

MITIGASI RISIKO KECELAKAAN KERJA DI PELABUHAN DENGAN BOWTIE ANALYSIS: STUDI KASUS DI PT PELABUHAN INDONESIA REGIONAL 2 TELUK BAYUR

Taufiq Ihsan*, Ari Kurniawan Hendri, Shinta Silvia, Annisa Maulidya

*Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Andalas,
Limau Manis, Padang, Indonesia 25163*

Abstract

Kegiatan bongkar muat di pelabuhan merupakan aktivitas yang kompleks dan berisiko tinggi, sehingga membutuhkan perhatian khusus terhadap keselamatan dan kesehatan kerja (K3). Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mengendalikan risiko kecelakaan kerja pada kegiatan bongkar muat di PT Pelabuhan Indonesia (Pelindo) Regional 2 Teluk Bayur. Metode yang digunakan adalah Bowtie Analysis, yang memungkinkan visualisasi dan analisis hubungan sebab-akibat dari suatu kejadian secara komprehensif. Data dikumpulkan melalui observasi lapangan, kuesioner, wawancara dengan pekerja dan staf K3, serta studi literatur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat dua jenis kegiatan dengan risiko tinggi, yaitu penanganan general cargo dan penanganan peti kemas. Ancaman utama yang dapat menyebabkan kecelakaan kerja antara lain human error, peralatan yang tidak layak, kurangnya penerangan, housekeeping yang buruk, dan cuaca buruk. Konsekuensi dari kecelakaan kerja meliputi kematian, cedera fisik dan trauma psikologis, gangguan operasional bongkar muat, dan turunnya reputasi perusahaan. Berdasarkan analisis risiko, dirumuskan rekomendasi strategi pengendalian risiko yang efektif, meliputi preventive control dan mitigation control, serta rekomendasi perbaikan prosedur K3 yang ada.

Keywords: bowtie analysis; cargo handling; occupational accidents; ports; risk management

Abstract

[Mitigating Occupational Accident Risks in Ports with Bowtie Analysis: A Case Study at PT Pelabuhan Indonesia Regional 2 Teluk Bayur] Loading and unloading activities in ports are complex and high-risk operations, demanding specific attention to occupational health and safety (OHS). This study aims to identify, analyze, and control the risk of accidents in these activities at PT Pelabuhan Indonesia (Pelindo) Regional 2 Teluk Bayur. The Bowtie Analysis method is used for its comprehensive visualization and analysis of cause-and-effect relationships in accidents. Data was gathered through field observations, questionnaires, interviews with workers and OHS staff, and a literature review. The results reveal two high-risk activities: general cargo handling and container handling. Major threats leading to accidents include human error, equipment malfunction, poor lighting, inadequate housekeeping, and adverse weather. Consequences range from fatalities and physical injuries to psychological trauma, operational disruptions, and damage to the company's reputation. Based on the risk analysis, this study formulates recommendations for effective risk control strategies, including preventive and mitigation controls, along with suggestions for improving existing OHS procedures.

Keywords: solar panel; renewable energy; optimization; hybrid

1. Pendahuluan

Pelabuhan merupakan sektor vital dalam kehidupan sosial dan ekonomi Indonesia, terutama dalam konteks negara kepulauan (Sunitiyoso et al., 2022). Sebagai pusat kegiatan pengiriman barang dan jasa, pelabuhan memiliki peran strategis dalam pengembangan ekonomi nasional termasuk kegiatan bongkar muat di pelabuhan. Namun, kompleksitas operasional dan intensitas kegiatan bongkar muat

menciptakan lingkungan kerja berisiko tinggi, sehingga kecelakaan kerja berpotensi terjadi dan menyebabkan kerugian signifikan, tidak hanya materil namun juga pada keselamatan manusia (Onggaria & Moeis, 2024).

Kecelakaan kerja di pelabuhan tidak hanya berdampak pada kerugian fisik dan mental bagi para pekerja, tetapi juga memberikan dampak negatif terhadap kesejahteraan mereka secara keseluruhan. Insiden ini sering kali menyebabkan kehilangan

karyawan yang terampil dan berpengalaman, yang sangat penting dalam menciptakan lingkungan kerja yang produktif dan aman (Gonçalves et al., 2025). Kehilangan ini pada akhirnya dapat mengurangi efisiensi operasional serta kualitas kerja secara keseluruhan. Selain berdampak pada kesejahteraan pekerja, kecelakaan kerja juga mengganggu operasional pelabuhan. Insiden ini sering kali menyebabkan penundaan pengiriman barang, yang dapat menimbulkan kerugian ekonomi yang signifikan (Yen et al., 2023). Selain itu, kerusakan infrastruktur akibat kecelakaan juga menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi keberlanjutan kegiatan pelabuhan secara keseluruhan (Verschuur et al., 2023).

Undang-Undang Keselamatan Kerja No.1 Tahun 1970 telah menegaskan hak setiap tenaga kerja untuk mendapatkan perlindungan dan keselamatan di tempat kerja. Dalam konteks ini, PT. Pelabuhan Indonesia (Pelindo) Regional 2 Teluk Bayur adalah Badan Usaha Milik Negara (BUMN) yang mengelola dan mengoperasikan Pelabuhan Teluk Bayur di Padang, Sumatera Barat, memiliki tanggung jawab besar untuk meningkatkan standar keselamatan dan kesehatan kerja (K3). Pelabuhan ini memiliki empat terminal yaitu terminal curah cair, curah kering, *multi purpose* dan peti kemas.

Meskipun kegiatan bongkar muat di terminal lainnya sudah menggunakan alat bantu, kegiatan bongkar muat terminal curah kering masih dilakukan secara manual. Pekerjaan ini melibatkan aktivitas fisik yang berat dan terjadinya kontak fisik langsung dengan sumber bahaya. Pekerja bongkar muat berisiko terjepit peti kemas, terjatuh dari ketinggian, kecelakaan akibat peralatan yang rusak dan terpapar bahan berbahaya dan beracun (B3) yang sedang dipindahkan.

Penelitian terkait identifikasi bahaya dan risiko kecelakaan kerja pada kegiatan bongkar muat di pelabuhan menggunakan metode HIRARC telah ada, namun dengan lokasi studi yang berbeda (Aome & Widiawan, 2022). Pada penelitian tersebut, bahaya dan risiko yang diidentifikasi diberikan langkah-langkah pengendalian yang sesuai agar tidak terjadi kecelakaan kerja. Namun, penelitian ini belum secara khusus membahas adanya potensi kegagalan dari pengendalian yang dilakukan serta belum memiliki visualisasi yang intuitif dan terstruktur untuk menggambarkan hubungan antara penyebab, risiko, dan langkah pengendalian.

