



Integrasi HAZOP–AHP untuk Penyusunan *Safety Plan* Berbasis Prioritas Risiko pada Aktivitas *Lifting Gantry Crane*

Zulkifli Zulkifli^{1,*}, Patria Rahmawaty¹, Ida Bagus Dharmawan¹, Fikri Rizky Ferdian¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Balikpapan, Jl. Soekarno Hatta Km.8 Balikpapan, 76129

*zulkifli.as@poltekba.ac.id

Diterima: 12 06 2026

Direvisi: 22 06 2026

Disetujui: 29 06 2026

ABSTRAK

Aktivitas *lifting* menggunakan *gantry crane* memiliki tingkat risiko tinggi karena melibatkan interaksi pekerja, peralatan mekanis, beban, prosedur operasional, dan kondisi lingkungan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan *safety plan* berbasis prioritas risiko melalui integrasi *Hazard and Operability Study*, *risk matrix*, dan *Analytical Hierarchy Process*. Data dikumpulkan melalui kuesioner, observasi, telaah dokumen keselamatan kerja, serta penilaian aktivitas operasional *gantry crane*. Risiko dianalisis berdasarkan konsekuensi dan peluang kejadian, kemudian dipetakan dalam *risk matrix*. Pembobotan kriteria dilakukan melalui matriks perbandingan berpasangan untuk mengidentifikasi faktor dominan pengendalian keselamatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dari 29 aktivitas, 24 aktivitas (82,76%) berada pada kategori risiko tinggi, tiga aktivitas (10,34%) berada pada kategori ekstrem, dan dua aktivitas (6,90%) berada pada kategori rendah. Risiko ekstrem ditemukan pada pemeriksaan *bridge girder/beam*, pemeriksaan tabel daftar beban dan *sticker hand signal*, serta pengembalian peralatan setelah digunakan. Matriks awal AHP menghasilkan *consistency ratio* 0,0153, yang menunjukkan konsistensi matematis. Faktor manusia memperoleh bobot tertinggi 0,4162, diikuti peralatan 0,2618, manajemen 0,1611, material atau beban 0,0986, dan lingkungan 0,0624. Temuan ini menunjukkan bahwa *safety plan* perlu memprioritaskan kompetensi, komunikasi, kepatuhan prosedur, inspeksi, dan pengawasan sebagai dasar pencegahan kecelakaan serta alokasi sumber daya keselamatan operasi *gantry crane* secara lebih terarah dan efektif.

Kata kunci: *gantry crane*; *safety plan*; *Hazard and Operability Study*; *Analytical Hierarchy Process*; keselamatan kerja.

ABSTRACT

Lifting activities using gantry cranes carry high risks due to complex interactions among workers, mechanical equipment, loads, operational procedures, and environments. This study aims to develop a risk-priority-based safety plan integrating the Hazard and Operability Study, risk matrix, and Analytic Hierarchy Process. Data were collected via questionnaires, observations, safety document reviews, and operational assessments. Risks were analysed by consequence and likelihood, then mapped onto a risk matrix. The criteria weighting used a pairwise comparison matrix to identify the dominant safety control factors. Results revealed that among 29 activities, 24 (82.76%) posed high risk, 3 (10.34%) posed extreme risk, and 2 (6.90%) posed low risk. Extreme risks involved inspecting bridge girders/beams, verifying load charts and hand signal stickers, and returning equipment post-operation. The initial AHP matrix demonstrated mathematical consistency with a consistency ratio of 0.0153. Human factors obtained the highest weight (0.4162), followed by equipment (0.2618), management (0.1611), materials/loads (0.0986), and environment (0.0624). These findings emphasise that safety plans must prioritise human competence, communication, procedural compliance, inspection, and supervision to fundamentally prevent accidents and allocate gantry crane safety resources more effectively.

Keywords: *gantry crane*; *safety plan*; *Hazard and Operability Study*; *Analytical Hierarchy Process*; *safety*.

PENDAHULUAN

Aktivitas pengangkatan beban menggunakan *gantry crane* merupakan bagian penting dalam proses industri, tetapi termasuk pekerjaan dengan risiko tinggi. Operasi ini melibatkan beban berat, alat mekanis dan elektromekanis, operator, *rigger*, pengawas, prosedur kerja, serta kondisi lingkungan yang saling bergantung. Beban bergerak secara horizontal dan vertikal sehingga dapat mengalami ayunan, perubahan titik berat, ketidakstabilan, atau kegagalan sistem pengikatan. Kesalahan dalam penentuan kapasitas, pemilihan *lifting gear*, pemasangan *sling*, komunikasi isyarat, maupun pengendalian area dapat menyebabkan kerusakan material, penghentian produksi, cedera berat, dan kecelakaan fatal. Kajian mengenai *hoisting* menunjukkan bahwa kecelakaan pengangkatan terbentuk melalui interaksi faktor manusia, peralatan, material, manajemen, dan lingkungan, bukan akibat satu penyebab yang berdiri sendiri [1], [2].

Risiko *lifting gantry crane* karena itu tidak memadai apabila dipahami hanya sebagai persoalan teknis alat angkat. Faktor manusia mencakup kompetensi, kepatuhan terhadap prosedur, kelelahan, komunikasi, dan ketepatan pengambilan keputusan. Faktor peralatan meliputi kondisi struktur *crane*, *wire rope*, *sling*, hook, *shackle*, rem, *limit switch*, panel kendali, roda, rel, dan perangkat proteksi. Faktor beban berkaitan dengan berat aktual, bentuk, titik ikat, distribusi massa, serta kestabilan selama perpindahan. Risiko juga dipengaruhi kualitas *lifting plan*, inspeksi, izin kerja, pembagian tanggung jawab, prosedur darurat, tata letak area, interferensi pekerjaan, *visibilitas*, dan keberadaan pekerja dalam lintasan beban. Penelitian keselamatan *hoisting* menunjukkan pergeseran dari penilaian parsial menuju analisis sistemik melalui *AcciMap*, *HAZOP*, *multi-criteria decision-making*, *machine learning*, *digital twin*, dan sensor pemantauan untuk mengidentifikasi faktor tersembunyi serta hubungan antareleman kerja [1], [2], [3], [4].

