JGIT
Jurnal Greenation Ilmu Teknik
+62 81210467572 https://greenationpublisher.org/JGIT greenation.info@gmail.com
GREENATION PUBLISHER

DOI: https://doi.org/10.38035/jgit.v4i1.850
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Analisis Risiko Keselamatan Operasional Mesin Industri Berbasis *Hazard Identification and Risk Assessment* (HIRA) dalam Perspektif Rekayasa Teknik dan Regulasi Keselamatan Kerja

Gevan Naufal Wala[1], Ahmad Fachri[2]
[1]Universitas Jambi, Jambi, Indonesia, gevannaufall@gmail.com
[2]Universitas Andalas, Padang, Indonesia, fachrijambi90@gmail.com

Corresponding Author: gevannaufall@gmail.com[1]

Abstract: *Published hazard identification and risk assessment studies on industrial machinery usually stop at risk ranking and generic control advice, while legal studies on occupational safety seldom use quantified technical risk, so the link between residual machine risk and specific legal duties remains unexamined. This study aims to identify machine hazards, classify their risk, set control priorities, evaluate controls against engineering safety principles, and relate the results to Indonesian occupational safety regulations. A descriptive analytical design was applied to secondary data from four published hazard identification and risk assessment studies covering lathes, milling machines, grinders, welding, cutting machines, and presses. Of 92 assessed hazard rows, 71 originated from machines and were re-analysed on a uniform five by five likelihood and severity matrix with the hierarchy of controls and a statutory approach. Mechanical hazards made up 52.1% of the rows, and 31 rows (43.7%) were rated high or extreme. Under the uniform matrix, 20 rows (28.2%) changed category. Among the 31 priority rows, 20 controls (64.5%) relied on administrative measures or personal protective equipment, and none used elimination or substitution. The novelty is a risk and compliance alignment matrix showing that formal compliance can coexist with high residual machine risk.*

Keyword: *Hazard Identification and Risk Assessment, Machine Safety, Hierarchy of Controls, Occupational Safety Regulation, Secondary Data.*

Abstrak: Studi identifikasi bahaya dan penilaian risiko mesin industri yang telah terbit umumnya berhenti pada pemeringkatan risiko dan saran pengendalian yang umum, sedangkan kajian hukum keselamatan kerja jarang memakai risiko teknis yang terukur, sehingga hubungan antara risiko sisa mesin dan kewajiban hukum yang spesifik belum dianalisis. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi bahaya mesin, mengklasifikasikan risikonya, menetapkan prioritas pengendalian, mengevaluasi pengendalian terhadap prinsip keselamatan teknik, serta mengaitkan hasilnya dengan regulasi keselamatan kerja di Indonesia. Desain deskriptif analitis diterapkan pada data sekunder dari empat studi identifikasi bahaya dan penilaian risiko terbitan yang mencakup mesin bubut, milling, gerinda, las, mesin potong, dan mesin press. Dari 92 baris bahaya, 71 baris yang bersumber dari mesin dianalisis ulang pada matriks kemungkinan dan keparahan lima kali lima yang seragam, dipadukan dengan hierarki pengendalian dan pendekatan perundang-undangan. Bahaya mekanis mencakup 52,1% baris,

dan 31 baris (43,7%) berada pada tingkat tinggi atau ekstrem. Dengan matriks seragam, 20 baris (28,2%) berubah kategori dibandingkan studi sumber. Dari 31 baris prioritas, 20 pengendalian (64,5%) bertumpu pada langkah administratif atau alat pelindung diri, dan tidak satu pun menggunakan eliminasi atau substitusi. Kebaruan penelitian terletak pada matriks keselarasan risiko dan kepatuhan yang menunjukkan bahwa kepatuhan formal dapat berdampingan dengan risiko sisa mesin yang tinggi.

Kata Kunci: *Hazard Identification and Risk Assessment*, Keselamatan Mesin, Hierarki Pengendalian, Regulasi Keselamatan Kerja, Data Sekunder.

PENDAHULUAN

Mesin produksi merupakan inti dari hampir seluruh proses manufaktur, tetapi mesin yang sama menyimpan energi mekanis, listrik, hidrolik, dan pneumatik yang dapat mencederai pekerja dalam hitungan detik apabila sistem pengamannya tidak berfungsi. Profil K3 Nasional mencatat bahwa kasus kecelakaan kerja peserta BPJS Ketenagakerjaan meningkat dari 210.789 kasus pada tahun 2019 menjadi 221.740 kasus pada tahun 2020 dan 234.370 kasus pada tahun 2021, dengan 6.552 pekerja meninggal dunia pada tahun 2021 (Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia, 2022). Angka tersebut tidak dipilah menurut jenis mesin, tetapi menunjukkan bahwa pengendalian bahaya di tempat kerja industri belum efektif.