Kompleksitas operasional pelabuhan dan beragamnya risiko yang ada menuntut pendekatan manajemen risiko yang komprehensif dan efektif. Salah satu metode yang menjanjikan adalah Metode *Bowtie Analysis*. Metode *Bowtie Analysis* tidak hanya mengidentifikasi potensi bahaya dan risiko, tetapi juga menganalisis secara mendalam faktor-faktor penyebab dan dampaknya (de Ruijter & Guldenmund, 2016). Dengan visualisasi yang jelas dalam bentuk diagram *Bowtie*, metode ini memudahkan identifikasi titik-titik kritis tempat intervensi dapat dilakukan untuk mencegah terjadinya kecelakaan atau mengurangi dampaknya. Keunggulan metode ini dibandingkan metode analisis risiko lainnya terletak pada kemampuannya memadukan analisis kualitatif dan

kuantitatif, serta memberikan pemahaman yang lebih holistik tentang risiko (Montero et al., 2025). Selain itu, diagram *Bowtie* yang dihasilkan sangat komunikatif, memudahkan pemahaman bagi berbagai pihak terkait, mulai dari manajemen hingga pekerja lapangan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus di Pelindo Regional 2 Teluk Bayur, untuk mengidentifikasi dan menganalisis risiko kecelakaan kerja yang dominan dalam kegiatan bongkar muat. Observasi lapangan dan pengambilan data dilakukan pada September hingga Desember 2024. Metode *Bowtie Analysis* dipilih karena efektif untuk memvisualisasikan dan mengelola risiko yang kompleks.

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer meliputi data bahaya dan risiko, serta data pencegahan dan mitigasi risiko. Data sekunder meliputi dokumen *Risk Register* dan dokumen *Job Safety Analysis* (JSA), dan proses bongkar muat di Pelindo Regional 2 Teluk Bayur. Data-data ini diolah untuk mengetahui elemen-elemen Diagram *Bowtie* yang akan digunakan dalam analisis risiko.

Data yang telah dikumpulkan diolah dengan beberapa langkah. Pertama, dilakukan penilaian risiko dengan menyebarkan kuesioner kepada 103 responden (seluruh pekerja bongkar muat) untuk mengukur persepsi mereka terhadap kemungkinan kejadian (*likelihood*) dan tingkat keparahan (*severity*) dari setiap risiko yang telah diidentifikasi. Data hasil kuesioner tersebut kemudian diolah dengan menggunakan perhitungan *likelihood index* dan *severity index* untuk mendapatkan nilai kuantitatif dari setiap risiko (Acebes et al., 2024).

Selanjutnya, setiap risiko diberikan peringkat (*ranking*) berdasarkan nilai *likelihood index* dan *severity index*. Peringkat risiko ini kemudian diplotkan pada tabel kategori matriks risiko untuk mengidentifikasi tingkat risiko dari setiap risiko, apakah termasuk risiko rendah, sedang, atau tinggi (Jensen et al., 2022). Risiko dengan tingkat risiko tinggi kemudian dianalisis lebih lanjut dengan menggunakan metode *Bowtie Analysis*. Analisis *Bowtie* dilakukan dengan mengidentifikasi *hazard*, *top event*, *threat*, *consequence*, *control measures*, *escalation factor*, dan *escalation factor control* (Tiwari & Patel, 2021). Langkah terakhir dalam pengolahan data adalah penyusunan rekomendasi. Berdasarkan hasil analisis *Bowtie*, disusun rekomendasi strategi pengendalian risiko yang efektif, meliputi *preventive control* dan *mitigation control*, serta rekomendasi perbaikan prosedur K3 yang ada (Glette-Iversen et al., 2023).

3. Hasil & Pembahasan

Secara keseluruhan perhitungan peringkat risiko dari plot matriks penilaian risiko dapat dilihat pada **Tabel 1**. Berdasarkan **Tabel 1**, maka dapat diketahui bahwa ada 2 variabel dengan tingkat risiko tinggi yaitu risiko dengan nomor 8 (**Gambar 1 (a)**) dan nomor 16

Tabel 1. Hasil Penilaian Risiko

Kegiatan	No	Risiko (<i>Risk</i>)	Likelihood Index (L.I)	Severity Index (S.I)	Kategori Risiko
Pengangkatan material/alat oleh pekerja	1	Cedera otot	32	13	Rendah
	2	Cedera tulang	7	35	Rendah
Penggunaan kendaraan angkut	3	Tubuh pekerja tertabrak	6	62	Rendah
	4	Kendaraan terguling	5	52	Rendah
Penanganan <i>general cargo</i> (beras, semen, pupuk, dll)	5	Pekerja terjatuh ke dermaga	41	54	Rendah
	6	Pekerja terjatuh ke laut	17	60	Sedang
	7	Terjadi kebakaran	14	84	Rendah
	8	Bagian tubuh atau pakaian pekerja terjepit/ tersangkut/ terbentur (<i>hook/ sling crane</i>)	81	53	Tinggi
Penanganan <i>dry bulk cargo</i> (pasir, batu bara, dll)	9	<i>Crane</i> terguling (<i>collapse</i>)	6	93	Sedang
	10	Pekerja terjatuh ke dermaga	72	57	Sedang
	11	Pekerja terjatuh ke laut	17	84	Sedang
	12	Terjadi kebakaran	2	90	Sedang
	13	<i>Crane</i> terguling (<i>collapse</i>)	6	93	Sedang
Penanganan peti kemas	14	Pekerja terjatuh ke dermaga	41	79	Sedang
	15	Pekerja terjatuh ke laut	17	84	Sedang
	16	Pekerja tertimpa peti kemas	42	90	Tinggi
	17	<i>Crane</i> terguling (<i>collapse</i>)	6	93	Sedang
Penanganan curah cair (<i>CPO, oil, & gas</i>)	18	Bagian tubuh atau pakaian pekerja terjepit/ tersangkut/ terbentur (<i>hook/ sling crane</i>)	37	53	Rendah
	19	Terjadi kebakaran	36	84	Sedang
	20	Pekerja terpeleset	24	31	Rendah
Penggunaan <i>crane</i> dengan sumber tenaga listrik	21	Pekerja tersengat listrik	21	81	Rendah
	22	Terjadi kebakaran	8	82	Rendah



(a)