Dalam praktik industri, pengendalian risiko *lifting* umumnya dilakukan melalui inspeksi, *job safety analysis*, *lifting plan*, *permit to work*, daftar periksa, *HAZOP*, dan matriks risiko. Matriks risiko banyak digunakan karena sederhana, tetapi dapat menempatkan bahaya yang berbeda dalam kategori sama meskipun urgensi pengendaliannya tidak setara. Penetapan *likelihood* dan *severity* juga dapat berubah mengikuti pengalaman dan persepsi penilai. *HAZOP* mengidentifikasi deviasi secara lebih terstruktur, tetapi pendekatan konvensional masih menghadapi subjektivitas, kompleksitas analisis, dan keterbatasan dalam menghasilkan ukuran kuantitatif yang akurat [5]. Keputusan keselamatan juga tidak hanya dipengaruhi kemungkinan dan keparahan, tetapi paparan pekerja, kemampuan deteksi, kerusakan peralatan, dampak ekonomi, gangguan operasi, dampak lingkungan, dan urgensi tindakan. Ketidakpastian data dan ambiguitas penilaian menuntut metode yang mampu mengelola banyak kriteria secara konsisten [6], sedangkan metode tradisional masih terbatas dalam menentukan prioritas rekomendasi ketika sumber daya tidak mencukupi untuk melaksanakan seluruh tindakan secara bersamaan [4].

HAZOP menyediakan dasar untuk menelusuri penyimpangan dari kondisi operasi normal melalui identifikasi penyebab, konsekuensi, pengendalian yang tersedia, dan rekomendasi perbaikan. Pada *lifting gantry crane*, deviasi dapat berupa beban melebihi kapasitas, *sling* tidak sesuai, titik angkat keliru, beban tidak seimbang, area tidak steril, komunikasi gagal, rem tidak berfungsi, inspeksi terlewat, atau operator tidak memenuhi kompetensi. Walaupun sistematis, *HAZOP* sebagai metode tunggal belum cukup untuk menentukan urutan tindakan ketika jumlah temuan risiko banyak [4], [6], [7]. *Analytical Hierarchy Process (AHP)* melengkapi kekurangan tersebut melalui penyusunan hierarki keputusan, perbandingan berpasangan, pembobotan kriteria, dan pengujian konsistensi penilaian ahli. Integrasi *HAZOP-AHP* mengubah hasil identifikasi kualitatif menjadi dasar pemeringkatan yang lebih transparan. Penerapan *HAZOP*, *AHP*, dan evaluasi *fuzzy* dapat meningkatkan ketelitian penilaian risiko

[5], sedangkan penggabungan *HAZOP* dengan pendekatan *MCDM* memperkuat prioritas rekomendasi keselamatan [8]. Integrasi *AHP* atau *Fuzzy AHP* juga memberikan struktur keputusan yang lebih andal bagi industri berbahaya [7].

Penelitian mutakhir bergerak menuju pemetaan faktor dan jalur penyebab secara sistemik, pengolahan berbagai dimensi risiko, serta pemanfaatan teknologi prediktif. Risiko *hoisting* telah dianalisis melalui dimensi manusia, peralatan, manajemen, material, dan lingkungan, disertai pengembangan ergonomi, simulasi komputer, *machine learning*, serta *wearable sensor* [1]. Pemetaan kecelakaan berbasis *AcciMap* memperlihatkan hubungan berjenjang antara tindakan lapangan, pengawasan, organisasi, dan konteks regulasi [2], sedangkan pendekatan *machine learning* dan *Bayesian network* memperluas dukungan terhadap keputusan risiko yang kompleks [3]. *HAZOP* juga telah dikombinasikan dengan *fuzzy logic*, *AHP*, *TOPSIS*, *PROMETHEE*, dan *MCDM* untuk mengurangi kelemahan penilaian konvensional [4], [5], [6], [7]. Namun, sebagian besar penelitian berfokus pada fasilitas proses, ledakan gas, atau penentuan peringkat risiko secara umum. Penerapan *HAZOP-AHP* yang secara khusus mengubah pemeringkatan bahaya menjadi *safety plan* operasional pada *lifting gantry crane* masih terbatas. Hubungan antara bobot risiko, urutan tindakan, penanggung jawab, target waktu, kebutuhan sumber daya, dan indikator verifikasi belum dijelaskan secara memadai.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan mengintegrasikan *HAZOP* dan *AHP* untuk menyusun *safety plan* berbasis prioritas risiko pada aktivitas *lifting* menggunakan *gantry crane*. Penelitian mencakup identifikasi deviasi operasi, analisis penyebab dan konsekuensi, evaluasi pengendalian yang tersedia, penentuan kriteria keputusan, pembobotan menggunakan *AHP*, serta penyusunan urutan tindakan berdasarkan hierarki pengendalian. Hasil pemeringkatan tidak berhenti sebagai daftar risiko, tetapi diterjemahkan menjadi *safety plan* yang memuat tindakan pengendalian, penanggung jawab, batas waktu, kebutuhan sumber daya, dan mekanisme pemantauan. Pendekatan ini diharapkan menghasilkan keputusan yang konsisten, dapat ditelusuri, dan relevan bagi operator, *rigger*, mekanik, supervisor, serta manajemen K3 dalam mengalokasikan sumber daya pada risiko yang memerlukan penanganan paling mendesak.