Kecelakaan yang melibatkan mesin memiliki pola yang relatif konsisten. Tinjauan sistematis Duarte et al. (2021) menemukan bahwa ban berjalan, truk angkut, dan *dumper* merupakan peralatan paling berisiko, terutama saat perawatan, dengan penyebab dominan berupa kesalahan manusia, prosedur perawatan yang tidak memadai, dan kelemahan desain. Park et al. (2026) menelaah faktor yang membuat kecelakaan mesin industri di sektor manufaktur terjadi berulang, sedangkan Albert et al. (2025) menemukan bahwa keterlibatan peralatan penarik dan pengangkat berhubungan sangat signifikan dengan keparahan cedera, termasuk patah tulang dan amputasi.

Hazard Identification and Risk Assessment (HIRA) mengidentifikasi sumber bahaya pada setiap aktivitas, lalu memperkirakan risiko sebagai fungsi dari kemungkinan kejadian dan keparahan akibat. Logika yang sama tertuang dalam ISO 12100, yang mengatur penentuan batas mesin, identifikasi bahaya, estimasi, evaluasi, dan reduksi risiko secara berulang (International Organization for Standardization, 2010). Matriks risiko lima kali lima yang lazim dipakai pada HIRA juga dikenal sebagai teknik penilaian risiko dalam IEC 31010 (International Electrotechnical Commission, 2019).

Hasil penilaian risiko baru bermakna apabila diikuti pengendalian yang tepat. *Hierarchy of controls* menempatkan eliminasi dan substitusi pada tingkat tertinggi, disusul pengendalian rekayasa teknik, pengendalian administratif, dan alat pelindung diri (APD) sebagai pilihan terakhir, sebagaimana diadopsi dalam ISO 45001 (International Organization for Standardization, 2018). Pada mesin, *engineering control* diwujudkan melalui pelindung tetap, pelindung berinterlok, perangkat pendeteksi kehadiran, kendali dua tangan, dan isolasi energi.

Di Indonesia, kewajiban pengendalian bahaya mesin berakar pada Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja, yang dalam Pasal 3 ayat (1) dan Pasal 4 ayat (1) mewajibkan syarat keselamatan untuk mencegah kecelakaan sejak perencanaan hingga pemeliharaan aparat produksi (Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970). Undang-Undang Nomor 13 Tahun 2003 menjamin hak pekerja atas K3 dalam Pasal 86 dan mewajibkan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) dalam Pasal 87 (Undang-Undang Nomor 13 Tahun 2003), sebagaimana telah diubah melalui Undang-Undang Nomor 6 Tahun 2023 (Undang-Undang Nomor 6 Tahun 2023). Peraturan Pemerintah Nomor 50 Tahun 2012 menjabarkan kewajiban identifikasi potensi bahaya, penilaian, dan pengendalian risiko

(Peraturan Pemerintah Nomor 50 Tahun 2012). Secara khusus, Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 38 Tahun 2016 mengatur syarat K3 pesawat tenaga dan produksi, termasuk mesin perkakas dan produksi (Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 38 Tahun 2016), sedangkan tata cara pengawasannya kini diatur dalam Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 11 Tahun 2026.

Persoalannya, kepatuhan terhadap regulasi tidak otomatis berarti risiko mesin telah turun ke tingkat yang dapat diterima. Banyak kewajiban dirumuskan secara prosedural, misalnya menyediakan APD, memeriksa dan menguji peralatan, atau menunjuk personel bersertifikat, sehingga perusahaan dapat memenuhi daftar periksa kepatuhan tanpa memasang pengaman teknis yang memadai. Albert et al. (2025) memperlihatkan bahwa regulasi keselamatan peralatan dek kapal ikan belum efektif mencegah kecelakaan terbelit, terutama pada kapal yang dikecualikan dari persyaratan.