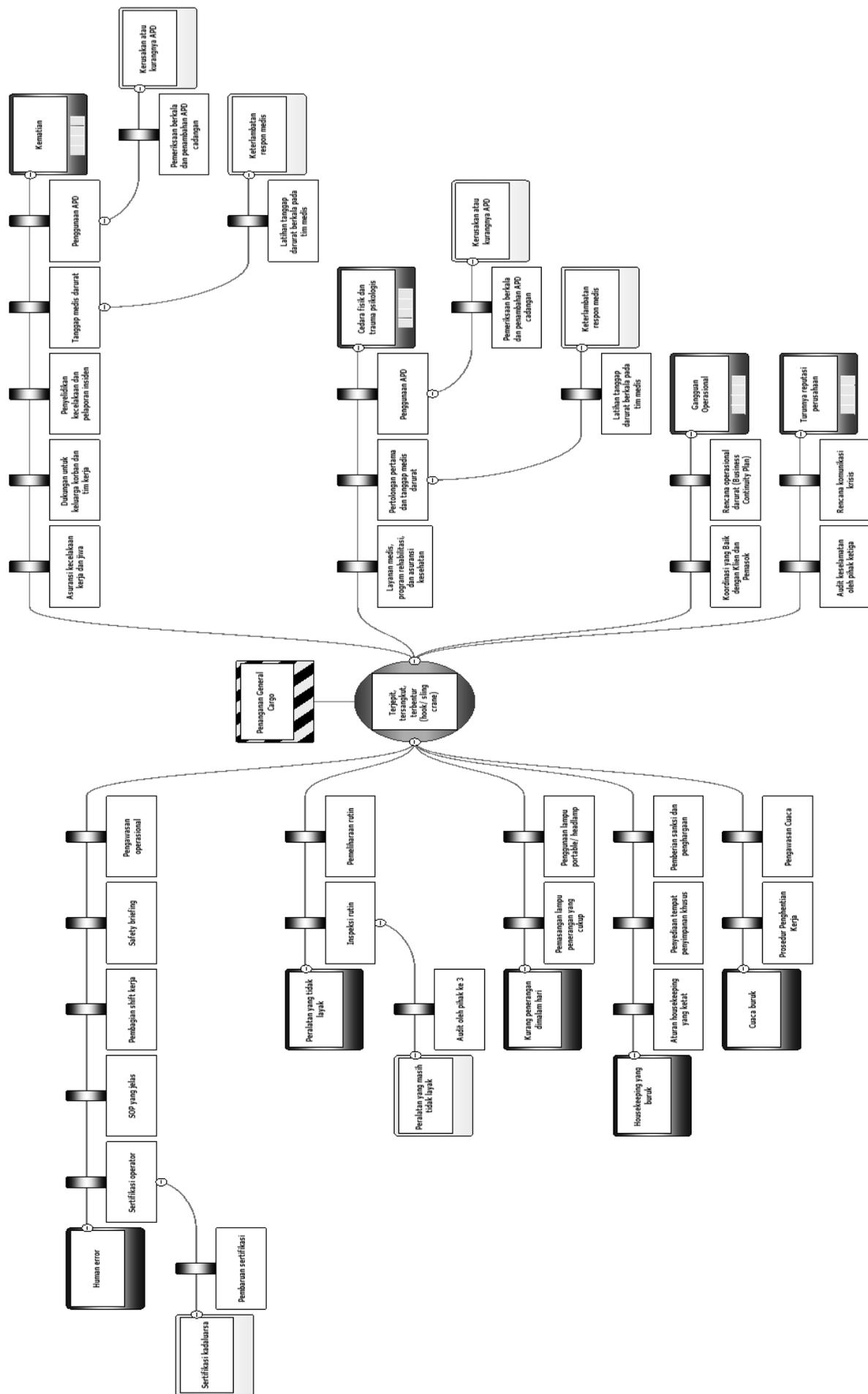
(b)

Gambar 1. (a) Penanganan *General Cargo*; (b) Penanganan Peti Kemas

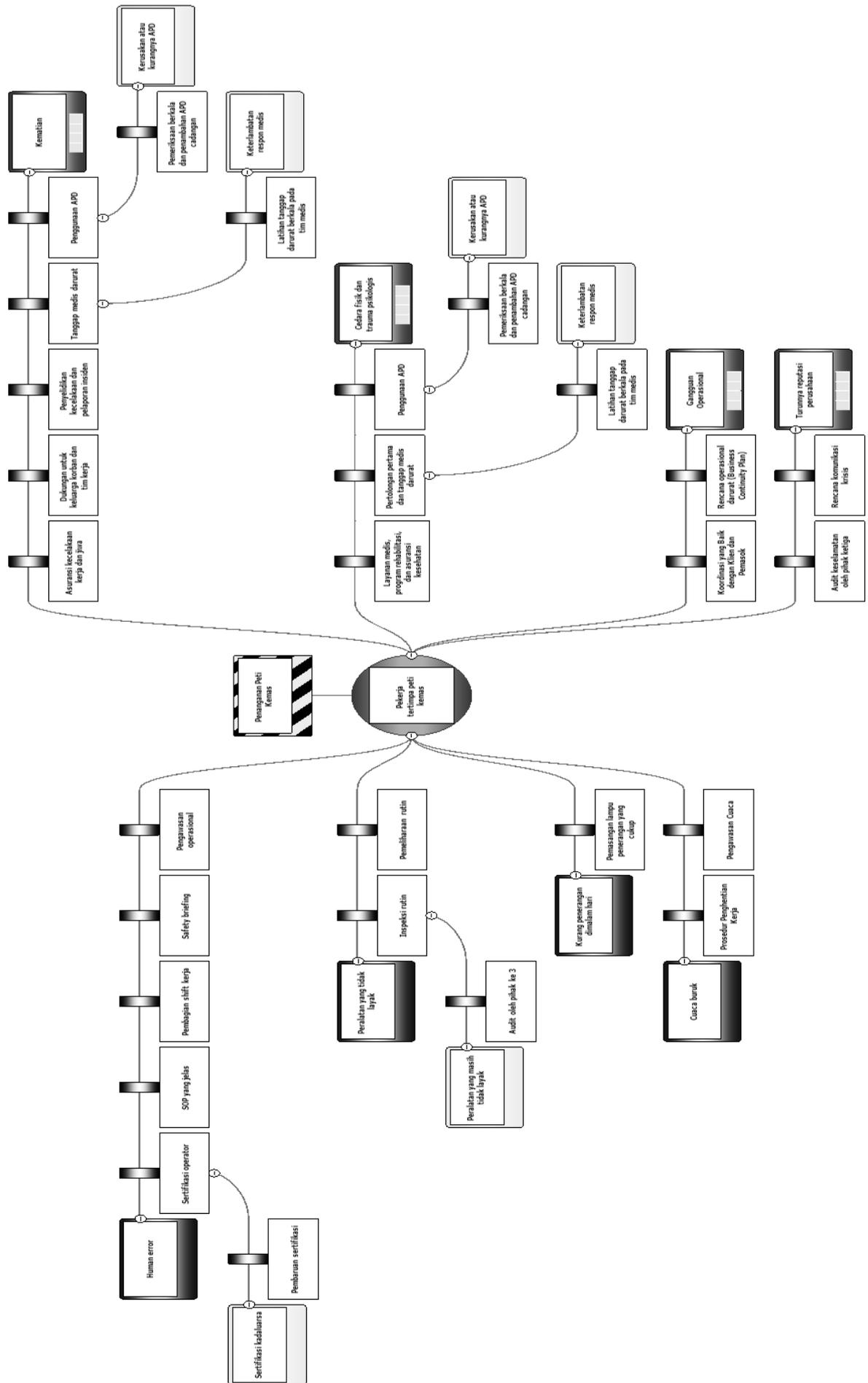
(Gambar 1 (b)). Variabel-variabel risiko tinggi ini secara umum memerlukan perhatian khusus dalam manajemen risiko karena potensinya menimbulkan dampak signifikan dan kompleksitas dalam operasional (Glette-Iversen et al., 2023; Montero et al., 2025), sehingga layak untuk dianalisis lebih mendalam penyebab, dampak, dan kontrol dari variabel risiko tersebut dengan Metode *Bowtie Analysis*.

