

ANALISIS RISIKO KRITIS KONSTRUKSI DERMAGA PELABUHAN LAUT: PENDEKATAN HIRADC–FMEA

CRITICAL RISK ANALYSIS OF SEAPORT WHARF CONSTRUCTION: HIRADC–FMEA APPROACH

M. Ridha Al Mustafa^{1*}, Hidayanto¹, Shanti Astri Noviani¹

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Siliwangi University, Tasikmalaya, Indonesia.

*email : ridhalmustafaa@unsil.ac.id

(Received: 2025 12, 28; Reviewed: 2025 12, 25; Accepted: 2025 12, 31)

Abstrak

Konstruksi dermaga di wilayah kepulauan Indonesia memiliki kompleksitas risiko keselamatan dan kesehatan kerja (K3) serta lingkungan yang tinggi akibat dinamika gelombang, arus, angin, pasang surut, dan keterbatasan jendela kerja aman, sementara aktivitas banyak berlangsung di tepi air dan di atas ponton/barge. Penelitian ini bertujuan menyusun risk register terpadu K3 lingkungan pada fase konstruksi dermaga Pelabuhan Laut Banggai dan memprioritaskan risiko kritis. Penelitian studi kasus ini menggunakan observasi lapangan terstruktur dan telaah dokumen proyek (WBS/BOQ, method statement, lifting plan, izin kerja, laporan harian, inspeksi K3, catatan cuaca/downtime, serta dokumen pengelolaan lingkungan). Bahaya diidentifikasi berbasis WBS, dinilai dengan HIRADC melalui probabilitas dan dampak ($R=P \times I$), kemudian risiko kategori tinggi ekstrem dianalisis lanjut menggunakan FMEA (S–O–D) untuk memperoleh RPN dan peringkat. Hasil menunjukkan risiko kritis didominasi kejadian jatuh ke laut/tenggelam pada pekerjaan tepi air dan ponton, diikuti kegagalan lifting/rigging (beban jatuh/mengayun) serta bahaya terjepit saat alignment/guiding; dari sisi lingkungan, prioritas mencakup peningkatan kekeruhan/TSS dan potensi tumpahan BBM/oli. Kesimpulannya, integrasi HIRADC FMEA menghasilkan prioritas mitigasi dan rekomendasi pengendalian, monitoring yang operasional untuk meningkatkan keselamatan dan perlindungan lingkungan pada proyek dermaga sejenis.

Kata Kunci: Konstruksi Dermaga; Manajemen Risiko; HIRADC; FMEA; K3; Risiko Lingkungan

Abstract

Jetty construction in Indonesia's archipelagic regions involves high occupational safety and health (OSH) and environmental risk complexity due to waves, currents, winds, tides, and limited safe weather windows, while many activities are performed at the water edge and on pontoons/barges. This study aims to develop an integrated OSH environment risk register for the construction phase of the Banggai Seaport jetty and to prioritize critical risks. A case-study approach was applied using structured field observations and project document reviews (WBS/BOQ, method statements, lifting plans, work permits, daily reports, OSH inspection records, weather/downtime logs, and environmental management documents). Hazards were identified by WBS, assessed using HIRADC through probability and consequence ($R=P \times I$), and high extreme risks were further evaluated with FMEA (S–O–D) to derive the Risk Priority Number (RPN) and ranking. Results indicate that critical risks are dominated by falls into the sea/drowning during waterside and pontoon based works, followed by lifting/rigging failures (dropped or swinging loads) and pinch/crush hazards during

	<h1>JURNAL CHEMURGY</h1> <p>E-ISSN 2620-7435</p> <p>Available online at http://e-journals.unmul.ac.id/index.php/TK</p>	 <p>SINTA Accreditation No. 152/E/KPT/2023</p>
---	---	---

alignment/guiding; environmental priorities include increased turbidity/TSS and potential fuel/oil spills. In conclusion, the integrated HIRADC FMEA framework yields actionable priorities and practical control, monitoring recommendations for similar jetty projects.

Keywords: *Wharf Construction; Risk Management; HIRADC; FMEA; K3; Environmental Risks*

1. PENDAHULUAN

Pembangunan dermaga pelabuhan laut di Indonesia berperan penting dalam memperkuat konektivitas antarpulau, menjaga kelancaran rantai pasok, dan mendorong pemerataan ekonomi. Di wilayah kepulauan seperti Kabupaten Banggai, pelabuhan menjadi simpul utama pergerakan orang dan barang serta penopang aktivitas logistik, energi, dan perikanan. Namun, konstruksi dermaga di pesisir dan perairan terbuka memiliki risiko yang lebih kompleks dibanding proyek darat karena sangat dipengaruhi gelombang, arus, angin, dan pasang surut yang membatasi weather window, ditambah tantangan lokasi yang relatif terpencil terhadap logistik, ketersediaan peralatan, dan akses layanan darurat. Oleh karena itu, diperlukan manajemen risiko K3 dan lingkungan yang sistematis, terukur, dan adaptif terhadap dinamika operasi laut.