Penelitian HIRA di Indonesia sudah cukup banyak. Herlina et al. (2022) memadukan HIRA dan *Job Safety Analysis* pada industri fabrikasi, Hendro dan Apsari (2023) mengombinasikan FMEA dan HIRA, Harianto dan Wahyuni (2023) menerapkan HIRARC pada area mesin *roll forming*, dan Hamdani dan Andesta (2024) menemukan bahaya berkategori ekstrem pada proses pengelasan, gerinda, dan pemotongan. Budiman et al. (2025) menindaklanjuti risiko ekstrem hasil HIRA melalui mitigasi berbasis pengelolaan pengetahuan, dan Hollá et al. (2024) memvalidasi prosedur penilaian risiko pada posisi kerja *machinist*. Dari sisi hukum, Putri et al. (2024) serta Irfani dan Hamzah (2021) mengkaji perlindungan hukum K3 bagi pekerja, sementara Vu et al. (2023) menemukan bahwa peraturan dan instruksi keselamatan merupakan faktor terpenting dalam implementasi K3 pada industri manufaktur skala kecil dan menengah.

Penelusuran tersebut menunjukkan tiga celah. Pertama, studi HIRA di Indonesia umumnya berakhir pada kategori risiko dan rekomendasi umum seperti pelatihan dan APD, tanpa menguji kesesuaiannya dengan *hierarchy of controls* dan prinsip reduksi risiko ISO 12100. Kedua, kajian hukum K3 menilai perlindungan pekerja dari sisi norma dan kelembagaan, tetapi tidak menggunakan tingkat risiko teknis untuk menentukan kewajiban yang paling mendesak. Ketiga, studi yang mengaitkan penilaian risiko mesin dengan regulasi, seperti Yazdi dan Adumene (2025) serta Albert et al. (2025), berlatar hukum Australia dan Prancis, sehingga belum menjawab bagaimana hasil HIRA dipetakan ke kewajiban dalam hukum K3 Indonesia.

State of the art penelitian ini dibangun dari tiga arus literatur, yaitu HIRA dan HIRARC pada tingkat aktivitas (Hamdani & Andesta, 2024; Herlina et al., 2022), rekayasa keselamatan mesin termasuk bahaya baru pada mesin kolaboratif dan mesin terhubung (Gualtieri et al., 2021; Lamy & Flaus, 2026), serta kajian kepatuhan dan perlindungan hukum K3 (Putri et al., 2024; Vu et al., 2023). Sepanjang penelusuran penulis, ketiga arus tersebut belum dipertemukan dalam satu prosedur analisis untuk mesin industri di Indonesia.

Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi HIRA, rekayasa keselamatan mesin, *hierarchy of controls*, dan analisis kepatuhan regulasi yang diterapkan pada analisis ulang data HIRA terbitan dan menghasilkan matriks keselarasan risiko dan kepatuhan. Kontribusi teknisnya berupa prosedur prioritas yang mengutamakan *engineering control*, sedangkan kontribusi regulatifnya berupa pemetaan tingkat risiko terhadap dasar hukum dan konsekuensi tanggung jawab, termasuk ketentuan pengawasan terbaru dan ketentuan kealpaan dalam Undang-Undang Nomor 1 Tahun 2023 tentang Kitab Undang-Undang Hukum Pidana.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengidentifikasi potensi bahaya pada operasional mesin industri.
2. Menganalisis tingkat risiko keselamatan operasional mesin menggunakan metode HIRA.
3. Mengklasifikasikan risiko berdasarkan tingkat kemungkinan dan konsekuensi.
4. Menentukan prioritas pengendalian risiko.

5. Menganalisis kesesuaian pengendalian risiko dengan prinsip keselamatan teknik.
6. Menganalisis keterkaitan hasil penilaian risiko dengan regulasi keselamatan kerja yang berlaku di Indonesia.
7. Merumuskan rekomendasi teknis dan regulatif untuk meningkatkan keselamatan operasional mesin industri.

METODE

Penelitian ini menggunakan desain deskriptif analitis berbasis data sekunder, yaitu analisis ulang terhadap tabel HIRA dan HIRARC yang telah dipublikasikan, dipadukan dengan analisis normatif terhadap regulasi keselamatan kerja. Penulis tidak melakukan observasi lapangan. Seluruh nilai kemungkinan (L) dan keparahan (S) berasal dari studi sumber, sedangkan kontribusi penelitian ini terletak pada harmonisasi klasifikasi, evaluasi pengendalian, dan pemetaan regulasi.