Analisis *Bowtie*

Setelah didapatkan variabel risiko tinggi dari penilaian risiko pada kegiatan bongkar muat di pelabuhan, selanjutnya dilakukan analisis menggunakan Metode *Bowtie Analysis* guna menganalisis penyebab, dampak, serta kendali dari risiko tersebut. Didapatkan dua variabel dengan tingkat risiko tinggi, yaitu risiko pekerja terjepit, tersangkut, terbentur (*hook/ sling crane*) dari kegiatan penanganan



Gambar 2. Diagram Bowtie pada Hook/Sling Crane



Gambar 3. Diagram Bowtie Tertimpa Peti Kemas

general cargo dan risiko pekerja tertimpa peti kemas dari kegiatan penanganan peti kemas. Pada Analisis *Bowtie*, penyebab, dampak, dan pengendalian dari setiap risiko akan diidentifikasi untuk merancang strategi mitigasi yang efektif, guna meminimalkan potensi kecelakaan di pelabuhan. Diagram *Bowtie* dari risiko ini dapat dilihat pada **Gambar 2** dan **Gambar 3**.

Penanganan *General Cargo*

Penanganan *general cargo* menjadi salah satu fokus bahaya dalam penelitian ini karena sifatnya yang kompleks dan melibatkan berbagai risiko selama aktivitas bongkar muat di pelabuhan. Aktivitas ini membutuhkan kombinasi kerja manual dan penggunaan alat berat seperti *crane*, *sling*, dan *hook*. Jenis barang yang ditangani memiliki karakteristik yang beragam, seperti berat, bentuk yang tidak seragam, sehingga membutuhkan penanganan khusus agar tidak menimbulkan cedera, penyakit, kerusakan properti, kerusakan lingkungan, atau kombinasi dari hal-hal tersebut. Karakteristik *general cargo* yang bervariasi dan seringkali tidak standar ini memang diakui sebagai salah satu tantangan utama dalam operasional pelabuhan, berbeda dengan penanganan peti kemas yang lebih terstandarisasi (Coşar & Demir, 2018). Kompleksitas ini secara inheren meningkatkan potensi kesalahan manusia dan kecelakaan mekanis, yang menuntut prosedur keselamatan yang lebih adaptif dan pengawasan ketat (Gonçalves et al., 2025).

Kejadian puncak (*top event*) yang dianalisis dalam penelitian ini adalah "pekerja terjepit/ tersangkut/ terbentur (*hook/sling crane*)". *Top event* ini merupakan konsekuensi langsung dari *hazard* yang telah diidentifikasi dan sesuai dengan data *Risk Register* perusahaan serta hasil survei yang menunjukkan bahwa kecelakaan kerja jenis ini memiliki frekuensi kejadian yang tinggi dengan tingkat keparahan yang tinggi. Peristiwa seperti ini seringkali terjadi akibat kombinasi kegagalan teknis dan kelalaian operasional. Beberapa studi menunjukkan bahwa insiden terkait *hook* dan *sling crane* merupakan salah satu penyebab cedera serius, terutama karena keterlibatan langsung pekerja dalam proses pengaitan dan pelepasan beban (Adill & Muthuswamy, 2023; Sadeghi et al., 2021).

Pada **Gambar 2**, beberapa ancaman (*threat*) yang diidentifikasi antara lain *human error*, peralatan yang tidak layak, kurang penerangan di malam hari, *housekeeping* yang buruk, dan cuaca buruk. *Human error* dapat terjadi karena berbagai faktor, seperti kelelahan, kurangnya konsentrasi, atau kurangnya pelatihan. Faktor *human error* ini sangat dominan, selaras dengan temuan penelitian lain yang menyoroti bahwa sebagian besar kecelakaan kerja di pelabuhan disebabkan oleh kesalahan manusia, seperti ketidakpatuhan terhadap prosedur atau kurangnya keterampilan (Alias et al., 2022; Maternová et al., 2023; Silvia et al., 2020). Peralatan yang tidak layak dapat berupa *crane* yang rusak, *sling* yang putus, atau *hook* yang lepas. Kurang penerangan di malam hari dapat menyulitkan pekerja untuk melihat dengan jelas, sehingga meningkatkan risiko kecelakaan. *Housekeeping* yang buruk dapat menyebabkan pekerja

terpeleset, tersandung, atau terjatuh. Cuaca buruk, seperti angin kencang atau hujan lebat, juga dapat meningkatkan risiko kecelakaan.

Konsekuensi (*consequence*) yang mungkin terjadi akibat ancaman-ancaman tersebut antara lain kematian, cedera fisik dan trauma psikologis, gangguan operasional bongkar muat, dan turunnya reputasi perusahaan. Kematian merupakan konsekuensi yang paling fatal dari kecelakaan kerja. Cedera fisik dapat berupa patah tulang, luka robek, atau cedera kepala. Trauma psikologis dapat terjadi pada pekerja yang mengalami atau menyaksikan kecelakaan kerja. Gangguan operasional bongkar muat dapat menyebabkan kerugian ekonomi bagi perusahaan. Turunnya reputasi perusahaan dapat menyebabkan hilangnya kepercayaan dari pelanggan dan mitra bisnis. Dampak berantai dari konsekuensi ini menunjukkan bahwa kecelakaan kerja bukan hanya masalah individu, tetapi juga memiliki implikasi luas terhadap keberlanjutan bisnis dan citra perusahaan di mata publik (Jain et al., 2024). Oleh karena itu, investasi dalam upaya pencegahan dan mitigasi sangat krusial untuk menjaga kelangsungan operasional dan reputasi.

Untuk mencegah terjadinya *top event* atau meminimalkan dampaknya, PT Pelindo telah menerapkan berbagai langkah pengendalian risiko (*control measures*), baik *preventive* (pencegahan) maupun *mitigation* (pemulihan). *Preventive control* yang diterapkan antara lain mewajibkan setiap operator memiliki sertifikasi yang relevan dan masih berlaku, menyusun SOP yang lengkap dan jelas, melakukan pelatihan SOP kepada pekerja, mengatur pembatasan *shift* kerja secara efisien, melakukan *safety briefing* sebelum memulai pekerjaan, melakukan pengawasan operasional berkala, memastikan penggunaan APD yang tepat, mengadakan inspeksi dan pemeliharaan rutin peralatan, memasang lampu penerangan yang cukup, menerapkan aturan *housekeeping* yang ketat, dan menetapkan prosedur penghentian kerja saat cuaca buruk.

Sementara itu, *mitigation control* yang diterapkan antara lain penggunaan APD yang sesuai oleh setiap pekerja, penyediaan tanggap medis darurat, penyelidikan kecelakaan dan pelaporan insiden, dukungan untuk keluarga korban dan tim kerja, asuransi kecelakaan kerja dan jiwa, pertolongan pertama sesuai prosedur, pelayanan medis, program rehabilitasi, dan asuransi kesehatan, pembuatan Rencana Operasional Darurat (*Business Continuity Plan*), koordinasi yang baik dengan klien dan pemasok, pembuatan rencana komunikasi krisis, dan audit keselamatan oleh pihak ketiga. Penerapan kontrol-kontrol ini menunjukkan komitmen perusahaan terhadap K3, namun efektivitasnya sangat bergantung pada implementasi dan pemantauan berkelanjutan. Studi menunjukkan bahwa *preventive controls* seperti pelatihan dan SOP adalah fundamental, sementara *mitigation controls* berfungsi sebagai jaring pengaman terakhir (Glette-Iversen et al., 2023).

