksi termal dan kimia yang kompleks (Lee et al., 2025).

Selain itu, aspek konstruksi seperti integritas sambungan struktur, desain mekanik furnace, serta sistem pendinginan juga berperan penting dalam menjaga stabilitas operasi. Ketidakefisienan desain sistem pendinginan dapat menyebabkan terbentuknya hotspot lokal yang mempercepat kegagalan material. Studi lain juga menunjukkan bahwa desain furnace yang tidak mempertimbangkan variasi beban termal dapat meningkatkan risiko instabilitas sistem secara signifikan (Wang et al., 2024). Selain itu, kegagalan peralatan seperti malfunction furnace, tekanan operasional yang tidak stabil, serta sistem pendinginan yang tidak optimal juga berkontribusi terhadap terbentuknya hotspot dan overheating. Hal ini semakin mempercepat degradasi material dan meningkatkan risiko kegagalan sistem secara menyeluruh. Di sisi lain, aspek desain konstruksi yang tidak mempertimbangkan kondisi operasi ekstrem serta ketidaktepatan dalam pemilihan material turut memperburuk kondisi tersebut (Sun et al., 2025).

Berdasarkan permasalahan tersebut, pemilihan material refractory yang tepat menjadi salah satu faktor kunci dalam meningkatkan keandalan dan keselamatan sistem smelter. Material konvensional yang memiliki ketahanan terbatas terhadap suhu tinggi dan korosi slag cenderung mengalami degradasi lebih cepat. Oleh karena itu, diperlukan alternatif material yang memiliki ketahanan lebih baik terhadap kondisi operasi ekstrem. Material berbasis alumina (Al_2O_3) dan magnesia (MgO) diketahui memiliki ketahanan tinggi terhadap suhu, korosi kimia, serta stabilitas termal yang baik, sehingga berpotensi digunakan sebagai solusi untuk meningkatkan performa refractory dan mengurangi risiko kegagalan sistem (Wang et al., 2022).

Industri smelter titanium merupakan sistem proses metalurgi dengan kondisi operasi ekstrem yang melibatkan suhu tinggi, reaksi kimia agresif, serta beban termal dan mekanik yang kompleks. Dalam beberapa tahun terakhir, berbagai studi menunjukkan bahwa kegagalan pada sistem furnace masih menjadi permasalahan utama dalam industri metalurgi, khususnya yang berkaitan dengan degradasi material, gangguan peralatan, dan kesalahan desain sistem.

Berbagai penelitian telah mengidentifikasi bahwa kegagalan komponen furnace seperti tuyere dan sistem pendinginan dapat dipicu oleh thermal fatigue, erosi, serta ketidakseimbangan distribusi panas yang menyebabkan instabilitas operasi sistem (Zhang et al., 2024). Selain itu, kegagalan peralatan seperti malfunction furnace, gangguan sistem pendinginan, serta ketidakseimbangan distribusi panas juga berkontribusi terhadap terbentuknya hotspot dan overheating yang dapat memicu kecelakaan (Sun et al., 2025). Di sisi lain, kesalahan dalam desain konstruksi, terutama dalam pemilihan material yang tidak sesuai dengan kondisi operasi, turut mempercepat terjadinya degradasi sistem (Ji et al., 2021).

Meskipun berbagai studi telah membahas aspek kegagalan material, peralatan, dan desain secara terpisah, masih terdapat keterbatasan dalam memahami keterkaitan ketiga aspek tersebut secara terpadu dalam konteks kecelakaan smelter titanium. Selain itu, kajian mengenai alternatif material yang lebih tahan terhadap kondisi ekstrem, seperti alumina dan magnesia, masih belum banyak dibahas secara komprehensif sebagai solusi mitigasi risiko kecelakaan industri.

Berdasarkan kajian literatur dari berbagai sumber seperti ScienceDirect, MDPI, SpringerLink, serta jurnal seperti Engineering Failure Analysis, Ceramics International, Journal of Materials Research and Technology, dan Journal of Cleaner Production, diketahui bahwa penelitian terkait kegagalan furnace dan material telah banyak dilakukan secara parsial. Sebagian besar penelitian hanya berfokus pada aspek tertentu, seperti kegagalan material refractory akibat thermal shock dan slag corrosion, analisis material alternatif berbasis alumina dan magnesia sebagai solusi mitigasi, serta kajian keselamatan proses dan risiko operasional industri. Penelitian-penelitian tersebut memberikan kontribusi penting dalam memahami karakteristik kegagalan material dan risiko operasi pada sistem furnace suhu tinggi.