Sektor konstruksi sendiri secara nasional tercatat sebagai salah satu penyumbang terbesar angka kecelakaan kerja, mencerminkan masih belum optimalnya penerapan manajemen risiko K3 di lapangan (Ihsan, Hamidi and Putri, 2020; Kaup *et al.*, 2022; Elian Zhafira and Rajiman, 2025). Berbagai studi menunjukkan bahwa proyek konstruksi dengan pekerjaan berisiko tinggi, jumlah tenaga kerja yang besar, dan durasi pelaksanaan yang padat memerlukan manajemen risiko terstruktur melalui tahapan identifikasi bahaya, penilaian, dan pengendalian risiko (Mathuthu, Marnewick and Nel, 2017; Firdaus, Hazairin and Partadisastra, 2021).

Dalam konteks pelabuhan, kajian keselamatan menunjukkan kebutuhan kerangka penilaian risiko yang terstruktur karena aktivitas pelabuhan dan proyek ekspansi kerap menghadapi kendala metodologis, keterbatasan sumber daya, hingga tantangan implementasi di lapangan (Elian Zhafira and Rajiman, 2025). Pada proyek konstruksi pelabuhan, risiko eksekusi dapat muncul dari kombinasi faktor teknis-operasional dan kondisi lingkungan setempat, sehingga memerlukan pemetaan risiko yang spesifik terhadap tahapan kerja (Ihsan, Hamidi and Putri, 2020).

Metode HIRADC luas digunakan untuk identifikasi bahaya, penilaian risiko, dan penentuan pengendalian; sedangkan FMEA lazim dipakai untuk memprioritaskan risiko melalui penilaian severity–occurrence–detection dan Risk Priority Number (RPN). Namun, literatur menyoroti bahwa FMEA konvensional rentan terhadap subjektivitas penilaian serta problem agregasi RPN yang dapat menghasilkan prioritas yang bias ketika rating bersifat imprecise atau bobot faktor tidak proporsional (Wang *et al.*, 2025; Lee and Cho, 2026).

Selain isu subjektivitas dan skoring, penelitian-penelitian berbasis hybrid (misalnya menggabungkan FMEA dengan pendekatan multi-kriteria atau pembelajaran mesin) memang menunjukkan potensi peningkatan objektivitas, tetapi sering dilaporkan masih memerlukan validasi lintas konteks dan ketersediaan data yang memadai agar hasilnya robust dan dapat digeneralisasi (Emovon *et al.*, 2015; Shafizadeh and Hossein Mousavizadegan, 2025; Yılmaz and Köse, 2025). Pada domain maritim, keterbatasan dataset dan kebutuhan data terukur juga menjadi tantangan ketika model diarahkan untuk prediksi atau kalibrasi risiko operasional (Resende *et al.*, 2024).

Khusus pada konstruksi dermaga/jetty, research gap yang menonjol adalah belum kuatnya integrasi aspek lingkungan ke dalam kerangka penilaian risiko yang operasional di lapangan. Banyak studi lingkungan berfokus pada paparan dan dampak (misalnya kenaikan muka air laut pada terminal atau isu keberlanjutan struktur), tetapi tidak selalu terhubung langsung dengan instrumen prioritas risiko harian pada fase konstruksi (Putranta *et al.*, 2013; Kaup *et al.*, 2022). Risiko lingkungan yang relevan misalnya peningkatan kekeruhan/TSS, dampak pengerukan/pemancangan terhadap ekosistem, serta potensi tumpahan BBM/oli sering diperlakukan terpisah dari penilaian risiko K3 operasional (Allen, McLeod and Hutt, 2022; Kolios, 2024).

Menjawab kesenjangan tersebut, penelitian ini mengusulkan kerangka HIRADC–FMEA terpadu yang disusun berbasis WBS pekerjaan konstruksi dermaga, dengan memasukkan risiko K3 dan lingkungan dalam satu risk register yang konsisten, terdokumentasi, dan dapat diaudit. Kebaruan yang ditawarkan adalah (i) integrasi eksplisit risiko lingkungan ke dalam prioritas (bukan hanya sebagai dokumen kepatuhan), (ii) penguatan transparansi skoring melalui rubrik S–O–D yang ditautkan pada bukti observasi dan dokumen proyek untuk menekan subjektivitas, serta (iii) langkah pemeriksaan konsistensi/sensitivitas sederhana terhadap perubahan skor untuk meningkatkan robustnes prioritas tanpa bergantung pada dataset besar.

2. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan desain studi kasus pada konstruksi dermaga Pelabuhan Laut Banggai dengan pendekatan manajemen risiko terpadu K3–lingkungan berbasis HIRADC–FMEA. Data dikumpulkan melalui observasi lapangan terstruktur dan telaah dokumen proyek (WBS/BOQ, method statement, lifting plan, izin kerja, laporan harian, catatan cuaca/downtime, hasil inspeksi K3, serta dokumen pengelolaan lingkungan). Identifikasi bahaya dilakukan berbasis WBS untuk menyusun risk register pada setiap aktivitas kunci (Rianty, Latief and Riantini, 2018), kemudian tingkat risiko dinilai menggunakan HIRADC melalui penetapan skor probabilitas dan dampak serta diklasifikasikan ke dalam level risiko (Wong *et al.*, 2022; Hassan, Aziz and Rahim, 2024) Risiko pada kategori tinggi–ekstrem selanjutnya dianalisis menggunakan FMEA dengan penilaian severity, occurrence, dan detection untuk memperoleh nilai RPN dan pemeringkatan prioritas (Wang *et al.*, 2019), yang menjadi dasar perumusan rekomendasi pengendalian dan rencana monitoring yang operasional sesuai karakteristik pekerjaan dermaga.