Selanjutnya, beberapa *escalation factor* yang diidentifikasi dalam penelitian ini antara lain sertifikasi operator yang kadaluwarsa, peralatan yang tetap tidak layak akibat kelemahan prosedur inspeksi internal,

kerusakan atau kurangnya APD, dan keterlambatan respon medis. Untuk mencegah atau mengurangi kemungkinan *escalation factor* terjadi, PT Pelindo perlu menerapkan kontrol faktor eskalasi (*escalation factor control*), seperti memperbarui sertifikasi operator minimal 1 bulan sebelum masa berlaku habis, melakukan audit pihak ketiga setiap 6 bulan untuk memastikan kelayakan peralatan, memeriksa dan menambah APD cadangan setiap minggu, serta melakukan latihan tanggap darurat berkala pada tim medis (3 bulan sekali). Keberadaan *escalation factor* mengindikasikan adanya kelemahan dalam sistem manajemen barrier yang ada. Pentingnya mengidentifikasi dan mengendalikan *escalation factor* ini adalah untuk mencegah kegagalan barrier yang dapat mengubah insiden kecil menjadi kecelakaan fatal, sebuah konsep kunci dalam analisis *Bowtie* (de Ruijter & Guldenmund, 2016).

Penanganan Peti Kemas

Hazard kedua yang teridentifikasi dalam penelitian ini adalah "penanganan peti kemas". Penanganan peti kemas menjadi fokus bahaya berikutnya karena kegiatan ini melibatkan risiko yang signifikan selama proses bongkar muat di pelabuhan. Aktivitas ini memerlukan penggunaan alat berat seperti *crane*, *reach stacker*, atau *forklift* untuk memindahkan peti kemas dari kapal ke daratan atau sebaliknya. Selain itu, ukuran dan berat peti kemas yang sangat bervariasi, serta kondisi penyimpanan yang kadang tidak stabil, dapat menyebabkan potensi kecelakaan kerja. Oleh karena itu, penanganan peti kemas memerlukan perhatian khusus dan prosedur yang ketat untuk meminimalkan risiko. Penanganan peti kemas, meskipun lebih terstandarisasi dibandingkan *general cargo*, tetap memiliki bahaya intrinsik karena dimensi dan beratnya yang masif, serta kompleksitas pergerakan alat berat di area terbatas (Merz et al., 2023). Kecelakaan dalam penanganan peti kemas dapat berakibat fatal dan seringkali menyebabkan kerusakan besar pada properti dan gangguan operasional yang signifikan (Budiyanto & Fernanda, 2020).

Dalam penelitian ini, *top event* yang dianalisis adalah "Pekerja tertimpa peti kemas". *Top event* ini merupakan konsekuensi langsung dari *hazard* yang telah diidentifikasi dan sesuai dengan data *Risk Register* perusahaan serta hasil survei yang menunjukkan bahwa kecelakaan kerja jenis ini memiliki frekuensi kejadian yang tinggi dengan tingkat keparahan yang tinggi. Insiden pekerja tertimpa peti kemas adalah salah satu risiko paling serius dalam operasi terminal peti kemas. Studi kasus sebelumnya juga mengonfirmasi bahwa tabrakan dan tertimpa beban adalah risiko dominan dalam penanganan peti kemas, menekankan pentingnya *clearance area* dan prosedur pengangkatan yang aman (Sunaryo & Hamka, 2017).

Pada **Gambar 3**, beberapa ancaman (*threat*) yang diidentifikasi antara lain *human error*, peralatan yang tidak layak, kurang penerangan di malam hari, dan cuaca buruk. *Human error* dapat terjadi karena berbagai faktor, seperti kelelahan, kurangnya konsentrasi, atau kurangnya pelatihan. Meskipun

otomatisasi semakin meningkat, peran operator dan pekerja di lapangan masih sangat krusial, membuat *human error* tetap menjadi penyebab utama kecelakaan (Maternová et al., 2023). Peralatan yang tidak layak dapat berupa *crane* yang rusak, *reach stacker* yang tidak stabil, atau *forklift* yang mengalami kerusakan. Kerusakan dan kegagalan peralatan berat merupakan ancaman serius yang dapat mengakibatkan insiden besar, terutama jika inspeksi dan pemeliharaan rutin tidak dilakukan secara ketat (Babu & Aithal, 2023; Ihsan et al., 2021). Kurang penerangan di malam hari dapat menyulitkan pekerja untuk melihat dengan jelas, sehingga meningkatkan risiko kecelakaan. Pencahayaannya yang tidak memadai di area kerja, khususnya saat malam hari, mengurangi visibilitas dan meningkatkan peluang terjadinya kecelakaan, terutama di lingkungan yang dinamis seperti pelabuhan (Tseng & Pilcher, 2017). Cuaca buruk, seperti angin kencang atau hujan lebat, juga dapat meningkatkan risiko kecelakaan. Kondisi cuaca ekstrem, seperti angin kencang atau badai, dapat secara drastis mempengaruhi stabilitas *crane* dan pergerakan peti kemas, seringkali memaksa penghentian operasional untuk mencegah insiden (Jin et al., 2020).

Konsekuensi (*consequence*) yang mungkin terjadi akibat ancaman-ancaman tersebut antara lain kematian, cedera fisik dan trauma psikologis, gangguan operasional bongkar muat, dan turunnya reputasi perusahaan. Kematian merupakan konsekuensi yang paling fatal dari kecelakaan kerja. Cedera fisik dapat berupa patah tulang, luka robek, atau cedera kepala. Trauma psikologis dapat terjadi pada pekerja yang mengalami atau menyaksikan kecelakaan kerja. Gangguan operasional bongkar muat dapat menyebabkan kerugian ekonomi bagi perusahaan. Turunnya reputasi perusahaan dapat menyebabkan hilangnya kepercayaan dari pelanggan dan mitra bisnis. Dampak-dampak ini tidak hanya mencakup kerugian langsung tetapi juga kerugian tidak langsung yang signifikan, termasuk biaya hukum, hilangnya produktivitas, dan penurunan moral pekerja (Li et al., 2024).

Untuk mencegah terjadinya *top event* atau meminimalkan dampaknya, PT. Pelindo telah menerapkan berbagai langkah pengendalian risiko, baik yang bersifat *preventive* maupun *mitigation*. *Preventive control* yang diterapkan antara lain mewajibkan setiap operator memiliki sertifikasi yang relevan dan masih berlaku, menyusun SOP yang lengkap, jelas, dan mudah diikuti, melakukan pelatihan SOP kepada pekerja, mengatur pembagian *shift kerja* secara efisien, melakukan *safety briefing* sebelum memulai pekerjaan, melakukan pengawasan operasional berkala, memastikan penggunaan APD yang tepat, mengadakan inspeksi rutin peralatan, melaksanakan pemeliharaan rutin peralatan, memasang lampu penerangan yang cukup, dan menetapkan prosedur penghentian kerja saat cuaca buruk.