Namun, hingga saat ini masih terbatas penelitian yang mengintegrasikan secara simultan tiga aspek utama, yaitu kegagalan material, analisis material alternatif alumina dan magnesia, serta kegagalan desain konstruksi, khususnya pada kasus smelter titanium. Selain itu, belum banyak penelitian yang menyusun sintesis secara sistematis menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) untuk mengidentifikasi pola hubungan antar faktor kegagalan tersebut. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian yang perlu dikaji lebih lanjut agar diperoleh pemahaman yang lebih menyeluruh mengenai mekanisme kegagalan pada sistem smelter modern, terutama yang beroperasi pada temperatur tinggi dan lingkungan korosif.

Berdasarkan latar belakang dan gap penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi faktor-faktor utama penyebab kegagalan pada industri smelter yang meliputi aspek material, peralatan, dan desain konstruksi berdasarkan studi literatur tahun 2021–2025. Penelitian ini juga bertujuan menganalisis mekanisme kegagalan material refractory akibat thermal shock, korosi suhu tinggi, dan interaksi slag pada sistem furnace, serta mengkaji material alternatif yang dapat digunakan untuk mengurangi risiko kecelakaan sebagai solusi mitigasi. Selain itu, penelitian ini bertujuan menelaah peran desain dan konstruksi dalam meningkatkan risiko kecelakaan industri smelter, khususnya pada sistem operasi suhu tinggi, serta menyusun sintesis hasil kajian literatur untuk memperoleh pola hubungan antara kegagalan material, peralatan, dan desain dalam kejadian kecelakaan smelter titanium secara sistematis.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review (SLR)* dengan menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif. Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis hasil penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan kegagalan material, material alternatif alumina dan magnesia, dan desain pada sistem smelter titanium. Prosedur analisis mengikuti prinsip PRISMA, meliputi: Identifikasi, mengumpulkan artikel dari database Scopus, MDPI, ScienceDirect, dan jurnal SINTA. Penyaringan, menghapus artikel duplikat dan memilih berdasarkan judul serta abstrak.Kelayakan, menilai kesesuaian artikel

berdasarkan full text dan relevansi dengan topik penelitian. Inklusi, artikel yang memenuhi kriteria dianalisis lebih lanjut untuk sintesis data.

Sumber Data dan Strategi Penelusuran

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari artikel ilmiah bereputasi internasional dan nasional. Sumber literatur meliputi basis data: ScienceDirect, SpringerLink, MDPI, PubMed Central, Jurnal SINTA (1–6) Indonesia, Jurnal teknik material dan metalurgi (2021–2025) menggunakan kata kunci: "smelter furnace failure analysis", "refractory degradation high temperature", "blast furnace explosion mechanism", "thermal fatigue industrial furnace", "process safety metallurgical industry".

Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Inklusi:

- Jurnal tahun publikasi 2021–2025
- Jurnal yang membahas kegagalan furnace, smelter, material alternatif alumina dan magnesia, dan sistem industri metalurgi
- Jurnal bereputasi Scopus, SINTA, MDPI, dan ScienceDirect
- Jurnal dengan analisis teknis (experimental, numerical, atau review)

Eksklusi:

- Jurnal duplikasi dan tanpa data ilmiah yang jelas
- Jurnal tidak relevan dengan smelter atau furnace
- Jurnal opini tanpa analisis teknis

Proses Screening (PRISMA)

Tabel 1. Tahap Prisma

Tahap PRISMA	Jumlah Artikel
Ditemukan pada tahap awal	120
Setelah penghapusan duplikasi	25
Lolos screening judul & abstrak	95
Lolos evaluasi kelayakan penuh	60
Digunakan dalam analisis akhir	30

Teknik Analisis Data

Data dianalisis menggunakan metode content analysis dengan cara mengelompokkan literatur berdasarkan tiga kategori utama, yaitu:

1. Kegagalan material (refractory degradation, thermal shock, slag corrosion)
2. Material alternatif alumina dam magnesia (reduce the risk of material failure)
3. Kegagalan desain (engineering design error, structural failure)

Hasil analisis kemudian disintesis untuk menemukan pola hubungan antar faktor penyebab kecelakaan pada sistem smelter.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Tinjauan sistematis terhadap 30 rujukan jurnal internasional (2021–2025) menunjukkan tren bahwa kegagalan operasional smelter titanium didominasi oleh masalah material, peralatan, dan desain konstruksi. Data ini mengonfirmasi kalau kecelakaan industri tidak terjadi secara

kebetulan akibat satu alasan saja, melainkan merupakan hasil dari kompleksitas masalah yang saling berkaitan satu sama lain.