METODE PENELITIAN

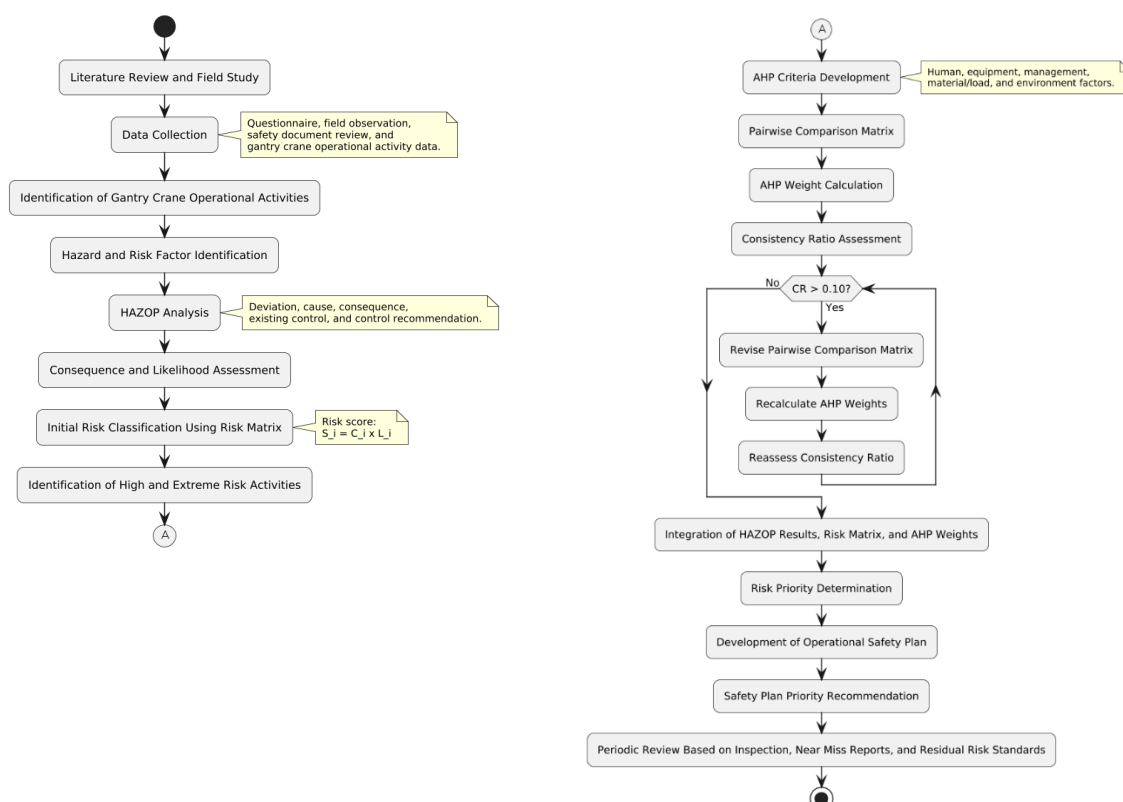
Penelitian ini menggunakan desain studi kasus dengan pendekatan campuran untuk menyusun *safety plan* berbasis prioritas risiko pada aktivitas *lifting* menggunakan *gantry crane*. Tahap kualitatif digunakan untuk memahami konteks operasi, memetakan tahapan kerja, dan mengidentifikasi deviasi, penyebab, konsekuensi, pengendalian, serta rekomendasi melalui *Hazard and Operability Study (HAZOP)*. Tahap kuantitatif digunakan untuk mengklasifikasikan risiko awal dengan *risk matrix* dan menentukan bobot kepentingan menggunakan *Analytical Hierarchy Process (AHP)*. Kombinasi ini dipilih karena risiko *hoisting* terbentuk melalui interaksi faktor manusia, peralatan, manajemen, material atau beban, dan lingkungan, sehingga analisis satu dimensi belum memadai untuk menjelaskan prioritas pengendalian [1], [2]. Integrasi *HAZOP*, *risk matrix*, dan *AHP* juga memungkinkan hasil identifikasi kualitatif diterjemahkan menjadi pemeringkatan yang terukur dan dapat ditelusuri [5], [9].

Penelitian dilakukan pada 5 industri alat berat yang menggunakan *gantry crane* dalam aktivitas pemindahan material atau komponen berat di kota Balikpapan. Periode pengumpulan data bulan agustus-desember 2020. Ruang lingkup tersebut ditetapkan karena risiko *hoisting* dapat terbentuk sebelum, selama, dan setelah proses pengangkatan. Aktivitas yang terlihat administratif, seperti pemeriksaan buku petunjuk, verifikasi tabel daftar beban, dan pengecekan *sticker hand signal*, tetap dianalisis karena kesalahan informasi dapat memengaruhi keputusan pengangkatan. Risiko *lifting* juga

bersifat multifaset karena melibatkan hubungan antara *human, equipment, management, material*, dan *environment* [1], [2].