Sementara itu, *mitigation control* yang diterapkan antara lain penggunaan APD yang sesuai oleh setiap pekerja, penyediaan tanggap medis darurat, penyelidikan kecelakaan dan pelaporan insiden, dukungan untuk keluarga korban dan tim kerja,

asuransi kecelakaan kerja dan jiwa, pertolongan pertama sesuai prosedur, pelayanan medis, program rehabilitasi, dan asuransi kesehatan, pembuatan Rencana Operasional Darurat, koordinasi yang baik dengan klien dan pemasok, pembuatan rencana komunikasi krisis, dan audit keselamatan oleh pihak ketiga. Efektivitas kontrol ini sangat tergantung pada kepatuhan operasional dan pengawasan yang konsisten. Keberadaan dan pemeliharaan APD yang memadai serta respons darurat yang cepat adalah kunci untuk meminimalisir dampak setelah insiden terjadi (Gonçalves et al., 2025).

Beberapa *escalation factor* yang diidentifikasi dalam penelitian ini antara lain sertifikasi operator yang kadaluwarsa, peralatan yang tetap tidak layak akibat kelemahan prosedur inspeksi internal, kerusakan atau kurangnya APD, dan keterlambatan respon medis. Untuk mencegah atau mengurangi kemungkinan *escalation factor* terjadi, PT. Pelindo perlu menerapkan kontrol faktor eskalasi, seperti memperbarui sertifikasi operator minimal 1 bulan sebelum masa berlaku habis, melakukan audit pihak ketiga setiap 6 bulan untuk memastikan kelayakan peralatan, memeriksa dan menambah APD cadangan setiap minggu, serta melakukan latihan tanggap darurat berkala pada tim medis (3 bulan sekali).

Evaluasi Efektivitas Pengendalian Risiko

Berdasarkan *Bowtie Analysis* yang telah dilakukan, PT. Pelindo dapat melakukan evaluasi efektivitas *control measures* dengan melakukan analisis data kecelakaan kerja, mengelompokkan data kecelakaan kerja berdasarkan jenis kesalahan, mengadakan *safety briefing* harian, melakukan evaluasi terhadap frekuensi dan kualitas *safety briefing*, mengumpulkan masukan dari pekerja mengenai efektivitas *safety briefing*, melakukan observasi langsung di lapangan, mengevaluasi pemahaman pekerja terhadap SOP, memberikan umpan balik langsung pada pekerja, menyusun pelatihan tambahan, mengevaluasi program pemeliharaan peralatan bongkar muat, memeriksa *log* pemeliharaan, menyusun *checklist* pemeliharaan, melibatkan teknisi berpengalaman, mengundang pihak independen, menerapkan sistem pelaporan digital, membuat analisis tren dari data pemeliharaan, menguji kembali peralatan yang telah diperbaiki, mengidentifikasi potensi insiden yang dapat mempengaruhi reputasi perusahaan, menyusun protokol komunikasi internal dan eksternal, membentuk tim komunikasi krisis, melakukan simulasi komunikasi krisis, menyediakan pelatihan bagi tim komunikasi krisis, mengembangkan pedoman penggunaan media sosial, dan melakukan pelaporan insiden keselamatan kerja.

Penelitian ini mengidentifikasi dua jenis kegiatan dengan risiko tinggi, yaitu penanganan *general cargo* dan penanganan peti kemas, ini sejalan dengan beberapa studi (Kadir et al., 2020; Saruchera, 2020) yang menyatakan bahwa penanganan *general cargo* dan peti kemas merupakan aktivitas bongkar muat yang kompleks dan memiliki risiko kecelakaan kerja yang tinggi. *Human error* menjadi salah satu ancaman utama dalam kedua jenis kegiatan tersebut.

Hal ini sesuai dengan beberapa penelitian yang menunjukkan bahwa *human error* merupakan faktor penyebab utama kecelakaan kerja di pelabuhan (Alias et al., 2022; Maternová et al., 2023; Walters et al., 2020).

Penelitian ini juga menunjukkan bahwa peralatan yang tidak layak menjadi ancaman yang dapat menyebabkan *top event* terjadi. Peralatan yang tidak layak dapat berupa *crane* yang rusak, *sling* yang putus, atau *hook* yang lepas. Kerusakan peralatan dapat disebabkan oleh kurangnya pemeliharaan atau usia peralatan yang sudah tua. Hal ini sejalan dengan penelitian (Babu & Aithal, 2023) yang menyatakan bahwa kerusakan peralatan merupakan salah satu penyebab utama kecelakaan kerja di pelabuhan.

Selain itu, pada studi ini juga ditemukan bahwa kurangnya penerangan di malam hari dapat meningkatkan risiko kecelakaan kerja. Kurangnya penerangan dapat menyebabkan pekerja tidak dapat melihat dengan jelas dan dapat menyebabkan kesalahan dalam pengoperasian alat atau penanganan barang. Pencahayaan yang cukup di area kerja pelabuhan sangat penting untuk menjaga keselamatan dan efisiensi operasional, terutama saat malam hari atau ketika jarak pandang terbatas (Putri & Susilawati, 2023; Tseng & Pilcher, 2017).

Housekeeping yang buruk juga menjadi salah satu ancaman yang dapat menyebabkan *top event* terjadi. *Housekeeping* yang buruk dapat berupa barang-barang yang berserakan di area kerja, tumpahan minyak atau bahan kimia, atau kondisi lantai yang licin. Hal ini dapat menyebabkan pekerja terpeleset, tersandung, atau terjatuh (Purohit et al., 2024). Oleh karena itu, penting untuk menjaga *housekeeping* yang baik di area kerja pelabuhan.

Cuaca buruk juga menjadi salah satu ancaman yang dapat menyebabkan *top event* terjadi. Cuaca buruk dapat berupa angin kencang, hujan lebat, atau gelombang tinggi. Kondisi cuaca buruk dapat mengganggu penglihatan pekerja, menyebabkan peralatan berat kehilangan stabilitas, atau mengganggu proses bongkar muat kapal. Beragam kajian telah menyampaikan bahwa cuaca buruk merupakan salah satu faktor utama yang dapat memicu kecelakaan kerja di pelabuhan (Garcia-Alonso et al., 2020; León-Mateos et al., 2021; Wang et al., 2024).

Konsekuensi dari kedua risiko tinggi tersebut meliputi kematian, cedera fisik dan trauma psikologis, gangguan operasional bongkar muat, dan turunnya reputasi perusahaan. Kematian dan cedera fisik merupakan konsekuensi yang paling serius dari kecelakaan kerja. Trauma psikologis juga dapat terjadi pada pekerja yang mengalami atau menyaksikan kecelakaan kerja. Gangguan operasional bongkar muat dapat menyebabkan kerugian ekonomi bagi perusahaan. Turunnya reputasi perusahaan dapat menyebabkan hilangnya kepercayaan dari pelanggan dan mitra bisnis.