Dari sisi material, refractory teridentifikasi sebagai komponen paling krusial yang memiliki intensitas kegagalan tertinggi. Kerusakan material ini merupakan konsekuensi dari paparan suhu ekstrem yang berulang, kejutan termal (thermal shock), serta interaksi kimiawi agresif dengan slag cair. Temuan literatur menegaskan bahwa fenomena spalling dan cracking pada refractory menjadi pemicu utama merosotnya integritas furnace, yang pada akhirnya berisiko menyebabkan kebocoran hingga instabilitas sistem secara menyeluruh (Lee et al., 2025). Kondisi ini menunjukkan bahwa ketahanan material menjadi faktor kunci dalam menjaga stabilitas operasi smelter.Pada aspek peralatan, hasil literatur menunjukkan bahwa kegagalan furnace dan sistem pendinginan merupakan faktor dominan kedua.

Pembahasaan

Temuan dari kajian literatur ini menegaskan bahwa integritas sistem smelter sangat dipengaruhi oleh sinergi antara faktor material, peralatan, serta desain konstruksi. Di sektor material, refractory teridentifikasi sebagai titik paling rentan terhadap degradasi yang dipicu oleh kejutan termal (thermal shock), korosi slag, dan siklus pemanasan kontinu. Interaksi faktor-faktor tersebut mengakibatkan munculnya fenomena spalling dan cracking, yang secara progresif melemahkan stabilitas struktur furnace (Lee et al., 2025). Pada aspek peralatan, kegagalan sering terjadi pada furnace dan sistem pendinginan, di mana gangguan distribusi panas dapat membentuk hotspot yang mempercepat kerusakan, ditambah kondisi overheating dan tekanan operasional yang tidak stabil (Zhang et al., 2024).

Sebagai langkah mitigasi preventif, studi ini merekomendasikan pemanfaatan material alternatif seperti alumina (Al_2O_3) dan magnesia (MgO) guna memperkuat durabilitas refractory di bawah kondisi operasi yang ekstrem. Secara spesifik, alumina menawarkan keunggulan pada aspek stabilitas termal dan resistansi kimia, sementara magnesia terbukti lebih tangguh dalam menahan laju korosi yang dipicu oleh slag bersifat basa (Ji et al., 2021; Wang et al., 2022). Kombinasi kedua material ini terbukti mampu meningkatkan ketahanan terhadap thermal shock, mengurangi penetrasi slag, serta memperpanjang umur pakai refractory. Dengan demikian, pemilihan material yang tepat tidak hanya meningkatkan performa sistem, tetapi juga berperan penting dalam mengurangi risiko kecelakaan industri seperti ledakan pada smelter titanium.

Secara keseluruhan, hasil pembahasan ini menegaskan bahwa pendekatan berbasis sistem yang mengintegrasikan aspek material, peralatan, dan desain konstruksi sangat diperlukan dalam meningkatkan keselamatan proses. Implementasi material yang lebih tahan terhadap kondisi ekstrem, didukung oleh desain yang tepat dan sistem monitoring yang optimal, dapat menjadi solusi efektif dalam meminimalkan risiko kegagalan dan meningkatkan keandalan operasi smelter modern.

Tabel 1. Perbandingan material

Kriteria	Material dalam Jurnal	Material alternative 1	Material alternative 2
Nama material	Titanium	alumina (Al_2O_3)	magnesia (MgO)
Kekuatan tarik	842 MPa	150-250 Mpa	90-130 Mpa