Data penelitian diperoleh melalui empat sumber utama, yaitu kuesioner, observasi lapangan, telaah dokumen keselamatan kerja, dan identifikasi aktivitas operasional. Kuesioner digunakan untuk memperoleh informasi mengenai pengalaman responden, pemahaman terhadap alat, efektivitas penggunaan *gantry crane*, pelaksanaan pengingat K3, penggunaan *APD*, pelaksanaan inspeksi, dan kebutuhan *safety plan*. Observasi lapangan digunakan untuk memahami urutan aktivitas, kondisi area kerja, penggunaan alat bantu, bahaya utama, dan praktik pengendalian yang diterapkan. Telaah dokumen dilakukan terhadap prosedur operasi, instruksi kerja, *checklist* inspeksi, catatan pemeliharaan, dokumen penggunaan alat, dan dokumen keselamatan lain yang relevan. Penggunaan beberapa sumber data ini mendukung triangulasi antara pengalaman pekerja, kondisi aktual, dan praktik keselamatan terdokumentasi [2], [10].

Instrumen penelitian terdiri atas lembar kuesioner, *checklist* observasi, lembar kerja HAZOP, lembar penilaian *consequence-likelihood*, *risk matrix*, dan matriks perbandingan berpasangan *AHP*. Lembar kuesioner digunakan untuk merekam data responden dan implementasi keselamatan. *Checklist* observasi digunakan untuk mencatat aktivitas, kondisi area kerja, sumber bahaya, dan pengendalian yang tersedia. Lembar kerja HAZOP digunakan untuk menelusuri deviasi, penyebab, konsekuensi, *existing control*, dan rekomendasi pengendalian. *Risk matrix* digunakan untuk menentukan level risiko awal, sedangkan matriks *AHP* digunakan untuk menghitung bobot faktor risiko dan *consistency ratio*.



Gambar 1. Alur penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data kuesioner penggunaan *gantry crane*

Kuesioner diisi oleh lima responden yang memiliki pengalaman sebagai mekanik atau *trainee* pada lingkungan industri yang menggunakan *gantry crane*. Seluruh responden menyatakan bahwa *gantry crane* efektif untuk mendukung pekerjaan, terutama ketika material atau komponen tidak dapat dipindahkan secara aman dengan tenaga manusia. Jawaban terbuka menunjukkan pola yang relatif seragam, yaitu alat membantu proses pengangkatan komponen berat, mempercepat mobilisasi material, dan mengurangi beban kerja manual. Temuan ini menunjukkan bahwa *gantry crane* bukan sekadar alat bantu, tetapi bagian dari sistem operasional yang menentukan kelancaran pekerjaan. Tingkat familiaritas responden terhadap *gantry crane* tergolong memadai. Sebanyak 80% responden menyatakan cukup memahami alat tersebut, sedangkan 20% menyatakan sangat memahami. Sebanyak 80% responden memiliki pengalaman pengoperasian selama 0-1 tahun dan 20% memiliki pengalaman 1-3 tahun. Walaupun seluruh responden menilai *safety plan* diperlukan, masih terdapat kesenjangan implementasi. Sebanyak 20% responden menyatakan bahwa pengingat K3 belum selalu dilakukan sebelum pekerjaan dimulai, 20% belum konsisten menggunakan APD, dan 20% belum sepenuhnya memastikan inspeksi pra-operasi telah dilakukan dengan benar. Kondisi ini memperlihatkan bahwa penerimaan terhadap prinsip keselamatan belum selalu diikuti oleh kepatuhan operasional yang stabil. [10] menempatkan manajemen risiko keselamatan sebagai proses sistemik dan proaktif sehingga ketidakconsistenan kecil tetap perlu diperhatikan.

Tabel 1. Ringkasan hasil kuesioner penggunaan *gantry crane*

Indikator	Kategori jawaban	Jumlah responden	Persentase
Pengetahuan tentang <i>gantry crane</i>	Sangat memahami	1	20%
Pengetahuan tentang <i>gantry crane</i>	Cukup memahami	4	80%
Pengalaman mengoperasikan <i>gantry crane</i>	0-1 tahun	4	80%
Pengalaman mengoperasikan <i>gantry crane</i>	1-3 tahun	1	20%
Efektivitas penggunaan alat	Efektif	5	100%
Pengingat K3 sebelum operasi	Dilaksanakan	4	80%
Pengingat K3 sebelum operasi	Belum selalu dilaksanakan	1	20%
Penggunaan APD sebelum operasi	Dilaksanakan	4	80%
Penggunaan APD sebelum operasi	Belum konsisten	1	20%
Inspeksi sebelum operasi	Dilaksanakan	4	80%
Inspeksi sebelum operasi	Belum dapat dipastikan	1	20%
Tingkat kepentingan <i>safety plan</i>	Sangat penting	5	100%
Kebutuhan terhadap <i>safety plan</i>	Diperlukan	5	100%
Efektivitas <i>safety plan</i>	Sangat efektif	3	60%
Efektivitas <i>safety plan</i>	Efektif	2	40%

Klasifikasi konsekuensi

Tingkat konsekuensi ditentukan berdasarkan dampak potensial pada setiap aktivitas. Pemeriksaan *bridge girder* atau *beam* berada pada tingkat *catastrophic* karena kegagalan struktur utama dapat memicu keruntuhan komponen dan menimbulkan konsekuensi serius. Aktivitas inspeksi komponen lain seperti *mast*, *pipe support mast*, sambungan pengelasan, *flange*, baut, *drive wheel*, *chain block*, *shackle*, *webbing*, dan *eyebolt* berada pada tingkat major. Pola ini sejalan dengan Junjia et al [1], yang menjelaskan bahwa risiko *hoisting* bersifat multifaset dan melibatkan faktor manusia, peralatan, manajemen, material, serta lingkungan.