Penyusunan WBS dan Risk Register Awal

WBS disusun berdasarkan item pekerjaan proyek dan dipecah menjadi aktivitas kunci (mis. pre-boring, pemancangan tegak/miring, penyambungan las, pemotongan kepala tiang, pengecoran slab/pile cap, pemasangan fender/bollard). Setiap aktivitas diidentifikasi potensi bahaya K3 dan aspek lingkungan untuk menghasilkan risk register yang memuat: aktivitas, bahaya/aspek, risk event, penyebab, dampak, kontrol eksisting, serta bukti dokumen/observasi (Joubert and Pretorius, 2020).

Tabel 1. Work Breakdown Structure Konstruksi Pelabuhan

Kelompok	Kode	Uraian pekerjaan
Pondasi tiang pancang	A1	PDA Test
	A2	Test pile 1 tiang (stake out–pre-boring–pemancangan–las–potong kepala–sepatu)
	A3	Pengadaan tiang pancang
	A4	Relokasi/transport tiang ke titik pemancangan
	A5	Stake out pemancangan
	A6	Pre-boring Ø40 cm dari seabed
	A7	Pemancangan tegak
	A8	Pemancangan miring
	A9	Penyambungan tiang (las listrik)
	A10	Pemotongan kepala tiang
	A11	Pembuatan sepatu tiang
	A12	Plat baja stop tiang
	A13	Isian tiang beton bertulang
	A14	Coating sambungan anti korosi

Kelompok	Kode	Uraian pekerjaan
Pekerjaan beton	A15	Composite wrap perlindungan tiang
	B1	Pelat lantai beton bertulang t=30 cm
	B2	Balok memanjang (50×80 cm)
	B3	Balok melintang (50×80 cm)
	B4	Pile cap PC1 (100×100×100 cm)
	B5	Pile cap PC2 (200×100×100 cm)
	B6	Pile cap PC3 (140×150×100 cm)
	B7	Plank fender beton bertulang dermaga
Aksesoris dermaga	B8	Kansteen
	C1	Rubber fender V 600H 2000L + ankur SS
	C2	Bollard 70 ton + ankur SS
	C3	Dilatasi
	C4	Lampu LED solar 60W + tiang
	C5	Pembuatan prasarana
	C6	Pengecatan kansteen

Analisis HIRADC (Pemetaan Tingkat Risiko)

HIRADC (Hazard Identification, Risk Assessment, and Determining Control) adalah metode sistematis untuk mengelola risiko K3 dengan tiga langkah utama: mengidentifikasi bahaya pada setiap aktivitas kerja, menilai tingkat risiko berdasarkan peluang dan dampak, lalu menetapkan pengendalian yang sesuai. Output utamanya berupa risk register dan matriks risiko yang menunjukkan prioritas penanganan. HIRADC terbukti efektif dalam mengidentifikasi bahaya pada setiap tahapan kerja dan mengelompokkan risiko ke dalam kategori rendah, sedang, tinggi, bahkan ekstrem, untuk kemudian ditindaklanjuti dengan strategi pengendalian yang sesuai (Ihsan, Hamidi and Putri, 2020; Andriani, Ratnaningsih and Putra, 2022; Daud, Budihardjo and Isnanto, 2023; Elian Zhafira and Rajiman, 2025).

Tabel 2. skor dan klasifikasi risiko

Dampak (I)	Probabilitas (P)				
	1	2	3	4	5
5	5	10	15	20	25
4	4	8	12	18	20
3	3	6	9	12	15
2	2	4	6	8	10
1	1	2	3	4	5

Terlihat pada tabel 2 penentuan skor dan klasifikasi risiko sebagai dasar pemetaan prioritas pengendalian. Risiko yang termasuk kategori Tinggi dan Ekstrem ditetapkan sebagai risiko kritis karena memiliki potensi dampak serius dan/atau frekuensi paparan tinggi, sehingga seluruh risiko tersebut selanjutnya dianalisis lebih lanjut menggunakan FMEA untuk memperoleh prioritas penanganan yang lebih tajam melalui penilaian severity, occurrence, dan detection serta perhitungan Risk Priority Number (RPN) (Kim and Zuo, 2018).

Analisis FMEA (Prioritas Risiko Kritis)

FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) adalah metode analisis yang digunakan untuk memprioritaskan risiko kritis dengan cara mengkaji bagaimana suatu kegagalan atau kejadian tidak diinginkan (failure mode) dapat terjadi pada suatu aktivitas, apa dampaknya, serta seberapa efektif sistem mampu mencegah atau mendeteksinya sebelum menimbulkan konsekuensi (Talwar, 2020). Dalam konteks konstruksi dermaga, FMEA membantu mengubah daftar risiko hasil HIRADC menjadi urutan prioritas penanganan yang lebih tajam, terutama untuk risiko-risiko berkonsekuensi berat seperti jatuh ke laut, kegagalan lifting/rigging, dan potensi tumpahan BBM/oli (Haseeb, Mansoori and Welch, 2021).