Berdasarkan *Bowtie Analysis*, PT. Pelindo telah menerapkan berbagai langkah pencegahan dan langkah mitigasi risiko tinggi tersebut. Beberapa contoh langkah pencegahan antara lain: pelatihan dan sertifikasi operator, penyusunan SOP, inspeksi dan

pemeliharaan peralatan, pemasangan lampu penerangan, penerapan aturan *housekeeping*, dan prosedur penghentian kerja saat cuaca buruk. Beberapa contoh langkah mitigasi antara lain: penggunaan APD, tanggap darurat, penyelidikan kecelakaan, dukungan untuk keluarga korban, asuransi, layanan medis dan rehabilitasi, *business continuity plan*, dan rencana komunikasi krisis.

Meskipun PT Pelindo telah menerapkan berbagai *control measures*, *Bowtie Analysis* juga mengidentifikasi beberapa potensi kelemahan dalam sistem K3. Oleh karena itu, direkomendasikan untuk melakukan evaluasi efektivitas pencegahan dan mitigasi (*control measures*) secara berkala, mengidentifikasi ancaman untuk kontrol (*escalation factor*), mengembangkan efektivitas dari langkah mitigasi, dan melakukan analisis risiko residual.

Keterbatasan Penelitian dan Rekomendasi Studi Lanjut

Studi ini memberikan analisis komprehensif mengenai risiko kecelakaan kerja pada operasi bongkar muat di PT. Pelabuhan Indonesia Regional 2 Teluk Bayur menggunakan *Bowtie Analysis*. Namun, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan. Pertama, cakupan data yang digunakan dalam penelitian ini sebagian besar bersumber dari *risk register* perusahaan dan persepsi responden melalui kuesioner dan wawancara. Meskipun data ini valid untuk tujuan identifikasi risiko, ketersediaan data historis kecelakaan yang lebih terperinci dan kuantitatif dari tahun-tahun sebelumnya akan memungkinkan analisis frekuensi dan probabilitas yang lebih mendalam, sehingga dapat menghasilkan penilaian risiko yang lebih presisi. Kedua, fokus analisis penelitian ini terbatas pada dua risiko dominan yang teridentifikasi memiliki tingkat tinggi. Meskipun demikian, risiko-risiko lain yang masuk kategori sedang juga berpotensi menimbulkan kerugian dan mungkin memerlukan analisis lebih lanjut untuk perencanaan pengendalian risiko jangka panjang.

Berdasarkan keterbatasan tersebut, beberapa rekomendasi untuk studi lanjut dapat diberikan. Pertama, penelitian selanjutnya dapat menganalisis dampak kecelakaan kerja terhadap produktivitas operasional dan biaya tidak langsung perusahaan, guna memberikan gambaran lebih komprehensif mengenai kerugian finansial akibat kecelakaan dan memperkuat argumen untuk investasi K3. Kedua, pengembangan model atau aplikasi prediktif yang mengintegrasikan *Bowtie Analysis* dengan data historis atau *machine learning* dapat membantu perusahaan dalam pengambilan keputusan *real-time* terkait pengendalian risiko, dengan model ini dapat memberikan rekomendasi *control measures* yang lebih adaptif dan berbasis data. Ketiga, disarankan untuk melakukan studi komparatif antara *Bowtie Analysis* dengan metode analisis risiko lainnya, seperti HAZOP, HIRARC, atau FTA, di lingkungan pelabuhan yang sama atau serupa. Studi ini dapat mengidentifikasi keunggulan dan kelemahan masing-masing metode dalam konteks spesifik operasi bongkar muat, serta memberikan pemahaman lebih mendalam tentang metode yang

paling efektif untuk berbagai jenis risiko. Terakhir, penting untuk melakukan validasi lapangan secara berkala terhadap efektivitas *control measures* yang telah diterapkan; ini dapat melibatkan audit keselamatan yang lebih detail, observasi perilaku pekerja, dan evaluasi kepatuhan terhadap SOP untuk memastikan *barrier* yang ada berfungsi sebagaimana mestinya.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi dua jenis kegiatan bongkar muat di Pelindo Regional 2 Teluk Bayur yang memiliki risiko tinggi, yaitu penanganan *general cargo* dan penanganan peti kemas. *Human error*, peralatan yang tidak layak, kurangnya penerangan, *housekeeping* yang buruk, dan cuaca buruk merupakan ancaman utama yang dapat menyebabkan kecelakaan kerja pada kedua aktivitas tersebut. Konsekuensi yang ditimbulkan akibat kecelakaan kerja meliputi kematian, cedera fisik dan trauma psikologis, gangguan operasional bongkar muat, dan turunnya reputasi perusahaan.

Meskipun Pelindo telah menerapkan berbagai langkah pengendalian risiko, baik yang bersifat pencegahan maupun mitigasi, analisis *Bowtie* menunjukkan bahwa masih terdapat potensi kelemahan dalam sistem K3. Oleh karena itu, direkomendasikan untuk melakukan evaluasi efektivitas *control measures* secara berkala, mengidentifikasi *escalation factor*, mengembangkan efektivitas langkah mitigasi, dan melakukan analisis risiko residual.

Penelitian ini memberikan kontribusi dalam penerapan *Bowtie Analysis* untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mengendalikan risiko kecelakaan kerja pada kegiatan bongkar muat di pelabuhan. Diharapkan penelitian ini dapat menjadi referensi bagi Pelindo dan stakeholders terkait dalam upaya meningkatkan keselamatan kerja di pelabuhan.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dibiayai oleh Universitas Andalas sesuai dengan Kontrak Penelitian Skripsi Sarjana Batch I Nomor: 329/UN16.19/PT.01.03/PSS/2025 Tahun Anggaran 2025.

5. Daftar Pustaka

- Acebes, F., González-Varona, J. M., López-Paredes, A., & Pajares, J. (2024). Beyond probability-impact matrices in project risk management: A quantitative methodology for risk prioritisation. *Humanities and Social Sciences Communications*, *11*(1), 670. <https://doi.org/10.1057/s41599-024-03180-5>
- Adill, L. M., & Muthuswamy, V. (2023). A Review of Crane-Related Accidents and Safety in Crane Operations Abstract: *International Journal of Scientific Research and Engineering Development*, *6*(2), 642–650.
- Alias, A. N., Yaakub, N., Baharuddin, M. R., Sciences, H., Azhar, M., Noor, M., Bertam, K., Batas, K., & Pinang, P. (2022). Port terminal safety: A conceptual paper on factors that affects