Tabel 2. Klasifikasi *consequence* aktivitas pengoperasian *gantry crane*

Level	Kategori	Aktivitas
1	Insignificant	Memindahkan barang yang tidak diperlukan di sekitar unit; memastikan unit bersih dari kotoran.
2	Minor	Membersihkan <i>gantry crane</i> setelah digunakan; membersihkan area kerja setelah digunakan.
3	Moderate	Mengecek buku petunjuk pengoperasian; melepas papan informasi dan barikade setelah pekerjaan selesai.
4	Major	Memastikan unit berada pada tempat aman; memasang papan informasi dan barikade;

Level	Kategori	Aktivitas
5	Catastrophic	menyiapkan tangga dan <i>safety body harness</i> ; memeriksa <i>mast</i> , <i>pipe support mast</i> , sambungan pengelasan, <i>flange</i> , baut, <i>drive wheel</i> , <i>chain block</i> , <i>shackle</i> , <i>marking SWL</i> , <i>main plate certification</i> , <i>color code inspection</i> , wama unit sesuai standar PTP, pelumasan <i>chain block</i> , pelumasan <i>thread shackle</i> , <i>safety latch</i> , <i>webbing</i> , <i>eyebolt</i> , tabel daftar beban, <i>sticker hand signal</i> , serta pengembalian peralatan. Memeriksa kondisi <i>bridge girder</i> atau <i>beam</i> terhadap deformasi, retakan, dan korosi.

Klasifikasi *likelihood*

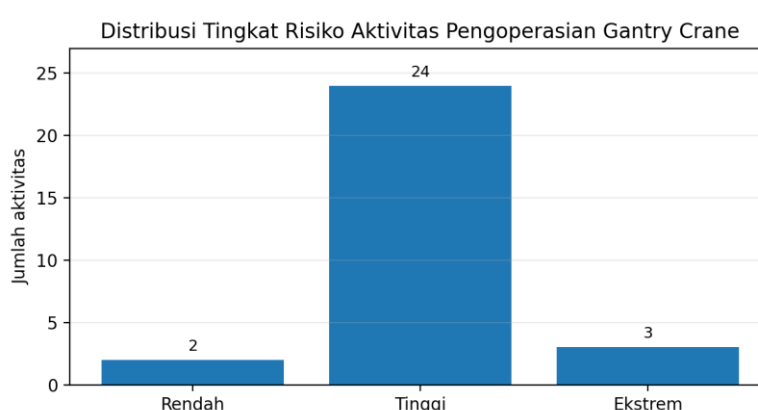
Peluang kejadian dinilai berdasarkan pengalaman responden dan karakteristik aktivitas. Terminologi kategori diselaraskan tanpa mengubah skor pada data sumber. Level A menunjukkan *almost certain*, level B menunjukkan *likely*, level C menunjukkan *possible*, level D menunjukkan *unlikely*, dan level E menunjukkan *rare*. Sebagian besar aktivitas inspeksi berada pada kategori *unlikely*, sedangkan beberapa aktivitas administratif dan penataan area berada pada kategori *possible*.

Tabel 3. Klasifikasi *likelihood* aktivitas pengoperasian *gantry crane*

Level	Kategori	Deskripsi	Aktivitas utama
A	Almost certain	Hampir pasti terjadi	Tidak terdapat aktivitas yang diklasifikasikan pada kategori ini.
B	Likely	Kemungkinan besar terjadi	Tidak terdapat aktivitas yang diklasifikasikan pada kategori ini.
C	Possible	Mungkin terjadi	Memindahkan barang yang tidak diperlukan; mengecek buku petunjuk; memeriksa tabel daftar beban dan <i>sticker hand signal</i> ; mengembalikan peralatan; melepas papan informasi dan barikade.
D	Unlikely	Kemungkinan kecil terjadi	Penataan area aman; pemasangan barikade; pembersihan unit; penyiapan tangga dan harness; pemeriksaan struktur, sambungan, <i>rigging</i> , sertifikasi, pelumasan, dan pembersihan pasca-operasi.
E	Rare	Jarang terjadi	Tidak terdapat aktivitas yang diklasifikasikan pada kategori ini.

Hasil *risk matrix*

Hasil *risk matrix* menunjukkan bahwa 29 aktivitas pengoperasian *gantry crane* menghasilkan tiga kategori risiko. Sebanyak 24 aktivitas atau 82,76% berada pada kategori *high*, tiga aktivitas atau 10,34% berada pada kategori *extreme*, dan dua aktivitas atau 6,90% berada pada kategori *low*. Tidak terdapat aktivitas pada kategori *medium*. Distribusi ini menunjukkan bahwa sebagian besar tahapan pengoperasian membutuhkan pengendalian yang terstruktur. Risiko *extreme* ditemukan pada pemeriksaan *bridge girder* atau *beam*, pemeriksaan tabel daftar beban dan *sticker hand signal*, serta pengembalian peralatan setelah digunakan.



Gambar 2. Distribusi tingkat risiko aktivitas pengoperasian *gantry crane*.