Penilaian FMEA umumnya menggunakan tiga parameter, yaitu Severity (S) yang menggambarkan tingkat keparahan dampak jika kejadian terjadi, Occurrence (O) yang merepresentasikan

peluang/frekuensi kemunculan kejadian, serta Detection (D) yang menunjukkan kemampuan pengendalian yang ada untuk mendeteksi atau mencegah kejadian sebelum terjadi. Ketiga parameter tersebut dikalikan untuk memperoleh Risk Priority Number ($RPN = S \times O \times D$) (Mohan and C K, 2022), sehingga risiko dengan RPN tertinggi menjadi prioritas utama untuk tindakan mitigasi dan penguatan monitoring, baik melalui rekayasa teknis, pengendalian administratif, maupun peningkatan kesiapsiagaan darurat di lapangan.

Dalam penelitian ini, penentuan skor S–O–D dilakukan berbasis observasi lapangan dan dokumen proyek (method statement, lifting plan, permit kerja, laporan harian/mingguan, catatan cuaca dan downtime, inspeksi K3, temuan NCR/near miss, log perawatan alat, serta dokumen pengelolaan lingkungan). Dengan pendekatan ini, FMEA tidak hanya menghasilkan peringkat risiko, tetapi juga menguji efektivitas kontrol eksisting melalui indikator “deteksi” dan konsistensi pelaksanaannya di lapangan (Cao and Deng, 2019; Lo *et al.*, 2020).

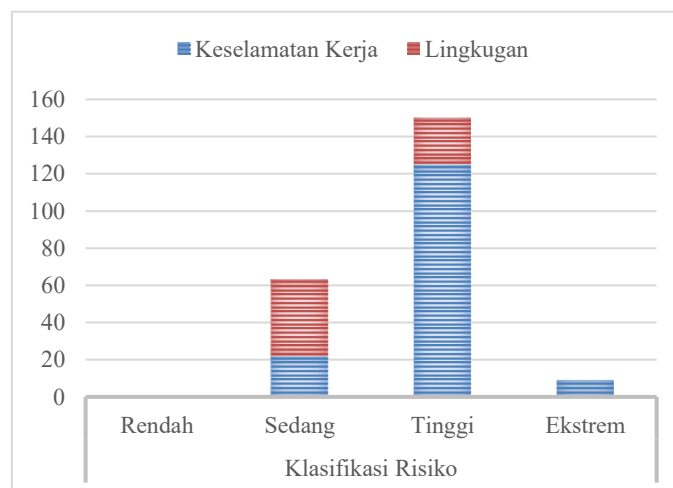
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Risiko Kritis Berbasis HIRADC: Peta Risiko dan Risiko Kritis

Dilakukan pemetaan 222 item risiko yang disusun berdasarkan WBS pekerjaan konstruksi dermaga pelabuhan laut (pondasi tiang pancang, pekerjaan beton, dan aksesoris dermaga) terkait keselamatan kerja berjumlah 156 item dan terdapat 66 item terkait risiko lingkungan menggunakan metode HIRADC.

Tabel 3. Pemetaan Risiko Berbasis HIRADC

Jenis	Klasifikasi Risiko			
	Rendah	Sedang	Tinggi	Ekstrem
Keselamatan Kerja		22	125	9
Lingkungan		41	25	



Gambar 1. Sebaran Risiko K# dan Lingkungan Berbasis HIRADC

Penilaian risiko dilakukan dengan pendekatan HIRADC melalui penentuan skor Probabilitas (P) dan Dampak (I) sehingga menunjukkan hasil risiko dengan kategori Tinggi hingga Ekstrem yang menjadi risiko kritis terkonsentrasi pada pekerjaan yang melibatkan: (i) operasi di atas air/di atas ponton, (ii) pekerjaan pada tepi air (work at edge), dan (iii) heavy lifting serta guiding/alignment. Risiko Ekstrem paling dominan adalah jatuh ke laut/tenggelam, yang muncul lintas aktivitas seperti pre-boring, pemancangan, pengecoran pada area tepi air, serta pemasangan fender. Temuan ini menegaskan

bahwa konteks dermaga memiliki fatality potential yang tinggi, terutama akibat kombinasi permukaan kerja licin, keterbatasan edge protection, dan dinamika cuaca.

Analisis FMEA pada Risiko Kritis K3–Lingkungan

FMEA menyajikan risiko prioritas beserta nilai S–O–D dan RPN, serta mengaitkannya dengan paket pekerjaan (WBS) untuk memudahkan pengambilan keputusan di lapangan. Hasil analisis risiko yang menempati peringkat atas pada proyek dermaga adalah: (i) jatuh ke laut/tenggelam pada aktivitas tepi air dan pekerjaan di atas ponton, (ii) beban jatuh atau beban mengayun pada aktivitas marine lifting & rigging, serta (iii) crush/pinch pada proses alignment dan guiding (tiang pancang maupun fender/bollard). Selain itu, pada aspek lingkungan, risiko prioritas terdapat pada tumpahan BBM/oli saat fueling dan peningkatan TSS/kekeruhan pada pekerjaan pre-boring/pemancangan, terutama bila kontrol dan pemantauan tidak konsisten.