- occupational stress risk assessment in container terminal. *International Journal of Health Sciences*, 6(July), 5080–5090.
- Aome, P., & Widiawan, K. (2022). Identifikasi Bahaya, Penilaian Risiko dan Pengendalian Risiko dalam Kegiatan Bongkar Muat di PT Pelabuhan Indonesia IV cabang Makassar New Port. *Jurnal Titra*, 10(1), 135–142.
- Babu, B. M., & Aithal, P. S. (2023). Critical Analysis of Container Accidents in International Logistics Critical Analysis of Container Accidents in International. *International Journal of Case Studies in Business, IT, and Education*, 7(3), 194–204.
- Budiyanto, M. A., & Fernanda, H. (2020). Risk Assessment of Work Accident in Container Terminals Using the Fault Tree Analysis Method. In *Journal of Marine Science and Engineering* (Vol. 8, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/jmse8060466>
- Coşar, A. K., & Demir, B. (2018). Shipping inside the box: Containerization and trade. *Journal of International Economics*, 114, 331–345. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2018.07.008>
- de Ruijter, A., & Guldenmund, F. (2016). The bowtie method: A review. *Safety Science*, 88, 211–218. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.03.001>
- Garcia-Alonso, L., Moura, T. G. Z., & Roibas, D. (2020). The effect of weather conditions on port technical efficiency. *Marine Policy*, 113, 103816. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.103816>
- Glette-Iversen, I., Flage, R., & Aven, T. (2023). Extending and improving current frameworks for risk management and decision-making: A new approach for incorporating dynamic aspects of risk and uncertainty. *Safety Science*, 168, 106317. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106317>
- Gonçalves, A., Dutra, A., & Mussi, C. C. (2025). Occupational risks and health and safety management strategies in the port sector: A systematic literature review. *Safety Science*, 184, 106767. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106767>
- Ihsan, T., Silvia, S., Derosya, V., Edwin, T., & Dewi, M. S. (2021). Penilaian Risiko Terhadap Postur Kerja Pada Pekerja Pabrik Karet Indonesia. *J@ti Undip: Jurnal Teknik Industri*, 16(2), 116–122.
- Jain, A., Zwetsloot, G., & Torres, L. (2024). Sustainability, business responsibility and occupational health, safety and wellbeing in the future of work. *Safety Science*, 174, 106463. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106463>
- Jensen, R. C., Bird, R. L., & Nichols, B. W. (2022). *Risk Assessment Matrices for Workplace Hazards: Design for Usability*.
- Jin, L., Liu, H., Zheng, X., & Chen, S. (2020). Exploring the Impact of Wind Loads on Tower Crane Operation. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020(1), 2807438. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2020/2807438>
- Kadir, Z. A., Mohammad, R., Othman, N., Amrin, A., Muhtazaruddin, M. N., Abu-Bakar, S. H., & Muhammad-Sukki, F. (2020). Risk Management Framework for Handling and Storage of Cargo at Major Ports in Malaysia towards Port Sustainability. In *Sustainability* (Vol. 12, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/su12020516>
- León-Mateos, F., Sartal, A., López-Manuel, L., & Quintás, M. A. (2021). Adapting our sea ports to the challenges of climate change: Development and validation of a Port Resilience Index. *Marine Policy*, 130, 104573. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104573>
- Li, X., Chua, J. Y., & Yuen, K. F. (2024). A review on maritime disruption management: Categories, impacts, and strategies. *Transport Policy*, 154, 40–47. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2024.05.013>
- Maternová, A., Materna, M., Dávid, A., Török, A., & Švábová, L. (2023). Human Error Analysis and Fatality Prediction in Maritime Accidents. In *Journal of Marine Science and Engineering* (Vol. 11, Issue 12). <https://doi.org/10.3390/jmse11122287>
- Merz, M., Gröthli, E. I., Mørkrid, O. E., Tangstad, E., Fosøy, S., & Nordahl, H. (2023). A gap analysis for automated cargo handling operations with geared vessels frequenting small sized ports. *Maritime Transport Research*, 5, 100098. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.martra.2023.100098>
- Montero, V. J., Logrosa, G., Calorio, J. L., Lato, J. I., Hassall, M., & Mata, M. A. (2025). Risk modeling with Bowtie method for decision-making towards public health and safety. *Safety Science*, 185, 106777. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.106777>
- Onggaria, E., & Moeis, A. O. (2024). Operational Risk Management of Loading and Unloading Operations in Container Terminal Service Company. *5th South American Industrial Engineering and Operations Management Conference*, 483–489. <https://doi.org/10.46254/SA05.20240121>
- Purohit, B. K., Tewari, S., Prasad, K. S. N. V., Talari, V. K., Pandey, N., Choudhury, P., & Panda, S. S. (2024). Marine oil spill clean-up: A review on technologies with recent trends and challenges. *Regional Studies in Marine Science*, 80, 103876. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103876>

- 24.103876
- Putri, A. R., & Susilawati, S. (2023). Indikator Keselamatan Kerja Pada Aktivitas Bongkar Muat di Pelabuhan. *Nanggroe: Jurnal Pengabdian Cendikia*, 2(3), 407–414.
- Sadeghi, S., Soltanmohammadlou, N., & Rahnamayiezekavat, P. (2021). A systematic review of scholarly works addressing crane safety requirements. *Safety Science*, 133, 105002.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105002>
- Saruchera, F. (2020). Determinants of effective high-risk cargo logistics at sea ports : A case study. *Journal of Transport and Supply Chain Management*, 14(June), 1–13.
<https://doi.org/10.4102/jtscm.v14i0.488>
- Silvia, S., Ihsan, T., & Rizky, I. A. (2020). Analisis Iklim Keselamatan Kerja dan Pengaruh Karakteristik Responden pada Bagian Produksi di PT. X. *Jurnal Serambi Engineering*, 5(3).
- Sunaryo, & Hamka, M. A. (2017). Safety Risks Assessment on Container Terminal Using Hazard Identification and Risk Assessment and Fault Tree Analysis Methods. *Procedia Engineering*, 194, 307–314.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.150>
- Sunitiyoso, Y., Nuraeni, S., Pambudi, N. F., Inayati, T., Nurdayat, I. F., Hadiansyah, F., & Tiara, A. R. (2022). Port performance factors and their interactions: A systems thinking approach. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 38(2), 107–123.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2022.04.001>
- Tiwari, A., & Patel, P. (2021). The Bowtie Method For Safety Management : A Literature Review. *International Journal for Science and Advance Research in Technology*, 7(4), 685–689.
- Tseng, P.-H., & Pilcher, N. (2017). Maintaining and researching port safety: a case study of the port of Kaohsiung. *European Transport Research Review*, 9(3), 34.
<https://doi.org/10.1007/s12544-017-0250-z>
- Verschuur, J., Koks, E. E., Li, S., & Hall, J. W. (2023). Multi-hazard risk to global port infrastructure and resulting trade and logistics losses. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 5.
<https://doi.org/10.1038/s43247-022-00656-7>
- Walters, D., Wadsworth, E., & Bhattacharya, S. (2020). What about the workers? — Experiences of arrangements for safety and health in global container terminals. *Safety Science*, 121, 474–484.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.09.017>
- Wang, T., Ding, Z., Poo, M. C., & Lau, Y.-Y. (2024). Research on Port Risk Assessment Based on Various Meteorological Disasters. In *Urban Science* (Vol. 8, Issue 2).
<https://doi.org/10.3390/urbansci8020051>
- Yen, B. T. H., Huang, M.-J., Lai, H.-J., Cho, H.-H., & Huang, Y.-L. (2023). How smart port design influences port efficiency – A DEA-Tobit approach. *Research in Transportation Business & Management*, 46, 100862.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2022.100862>