Tabel 4. Hasil *risk matrix* aktivitas pengoperasian *gantry crane*

No.	Aktivitas	C	L	S	Level
1	Memastikan unit berada pada tempat aman	4	2	8	H
2	Memindahkan barang yang tidak diperlukan di sekitar unit	1	3	3	L
3	Memasang papan informasi dan barikade area kerja	4	2	8	H
4	Memastikan unit bersih dari kotoran	1	4	4	L

No.	Aktivitas	C	L	S	Level
5	Menyiapkan tangga dan <i>safety body harness</i>	4	2	8	H
6	Memeriksa kondisi <i>bridge girder</i> atau <i>beam</i>	5	2	10	E
7	Memeriksa kondisi <i>mast</i>	4	2	8	H
8	Memeriksa kondisi <i>pipe support mast</i>	4	2	8	H
9	Memeriksa sambungan pengelasan	4	2	8	H
10	Memeriksa kondisi <i>flange</i>	4	2	8	H
11	Memeriksa kondisi seluruh baut	4	2	8	H
12	Memeriksa kondisi <i>drive wheel</i>	4	2	8	H
13	Memeriksa fungsi dan deformasi <i>chain block</i>	4	2	8	H
14	Memeriksa kondisi <i>shackle</i>	4	2	8	H
15	Memeriksa kejelasan <i>marking SWL</i>	4	2	8	H
16	Memeriksa validitas <i>main plate certification</i>	4	2	8	H
17	Memastikan <i>color code inspection</i> sesuai periode	4	2	8	H
18	Memastikan warna unit sesuai standar PTP	4	2	8	H
19	Melakukan pelumasan pada <i>chain block</i>	4	2	8	H
20	Melakukan pelumasan pada <i>thread shackle</i>	4	2	8	H
21	Memeriksa <i>safety latch</i>	4	2	8	H
22	Memeriksa <i>webbing</i> yang akan digunakan	4	2	8	H
23	Memeriksa <i>eyebolt</i> yang akan digunakan	4	2	8	H
24	Memeriksa tabel daftar beban dan <i>sticker hand signal</i>	4	3	12	E
25	Mengecek buku petunjuk pengoperasian	3	3	9	H
26	Mengembalikan peralatan yang telah digunakan	4	3	12	E
27	Membersihkan <i>gantry crane</i> setelah digunakan	4	2	8	H
28	Membersihkan area kerja setelah digunakan	4	2	8	H
29	Melepas papan informasi dan barikade	3	3	9	H

Nilai risiko tinggi tidak hanya muncul pada aktivitas pengangkatan secara langsung, tetapi juga pada inspeksi dan penataan peralatan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa keselamatan *lifting* tidak dapat dibatasi pada satu tahapan operasi. Junjia et al [2] menjelaskan bahwa faktor risiko *hoisting* saling berhubungan melalui jalur penyebab yang kompleks. Eum et al [11] menerangkan bahwa penilaian risiko secara konvensional dapat menghasilkan ketidakselarasan apabila keterkaitan fungsional dan kekritisitas operasional tidak diperhitungkan. Dengan demikian, hasil *risk matrix* perlu dipahami sebagai dasar prioritas awal, bukan akhir dari proses pengambilan keputusan.

Matriks perbandingan berpasangan dan uji konsistensi AHP

AHP digunakan untuk memperkuat hasil *risk matrix* dengan cara membandingkan tingkat kepentingan antar kriteria risiko. Struktur matriks disusun berdasarkan lima perspektif utama, yaitu manusia, peralatan, manajemen, material atau beban, dan lingkungan. Kelima perspektif tersebut sejalan dengan kerangka *human, equipment, management, material, environment* yang digunakan oleh Junjia et al [1] untuk memetakan faktor risiko *hoisting*. Matriks memenuhi prinsip resiprokal AHP, yaitu $a_{ij} = 1/a_{ji}$. Struktur perbandingan berpasangan ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Matriks perbandingan berpasangan AHP untuk kriteria utama risiko *lifting gantry crane*

Kriteria	C1 Manusia	C2 Peralatan	C3 Manajemen	C4 Material/Beban	C5 Lingkungan
C1 Manusia	1	2	3	4	5
C2 Peralatan	$\frac{1}{2}$	1	2	3	4
C3 Manajemen	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	2	3
C4 Material/Beban	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	2
C5 Lingkungan	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1

Konsistensi matriks diuji menggunakan nilai *eigen* maksimum, *consistency index*, dan *consistency ratio*. Hubungan matematis yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (1)$$

$$CR = CI / RI \quad (2)$$

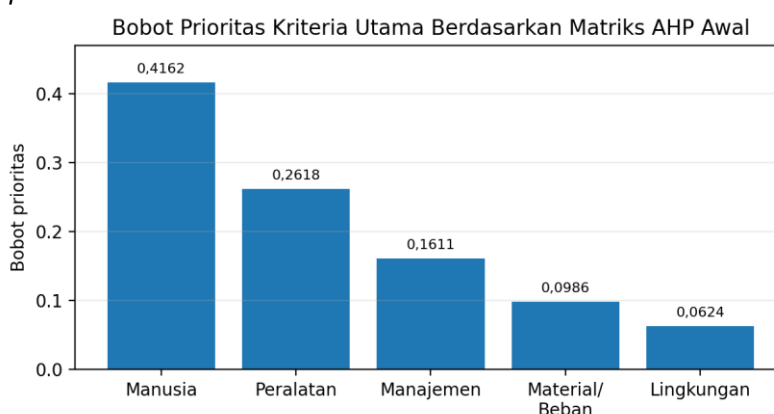
Untuk lima kriteria, nilai *random index* yang digunakan adalah $RI = 1,12$. Hasil pengujian menunjukkan $\lambda_{\max} = 5,0683$, $CI = 0,0171$, dan $CR = 0,0153$. Karena $CR \leq 0,10$, matriks awal dinyatakan konsisten secara matematis. Nilai ini menunjukkan bahwa struktur perbandingan berpasangan dapat digunakan sebagai dasar pembobotan awal dalam pengembangan prioritas *safety plan*.