Tabel 4. Analisis Risiko Kritis Berbasis FMEA

WBS	Aktivitas kunci	Jenis	Risk event (kejadian)	Level	Indikator & bukti monitoring (observasi/dokumen)
A6	Pre-boring (di atas ponton)	K3	Jatuh ke laut/tenggelam saat set-up/operasi	Ekstrem	Permit kerja di atas air; checklist PPE & lifeline; foto edge protection; catatan toolbox; log cuaca/downtime; bukti drill/rescue readiness
A7	Pemancangan tegak	K3	Jatuh ke laut/tenggelam saat guiding di tepi	Ekstrem	Form inspeksi tepi; catatan pengawasan spotter; foto guardrail; laporan harian pelaksanaan & kepatuhan
A8	Pemancangan miring	K3	Jatuh ke laut/tenggelam (paparan lebih tinggi karena manuver sudut)	Ekstrem	Lifting/piling log; batas cuaca pada method statement; catatan stop-work; foto pembatasan zona
A2	Test pile	K3	Jatuh ke laut/tenggelam saat pekerjaan tepi/boarding	Ekstrem	Checklist boarding; emergency plan; catatan pelatihan; temuan inspeksi dek licin
B1	Slab di area tepi dermaga	K3	Jatuh ke laut/tenggelam saat pekerjaan bekisting/cor	Ekstrem	Metode kerja slab; checklist perancah/guardrail; foto toe board; log inspeksi harian
B5	Pile cap PC2 (zona tepi)	K3	Jatuh ke laut/tenggelam	Ekstrem	Permit; foto proteksi; checklist harian; catatan kesiapan rescue
C1	Pemasangan fender	K3	Jatuh ke laut/tenggelam saat alignment & pemasangan angkur	Ekstrem	Lifting plan fender; daftar personel kompeten; foto exclusion zone; catatan pre-lift meeting
A2/A7	Lifting pile (marine lifting)	K3	Beban mengayun akibat	Tinggi	Lifting plan + wind limit; checklist rigging; bukti pre-lift

WBS	Aktivitas kunci	Jenis	Risk event (kejadian)	Level	Indikator & bukti monitoring (observasi/dokumen)
			angin/gelombang (<i>suspended load</i>)		<i>meeting</i> ; foto zona eksklusi
A7/A8	Alignment/guiding pile	K3	Terjepit/tertekan (<i>pinch/crush</i>) saat guiding	Tinggi	SOP guiding; catatan toolbox “line of fire”; observasi kepatuhan; temuan inspeksi
A4	Penataan tiang di barge	K3	Crush/pinch saat penataan/lashing	Tinggi	Checklist lashing; foto chock; log inspeksi penataan; laporan harian
C1	Alignment fender	K3	Pinch/crush saat positioning fender	Tinggi	Bukti jig/alat bantu; foto exclusion zone; catatan <i>toolbox</i>
A2/A6/A7/A8	Mooring ponton/barge	K3	<i>Snap-back</i> (tali mooring putus)	Tinggi	Checklist mooring; foto marka snap-back; log inspeksi tali; catatan briefing
A2/A7/A8	Rigging failure	K3	Beban jatuh akibat kegagalan sling/shackle	Tinggi	Sertifikat rigging; checklist inspeksi; catatan penggantian rigging; laporan <i>near miss</i>
B1/B2/B3/B4/B5	Pekerjaan bekisting	K3	Kegagalan bekisting saat pengecoran	Tinggi	Checklist pre-pour; bukti inspeksi formwork; catatan <i>pouring</i> ; NCR bila ada
B1/B4/B5	Pengecoran (pump)	K3	Hose whipping/overpressure	Tinggi	Checklist pompa/selang; bukti whip check; laporan harian; temuan inspeksi
A6/A7/A8	Gangguan seabed (boring/pancang)	ENV	Kekeruhan/TSS meningkat signifikan	Tinggi	Catatan metode pembuangan cuttings; log cuaca/arus; dokumentasi visual kekeruhan; monitoring kualitas air (jika ada)
A2/A6/A7/A8	Fueling & operasi alat	ENV	Tumpahan BBM/oli ke perairan	Tinggi	SOP fueling; checklist spill kit; log inspeksi kebocoran; catatan insiden tumpahan (jika ada)
A9/A10	Hot work (las/potong)	K3	Kebakaran/cedera listrik & percikan	Tinggi	Hot work permit; daftar fire watch; checklist APAR; laporan inspeksi kelistrikan

Rekomendasi Mitigasi dan Monitoring Berbasis Aktivitas

Berdasarkan hasil HIRADC dan FMEA, rekomendasi pengendalian diarahkan pada; Pencegahan fatality di tepi air: edge protection sementara, lifeline/harness dan life jacket wajib, jalur anti-slip, pembatasan akses, spotter dan penerapan stop-work authority saat cuaca melebihi batas aman, serta kesiapsiagaan darurat (rescue boat, ring buoy, latihan respons). Pengendalian lifting/rigging: lifting plan yang spesifik pada kondisi marine works, inspeksi rigging rutin, penegakan zona eksklusi, kompetensi rigger–signalman, serta batas operasi berdasarkan angin/gelombang. Serta Pengendalian lingkungan: prosedur fueling dengan secondary containment dan spill kit, perawatan alat untuk

mencegah kebocoran, manajemen limbah B3 (cat/solvent/epoxy), serta pengendalian sedimen (penjadwalan kerja adaptif terhadap arus, kontrol metode, dan pemantauan kekeruhan secara visual/parameter sesuai dokumen lingkungan). Rekomendasi dilengkapi kebutuhan monitoring berupa indikator, frekuensi, PIC, dan bukti pencatatan sehingga mudah diaudit dan dievaluasi.