Ketahanan Korosi	Memiliki resistensi bawaan melalui pembentukan lapisan pasif titanium, namun terdegradasi dan menjadi sangat reaktif pada temperatur ekstrem.	Menunjukkan stabilitas kimia yang sangat baik terhadap proses oksidasi dan paparan gas reaktif di lingkungan industri.	Menunjukkan resistensi superior terhadap korosi yang diakibatkan oleh penetrasi terak (*slag*) basa.
Rentang suhu operasi	Titik leleh 1668 °C	Titik leleh 1850 °C	Titik leleh 2850 °C
Catatan Kelebihan	Rasio kekuatan terhadap massa yang sangat tinggi, esensial untuk menahan beban mekanik dinamis.	Berfungsi efektif sebagai lapisan penghalang (*barrier layer*) yang mampu menekan intensitas api titanium hingga 75%.	Material refraktori dengan tingkat stabilitas tertinggi pada area yang berkontak langsung dengan lelehan material.
Catatan Kekurangan	Berpotensi memicu reaksi eksotermis hebat (kebakaran logam) apabila lapisan pelindungnya rusak akibat paparan gas ledakan hingga 3700°C.	Rentan mengalami delaminasi atau pengelupasan apabila terpapar getaran dinamis secara kontinu di lapangan.	Memerlukan integrasi dengan material pengikat sekunder untuk memitigasi kerentanannya terhadap kejutan termal (*thermal shock*).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian literatur sistematis dari berbagai jurnal ilmiah bereputasi (2022–2025), dapat disimpulkan bahwa kegagalan pada sistem smelter titanium merupakan fenomena kompleks yang tidak disebabkan oleh satu faktor tunggal, melainkan merupakan hasil interaksi antara kegagalan material, kegagalan peralatan, dan kegagalan desain konstruksi. Kegagalan material terutama terjadi pada refractory yang mengalami degradasi akibat thermal shock, korosi slag, dan siklus pemanasan berulang yang menyebabkan penurunan integritas struktur furnace. Selain itu, kegagalan peralatan seperti furnace dan sistem pendinginan dipicu oleh ketidakseimbangan distribusi panas, overheating, serta ketidakstabilan tekanan operasi. Selain itu, kegagalan peralatan seperti sistem pendinginan yang tidak optimal dan ketidakstabilan tekanan operasi turut mempercepat kerusakan material dan memperburuk kondisi sistem secara keseluruhan. Penggunaan material alternatif berbasis alumina (Al_2O_3) dan magnesia (MgO), baik secara tunggal maupun kombinasi, terbukti mampu meningkatkan ketahanan terhadap suhu tinggi, korosi kimia, serta thermal shock, sehingga berpotensi mengurangi laju degradasi material dan meningkatkan keandalan operasi furnace. Oleh karena itu, disarankan agar perancangan sistem smelter ke depan mengintegrasikan pemilihan material yang sesuai dengan kondisi operasi, optimalisasi desain konstruksi terutama pada distribusi panas dan sistem pendinginan, serta

penerapan sistem monitoring berbasis keselamatan proses secara real-time untuk mendeteksi potensi kegagalan sejak dini. Selain itu, penelitian lanjutan perlu dilakukan melalui pendekatan eksperimental dan simulasi numerik untuk mengevaluasi performa material alternatif secara lebih spesifik pada kondisi operasi aktual, sehingga dapat menghasilkan rekomendasi teknis yang lebih komprehensif dalam upaya meminimalkan risiko kecelakaan pada industri smelter modern.

DAFTAR REFERENSI

Engineering Failure Analysis. 2023. High-temperature furnace failure mechanisms in metallurgical industries. Available at: https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107

Engineering Failure Analysis. 2024a. Failure mechanism of blast furnace tuyere under thermal and mechanical stress. Available at: https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108968

Engineering Failure Analysis. 2024b. Structural degradation in furnace systems under overload conditions. Available at: https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108699

Journal of Materials Research and Technology. 2024. Material degradation behavior in high-temperature industrial systems. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.145

Journal of Cleaner Production. 2023. Slag interaction and refractory performance in metallurgical processes. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138399

MDPI Applied Sciences. 2023. Process safety and risk analysis in metallurgical industries. Available at: https://www.mdpi.com/2076-3417/9/3/503

Poulsen, T. 2025. Metallurgical system design considerations. Journal of Materials (JOM), The Minerals, Metals & Materials Society (TMS). Available at: https://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0005/Poulsen-0005

PubMed Central. 2024. High-temperature material degradation in industrial applications. Available at: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11012530/

Rusdinah dan Tobing, C.N.M. (2025) 'Analisis Kecelakaan Kerja pada Pekerja Smelter di PT Indonesia Morowali Industrial Park dalam Perspektif Hukum Ketenagakerjaan', *Jurnal Sosial dan Sains (SOSAINS)*, 5(6), pp. 1760–1769

ScienceDirect. 2024a. Thermal fatigue and cooling system failure in industrial furnaces. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630724010148

ScienceDirect. 2024b. Overheating and structural failure in furnace systems. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630724007453

Torres-Mejia, L.G., Manzoor, U., Guo, G., Bumby, C.W., Raabe, D. and Souza Filho, I.R. (2025) *Toward decarbonization of the titanium industry via hydrogen plasma smelting reduction*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/396703897

Zhang, Y. et al. 2024. Failure mechanisms in high-temperature furnace systems. Engineering Failure Analysis. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.1089688

Zhang, Y. et al., 2025. *Advances in magnesia-dolomite refractory materials: Properties, emerging technologies and industrial applications – A review*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/397570857_Advances_in_Magnesia-Dolomite_Refractory_Materials_Properties_Emerging_Technologies_and_Industrial_Applications_A_Review