Tabel 6. Hasil uji konsistensi matriks *AHP* awal

Parameter	Nilai
Jumlah kriteria (n)	5
$\lambda_{\max}$	5,0683
Consistency Index (CI)	0,0171
Random Index (RI)	1,1200
Consistency Ratio (CR)	0,0153
Status	Konsisten; CR $\leq$ 0,10

Hasil pembobotan *AHP* dan implikasi prioritas

Hasil normalisasi matriks menunjukkan bahwa faktor manusia memperoleh bobot prioritas tertinggi sebesar 0,4162 atau 41,62%. Faktor peralatan berada pada urutan kedua dengan bobot 0,2618 atau 26,18%, diikuti faktor manajemen sebesar 0,1611 atau 16,11%, faktor material atau beban sebesar 0,0986 atau 9,86%, dan faktor lingkungan sebesar 0,0624 atau 6,24%. Pola ini memperlihatkan bahwa pengendalian keselamatan tidak cukup difokuskan pada kelayakan fisik peralatan. Kompetensi, komunikasi, kepatuhan terhadap prosedur, dan ketelitian operator perlu ditempatkan sebagai bagian utama dari *safety plan*.

**Gambar 3.** Bobot prioritas kriteria utama berdasarkan matriks *AHP* awal**Tabel 7.** Bobot prioritas kriteria utama berdasarkan matriks *AHP* awal

Peringkat	Kriteria	Bobot prioritas	Persentase
1	C1 Faktor manusia	0,4162	41,62%
2	C2 Faktor peralatan	0,2618	26,18%
3	C3 Faktor manajemen	0,1611	16,11%
4	C4 Faktor material atau beban	0,0986	9,86%
5	C5 Faktor lingkungan	0,0624	6,24%
Total		1,0000	100,00%

Perancangan *Safety Plan*

Safety plan dirancang berdasarkan hubungan antara aktivitas, bahaya utama, *consequence*, *likelihood*, level risiko, tindakan pengendalian, dan penanggung jawab. Struktur tersebut mengubah hasil *risk matrix* menjadi dokumen operasional yang dapat digunakan oleh supervisor selama persiapan, inspeksi, pengoperasian, dan kegiatan pasca-operasi. Pengendalian yang paling sering diperlukan mencakup penggunaan *APD*, pembersihan area dari minyak dan oli, pengendalian posisi personel, inspeksi kondisi fisik komponen, verifikasi kapasitas beban, dan pengamanan akses terhadap bagian bergerak. Kesamaan tindakan pada beberapa aktivitas bukan pengulangan administratif, tetapi menunjukkan adanya kelompok penyebab dominan yang memengaruhi beberapa risiko sekaligus. Kondisi ini sesuai dengan karakter risiko *hoisting* yang multifaset dan saling terkait [1], [2].

Ringkasan fokus pengendalian menunjukkan bahwa pemeriksaan *bridge girder* atau *beam* memperoleh urgensi tertinggi karena berkaitan dengan kegagalan struktural dan berada pada kategori *extreme*. Pemeriksaan tabel daftar beban dan *sticker hand signal* juga menjadi prioritas karena

kesalahan informasi dapat memengaruhi keputusan pengangkatan. Pengembalian peralatan setelah operasi perlu diperlakukan sebagai aktivitas kritis karena melibatkan risiko tertimpa, terjepit, dan terpeleket. Di luar ketiga aktivitas tersebut, keseluruhan pengendalian perlu diarahkan pada disiplin prosedur, komunikasi kerja, inspeksi komponen, dan pengawasan supervisor.

Tabel 8. Ringkasan fokus pengendalian *safety plan* berdasarkan *risk matrix* dan pembobotan AHP awal

Fokus pengendalian	Dasar temuan	Prioritas tindakan	Penanggung jawab
Pemeriksaan <i>bridge girder</i> atau <i>beam</i>	Kategori <i>extreme</i> ; konsekuensi <i>catastrophic</i>	Inspeksi deformasi, retakan, dan korosi; verifikasi kapasitas maksimum; penggunaan <i>safety body harness</i> saat inspeksi	Supervisor dan personel pemeliharaan
Pemeriksaan tabel daftar beban dan <i>sticker hand signal</i>	Kategori <i>extreme</i> ; informasi operasional kritis	Pastikan informasi terlihat jelas, valid, dan dipahami operator serta signalman sebelum <i>lifting</i>	Supervisor
Pengembalian peralatan setelah operasi	Kategori <i>extreme</i> ; risiko tertimpa, terjepit, dan terpeleket	Gunakan <i>APD</i> , <i>trolley</i> bila diperlukan, dan prosedur pemindahan barang yang benar	Supervisor
Faktor manusia	Bobot AHP tertinggi sebesar 0,4162	Perkuat kompetensi, briefing K3, komunikasi, kepatuhan prosedur, dan pengawasan	Supervisor dan manajemen K3
Faktor peralatan	Bobot AHP kedua sebesar 0,2618	Laksanakan inspeksi terjadwal pada struktur, <i>rigging</i> , <i>chain block</i> , <i>drive wheel</i> , <i>shackle</i> , <i>webbing</i> , dan <i>eyebolt</i>	Supervisor dan personel pemeliharaan

Penerapan *safety plan* perlu disertai pembaruan berkala berdasarkan hasil inspeksi, laporan *near miss*, dan perubahan kondisi lapangan. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa dokumen keselamatan tidak cukup disusun sebagai daftar prosedur. *Safety plan* perlu berfungsi sebagai instrumen pengambilan keputusan yang menghubungkan risiko, tindakan pengendalian, dan tanggung jawab operasional secara jelas. Pendekatan tersebut konsisten dengan Da Rosa et al [10], yang menempatkan manajemen risiko sebagai proses sistemik, serta pengembangan integrasi HAZOP-AHP oleh Marhavilas et al [8] dan Li et al [5].