Tabel 5. Rekomendasi Mitigasi dan Monitoring

WBS	Aktivitas kunci	Jenis	Indikator & bukti monitoring (observasi/dokumen)	Kontrol pengendalian yang direkomendasikan
A6	Pre-boring (di atas ponton)	K3	Permit kerja di atas air; checklist PPE & lifeline; foto edge protection; catatan toolbox; log cuaca/ <i>downtime</i> ; bukti drill/rescue readiness	<i>Edge protection</i> sementara; jalur anti-slip; life jacket wajib; lifeline/harness pada titik risiko; akses boarding aman; <i>stop-work authority</i> berdasar batas cuaca; <i>standby rescue</i> (ring buoy & rescue boat)
A7	Pemancangan tegak	K3	Form inspeksi tepi; catatan pengawasan <i>spotter</i> ; foto guardrail; laporan harian pelaksanaan & kepatuhan	Pembatasan akses tepi; guardrail sementara; life jacket & lifeline; <i>spotter</i> ; penerangan memadai; SOP kerja tepi air
A8	Pemancangan miring	K3	Lifting/piling log; batas cuaca pada <i>method statement</i> ; catatan <i>stop-work</i> ; foto pembatasan zona	Semua kontrol No.2 + pengetatan batas cuaca (angin/gelombang) dan <i>exclusion zone</i> yang lebih lebar
A2	Test pile	K3	Checklist boarding; emergency plan; catatan pelatihan; temuan inspeksi dek licin	Boarding ladder standar + <i>handrail</i> ; <i>man overboard</i> plan; life jacket; housekeeping dek
B1	Slab di area tepi dermaga	K3	Metode kerja slab; checklist perancah/guardrail; foto toe board; log inspeksi harian	Guardrail + toe board; <i>fall prevention</i> ; platform kerja aman; manajemen akses; <i>lifebuoy</i> tiap interval
B5	Pile cap PC2 (zona tepi)	K3	Permit; foto proteksi; checklist harian; catatan kesiapan rescue	Proteksi tepi; jalur kerja anti-slip; <i>permit to work</i> tepi air; rescue standby
C1	Pemasangan fender	K3	Lifting plan fender; daftar personel kompeten; foto <i>exclusion zone</i> ; catatan <i>pre-lift meeting</i>	Proteksi tepi + life jacket; alat bantu positioning (jig/guide); pembatasan akses; komunikasi rigger–signalman
A2/A7	Lifting pile (marine lifting)	K3	Lifting plan + wind limit; checklist rigging; bukti <i>pre-lift meeting</i> ; foto zona eksklusi	<i>Lifting plan</i> spesifik marine; batas angin/gelombang; tagline aman; <i>pre-lift checklist</i> ; zona eksklusi
A7/A8	Alignment/guiding pile	K3	SOP guiding; catatan toolbox “line of fire”; observasi kepatuhan; temuan inspeksi	Gunakan alat bantu (push-pull tool); larang tangan masuk <i>line of fire</i> ; <i>hand signal</i> standar; pengawasan banksman
A4	Penataan tiang di barge	K3	Checklist lashing; foto chock; log inspeksi penataan; laporan harian	Prosedur lashing/sea fastening; chock standar; <i>spotter</i> ; pembatasan area saat penataan

WBS	Aktivitas kunci	Jenis	Indikator & bukti monitoring (observasi/dokumen)	Kontrol pengendalian yang direkomendasikan
C1	Alignment fender	K3	Bukti jig/alat bantu; foto exclusion zone; catatan <i>toolbox</i>	Jig/guide; alat bantu alignment; larangan <i>hands-on</i> pada beban; zona eksklusi
A2/A6/A7/A8	Mooring ponton/berge	K3	Checklist mooring; foto marka snap-back; log inspeksi tali; catatan briefing	Area <i>snap-back zone</i> diberi marka; inspeksi tali; SOP mooring; pelatihan kru
A2/A7/A8	Rigging failure	K3	Sertifikat rigging; checklist inspeksi; catatan penggantian rigging; laporan <i>near miss</i>	Sertifikat/ID rigging; inspeksi sebelum pakai; WLL sesuai; larangan <i>side loading</i> ; <i>tagline</i>
B1/B2/B3/B4/B5	Pekerjaan bekisting	K3	Checklist pre-pour; bukti inspeksi formwork; catatan <i>pouring</i> ; NCR bila ada	<i>Formwork design/check</i> ; inspeksi <i>pre-pour</i> ; pembatasan beban; <i>pour rate</i> sesuai; pengawasan ketat
B1/B4/B5	Pengecoran (pump)	K3	Checklist pompa/selang; bukti whip check; laporan harian; temuan inspeksi	SOP tekanan; <i>whip check</i> ; zona eksklusi; komunikasi operator; inspeksi selang
A6/A7/A8	Gangguan seabed (boring/pancang)	ENV	Catatan metode pembuangan cuttings; log cuaca/arus; dokumentasi visual kekeruhan; monitoring kualitas air (jika ada)	Metode kerja adaptif arus; pengaturan waktu kerja; pengendalian slurry/cuttings; housekeeping laut
A2/A6/A7/A8	Fueling & operasi alat	ENV	SOP fueling; checklist spill kit; log inspeksi kebocoran; catatan insiden tumpahan (jika ada)	<i>Secondary containment</i> ; spill kit; SOP fueling; inspeksi kebocoran; pelaporan & respons tumpahan
A9/A10	Hot work (las/potong)	K3	Hot work permit; daftar fire watch; checklist APAR; laporan inspeksi kelistrikan	Hot work permit; fire watch; APAR; isolasi area; inspeksi kabel; housekeeping slag