KESIMPULAN

Temuan penelitian menunjukkan bahwa risiko pada aktivitas *lifting* menggunakan *gantry crane* tidak hanya muncul ketika beban diangkat, tetapi juga terbentuk selama inspeksi, penataan area, pemeliharaan, dan kegiatan pasca-operasi. Dari 29 aktivitas yang dianalisis, 24 aktivitas berada pada kategori risiko tinggi, tiga aktivitas berada pada kategori *ekstrem*, dan dua aktivitas berada pada kategori rendah. Pemeriksaan *bridge girder* atau *beam*, verifikasi tabel daftar beban dan *sticker hand signal*, serta pengembalian peralatan setelah digunakan merupakan aktivitas yang memerlukan perhatian paling mendesak. Integrasi *Hazard and Operability Study*, *risk matrix*, dan *Analytical Hierarchy Process* memperkuat penyusunan *safety plan* karena menghubungkan identifikasi bahaya dengan prioritas faktor risiko. Matriks awal menunjukkan konsistensi matematis dengan *consistency ratio* sebesar 0,0153 dan menempatkan faktor manusia sebagai faktor dominan dengan bobot 0,4162. Hasil ini menegaskan bahwa pengendalian teknis perlu dilengkapi dengan peningkatan kompetensi operator, komunikasi kerja, kepatuhan terhadap prosedur, inspeksi terdokumentasi, dan pengawasan lapangan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melibatkan jumlah responden yang lebih besar dan mencakup operator, *rigger*, *signalman*, mekanik, supervisor, serta personel K3 agar bobot perbandingan berpasangan lebih representatif terhadap kondisi operasional. Penelitian berikutnya juga perlu mengukur *residual risk* setelah tindakan pengendalian diterapkan sehingga efektivitas *safety plan* dapat dinilai secara lebih objektif. Selain itu, penggunaan *Fuzzy AHP* dapat dipertimbangkan untuk mengelola ketidakpastian linguistik dalam penilaian ahli, khususnya ketika perbedaan persepsi antar responden cukup besar. Model lanjutan juga dapat mengintegrasikan *Bayesian Network*, *machine learning*, simulasi komputer, *wearable sensors*, atau *digital twin* untuk memperbarui penilaian risiko secara dinamis sesuai perubahan kondisi lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Junjia, A. H. Alias, N. A. Haron, and N. Abu Bakar, "A Bibliometrics-Based Systematic Review of *Safety* Risk Assessment for IBS Hoisting Construction," *Buildings*, vol. 13, no. 7, 2023, doi: 10.3390/buildings13071853.
- [2] Y. Junjia, A. H. Alias, N. A. Haron, and N. Abu Bakar, "Identification and analysis of hoisting *safety* risk factors for IBS construction based on the AcciMap and cases study," *Heliyon*, vol. 10, no. 1, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e23587.
- [3] H. Mandal, E. Keighobadi, H. Ebrahimi, S. M. Hanifi, S. M. Ayat, and M. Ghashghaei, "Machine learning and bayesian network based on fuzzy AHP framework for risk assessment in process units," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-25690-1.
- [4] P. K. Marhavilas, M. Filippidis, G. K. Koulinas, and D. E. Koulouriotis, "An expanded HAZOP-study with fuzzy-AHP (XPA-HAZOP technique): Application in a sour crude-oil processing plant," *Saf. Sci.*, vol. 124, 2020, doi: 10.1016/j.ssci.2019.104590.
- [5] D. Li, Q. Cao, J. Wang, and X. Mi, "Application of integrated method of hAZOP-ahp and fuzzy comprehensive evaluation in coal mine gas explosion accident," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021. doi: 10.1088/1755-1315/692/4/042103.
- [6] M. Cheraghi, A. Eslami Baladeh, and N. Khakzad, "A fuzzy multi-attribute HAZOP technique (FMA-HAZOP): Application to gas wellhead facilities," *Saf. Sci.*, vol. 114, pp. 12–22, 2019, doi: 10.1016/j.ssci.2018.12.024.
- [7] A. Banu, S. M. Hoseyni, and J. Cordiner, "Multi-Criteria Decision-Making Methodologies Applied to Hazard and Operability Studies in *High-Hazard Industries*," *Qual. Reliab. Eng. Int.*, vol. 42, no. 2, pp. 774–792, 2026, doi: 10.1002/qre.70108.
- [8] P. K. Marhavilas, M. Filippidis, G. K. Koulinas, and D. E. Koulouriotis, "A HAZOP with MCDM based risk-assessment approach: Focusing on the deviations with economic/health/environmental impacts in a process industry," *Sustain.*, vol. 12, no. 3, 2020, doi: 10.3390/su12030993.
- [9] P. K. Marhavilas, M. Filippidis, G. K. Koulinas, and D. E. Koulouriotis, "The integration of HAZOP study with risk-matrix and the analytical-hierarchy process for identifying critical control-points and prioritizing risks in industry – A case study," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 62, 2019, doi: 10.1016/j.jlp.2019.103981.
- [10] A. C. F. Da Rosa, G. C. Lapasini Leal, E. V. C. Galdamez, and R. C. T. De Souza, "Risk management in occupational *safety*: A systematic mapping," *Work*, vol. 70, no. 1, pp. 147–166, 2021, doi: 10.3233/WOR-213561.
- [11] T. Eum, E. Shin, D. S. Rhee, and C. G. Song, "Integrated Hydro-Operational Risk Assessment (IHORA) for Sewage Treatment Facilities," *Appl. Sci.*, vol. 16, no. 2, 2026, doi: 10.3390/app16020864.