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan pendekatan manajemen risiko terpadu K3–lingkungan berbasis HIRADC–FMEA efektif dalam mengidentifikasi, menilai, dan memprioritaskan risiko kritis pada tahap konstruksi dermaga Pelabuhan Laut Banggai. Pendekatan berbasis WBS memungkinkan penyusunan risk register yang sistematis pada setiap aktivitas utama, sehingga bahaya spesifik pekerjaan laut dapat dipetakan secara komprehensif. Hasil analisis mengindikasikan bahwa risiko kategori tinggi hingga ekstrem didominasi oleh aktivitas di tepi air dan di atas ponton, khususnya risiko jatuh ke laut, kegagalan lifting dan rigging, serta bahaya pinch dan crush selama proses alignment, sementara dari aspek lingkungan risiko utama berkaitan dengan peningkatan kekeruhan perairan dan potensi tumpahan bahan bakar atau oli. Integrasi HIRADC untuk klasifikasi risiko awal dan FMEA untuk pemeringkatan lanjutan berbasis RPN terbukti mampu menghasilkan prioritas pengendalian yang lebih tajam dan operasional. Secara praktis, luaran penelitian berupa risk register terpadu, matriks prioritas risiko, serta rekomendasi pengendalian dan monitoring memberikan kerangka kerja yang dapat direplikasi pada proyek dermaga sejenis di wilayah kepulauan. Secara ilmiah, penelitian ini berkontribusi dalam memperkuat penerapan metode hibrida HIRADC–FMEA pada konstruksi laut dengan mengintegrasikan risiko K3 dan lingkungan dalam satu kerangka analisis yang terukur.

DAFTAR PUSTAKA

- Allen, T.R., McLeod, G. and Hutt, S. (2022) 'Sea level rise exposure assessment of U.S. East Coast cargo container terminals', *Maritime Policy & Management*, 49(4), pp. 577–599. Available at: <https://doi.org/10.1080/03088839.2021.1903597>.
- Andriani, D., Ratnaningsih, A. and Putra, P.P. (2022) 'Analisis HIRARC Risiko K3 Fabrikasi dan Erection Gedung Baja Pembangunan Hotel Loji Kridanggo Boyolali', *RekaRacana: Jurnal Teknil Sipil*, 8(2), p. 70. Available at: <https://doi.org/10.26760/rekaracana.v8i2.70>.
- Cao, X. and Deng, Y. (2019) 'A New Geometric Mean FMEA Method Based on Information Quality', *IEEE Access*, 7, pp. 95547–95554. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2928581>.
- Daud, M., Budihardjo, M.A. and Isnanto, R.R. (2023) 'Evaluasi Risiko Kesehatan dan Keselamatan Kerja dengan Metode Hirarc pada Proyek Pembangunan Sistem Penyediaan Air Baku Bendungan Pengga Kabupaten Lombok Tengah', *Jurnal Profesi Insinyur Indonesia*, 1(3), pp. 104–111. Available at: <https://doi.org/10.14710/jpii.2023.17478>.
- Elian Zhafira and Rajiman, R. (2025) 'ANALISIS RISIKO KECELAKAAN KERJA MENGGUNAKAN METODE HAZARD IDENTIFICATION, RISK ASSESMENT AND DETERMINING CONTROL (HIRADC) PADA PROYEK PEMBANGUNAN MASJID RAYA AL-BAKRIE BANDAR LAMPUNG', *Nusantara Hasana Journal*, 5(3), pp. 517–524. Available at: <https://doi.org/10.59003/nhj.v5i3.1650>.
- Emovon, I. *et al.* (2015) 'An integrated multicriteria decision making methodology using compromise solution methods for prioritising risk of marine machinery systems', *Ocean Engineering*, 105, pp. 92–103. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.06.005>.
- Firdaus, A., Hazairin, H. and Partadisastra, G.P. (2021) 'Tinjauan Manajemen Risiko Bidang Kesehatan dan Keselamatan Kerja pada Proyek Konstruksi Bekas Daerah Pembuangan Sambirejo di Masa Pandemi Covid-19', *RekaRacana: Jurnal Teknil Sipil*, 7(2), p. 87. Available at: <https://doi.org/10.26760/rekaracana.v7i2.87>.
- Haseeb, J., Mansoori, M. and Welch, I. (2021) 'Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) of Honeypot-Based Cybersecurity Experiment for IoT', in *2021 IEEE 46th Conference on Local Computer Networks (LCN)*. IEEE, pp. 645–648. Available at: <https://doi.org/10.1109/LCN52139.2021.9525010>.
- Hassan, M., Aziz, H.A. and Rahim, M.Z. (2024) 'e-HIRARC Tool for Brick Laboratory in Civil Engineering Department at TVET (Technical and Vocational Education Training) Campus', in, pp. 425–436. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-99-6890-9_34.
- Ihsan, T., Hamidi, S.A. and Putri, F.A. (2020) 'Penilaian Risiko dengan Metode HIRADC Pada Pekerjaan Konstruksi Gedung Kebudayaan Sumatera Barat', *Jurnal Civronlit Unbari*, 5(2), p. 67. Available at: <https://doi.org/10.33087/civronlit.v5i2.67>.
- Joubert, F.J. and Pretorius, L. (2020) 'Design and Construction Risks for a Shipping Port and Container Terminal: Case Study', *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 146(1). Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000537](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000537).
- Kaup, M. *et al.* (2022) 'Risk Analysis of Seaport Construction Project Execution', *Applied Sciences*, 12(16), p. 8381. Available at: <https://doi.org/10.3390/app12168381>.
- Kim, K.O. and Zuo, M.J. (2018) 'General model for the risk priority number in failure mode and effects analysis', *Reliability Engineering & System Safety*, 169, pp. 321–329. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.09.010>.
- Kolios, A. (2024) 'Retrofitting Technologies for Eco-Friendly Ship Structures: A Risk Analysis Perspective', *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(4), p. 679. Available at: <https://doi.org/10.3390/jmse12040679>.

- Lee, S.-W. and Cho, I.-S. (2026) 'Integrated berthing risk assessment framework using a combination of machine learning with measured berthing velocity', *Applied Ocean Research*, 166, p. 104904. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2025.104904>.
- Lo, H.-W. *et al.* (2020) 'A hybrid MCDM-based FMEA model for identification of critical failure modes in manufacturing', *Soft Computing*, 24(20), pp. 15733–15745. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00500-020-04903-x>.
- Mathuthu, N., Marnewick, A. and Nel, H. (2017) 'A review of risk management techniques and challenges in harbour and port expansions', in *2017 IEEE AFRICON*. IEEE, pp. 764–769. Available at: <https://doi.org/10.1109/AFRCON.2017.8095579>.
- Mohan, A.B. and C K, A. (2022) 'Advancements in Failure Mode and Effect Analysis: A Review', in *2022 Second International Conference on Next Generation Intelligent Systems (ICNGIS)*. IEEE, pp. 1–6. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICNGIS54955.2022.10079851>.
- Putranta, D.D. *et al.* (2013) 'Risk Assessment on Subsea Gas Pipelines Located at Water Basin of Jetty Area due to Dredging and Operation After Dredging', in *Volume 2A: Structures, Safety and Reliability*. American Society of Mechanical Engineers. Available at: <https://doi.org/10.1115/OMAE2013-10358>.
- Resende, B.A. de *et al.* (2024) 'Proposal of a facilitating methodology for fuzzy FMEA implementation with application in process risk analysis in the aeronautical sector', *International Journal of Quality & Reliability Management*, 41(4), pp. 1063–1088. Available at: <https://doi.org/10.1108/IJQRM-07-2023-0237>.
- Rianty, M., Latief, Y. and Riantini, L.S. (2018) 'Development of risk-based standardized WBS (Work Breakdown Structure) for quality planning of high rise building architectural works', *MATEC Web of Conferences*. Edited by B.H. Setiadji *et al.*, 159, p. 01019. Available at: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815901019>.
- Shafizadeh, E. and Hossein Mousavizadegan, S. (2025) 'A comprehensive risk assessment framework for composite Lenj Hulls: integrating FMEA with CRITIC-CODAS', *Civil Engineering and Environmental Systems*, 42(3–4), pp. 314–334. Available at: <https://doi.org/10.1080/10286608.2025.2548230>.
- Talwar, P. (2020) 'Software Failure Mode and Effects Analysis', in, pp. 86–91. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-39512-4_14.
- Wang, L. *et al.* (2019) 'A linguistic risk prioritization approach for failure mode and effects analysis: A case study of medical product development', *Quality and Reliability Engineering International*, 35(6), pp. 1735–1752. Available at: <https://doi.org/10.1002/qre.2472>.
- Wang, M. *et al.* (2025) 'Reliability and Risk Assessment of Hydrogen-Powered Marine Propulsion Systems Based on the Integrated FAHP-FMECA Framework', *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(11), p. 2115. Available at: <https://doi.org/10.3390/jmse13112115>.
- Wong, C.F. *et al.* (2022) 'Hazard Identification Risk Assessment and Risk Control (HIRARC) for Mengkuang Dam Construction', *Civil Engineering and Architecture*, 10(3), pp. 762–770. Available at: <https://doi.org/10.13189/cea.2022.100302>.
- Yılmaz, A.F. and Köse, O. (2025) 'Advancing sustainable shipbuilding through a hybrid risk prioritization model: integrating FMEA and machine learning', *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 70, p. 102158. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2025.102158>.