Studi sumber dipilih dengan empat kriteria, yaitu terbit di jurnal dengan DOI, menilai risiko pada proses yang melibatkan mesin industri, menyajikan nilai L dan S numerik untuk setiap bahaya, serta teks lengkapnya dapat diakses pada laman penerbit. Penelusuran melalui mesin pencari akademik dan portal jurnal menghasilkan empat studi yang memenuhi kriteria (Tabel 1). Mesin bor serta gerinda silinder dan permukaan tidak dianalisis karena tidak ditemukan tabel sumber yang memenuhi kriteria. Setiap baris ditranskripsi dari teks PDF asli, dicatat nomor tabel dan halamannya, lalu diverifikasi dengan memastikan bahwa skor yang tercetak sama dengan hasil perkalian L dan S. Seluruh 92 baris lolos verifikasi tersebut.

Tabel 1. Karakteristik Sumber Data Sekunder

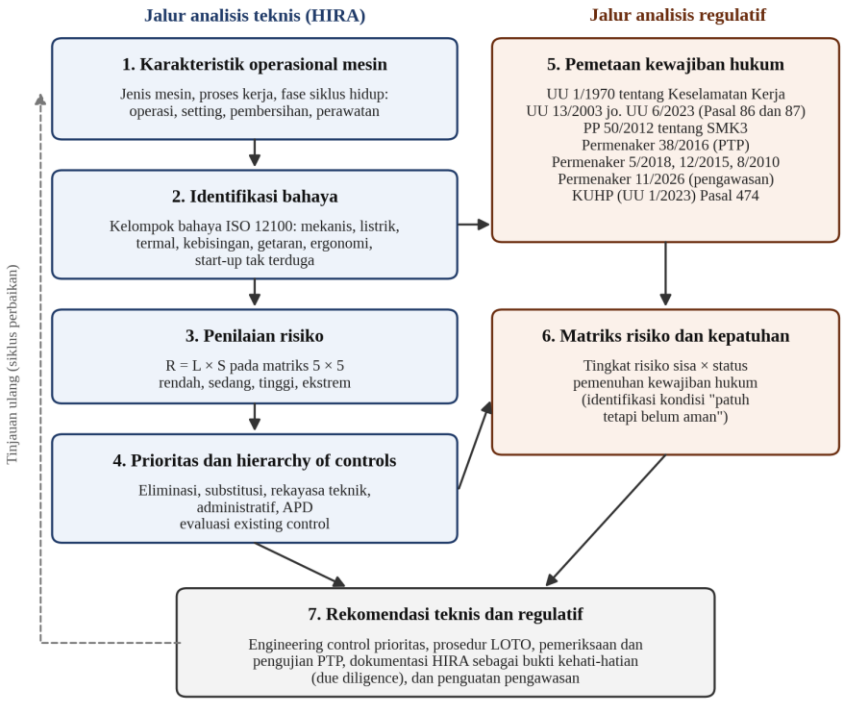
Kode	Sumber	Objek dan Mesin	Cara Perolehan Data pada Sumber	Baris (Total/ Dianalisis)	Skala dan Penentuan Kategori pada Sumber
S1	Smarandana et al. (2021)	Perusahaan pabrikasi: press (stamping), las, bubut, milling, cutting	Kuesioner dan wawancara lima operator, observasi	30/21	L dan C 1 sampai 5, S = L × C, kategori dari matriks
S2	Zahra dan Sutrisno (2022)	Perusahaan pemesinan: bubut, milling, gerinda tangan	JSA, observasi, wawancara	31/30	L dan C 1 sampai 5, S = L × C, kategori dari matriks
S3	Hamdani dan Andesta (2024)	Workshop fabrikasi baja: las, gerinda, cutting, perakitan	JSA, kuesioner bersama tim K3, wawancara, observasi	19/12	L dan C numerik 1 sampai 5 pada tabel penilaian, S = L × C
S4	Nurdziky et al. (2025)	Kernel crushing plant: mesin press dan stasiun proses	Observasi langsung, wawancara	12/8	L dan C 1 sampai 5, S = L × C, kategori dari matriks

Sumber: Diolah dari S1 sampai S4 (2026)

Baris yang dianalisis dibatasi pada bahaya yang bersumber dari mesin atau energinya, dikelompokkan menurut kelompok bahaya ISO 12100, yaitu mekanis, listrik, termal, kebisingan, radiasi, material atau zat, dan ergonomi (International Organization for Standardization, 2010). Bahaya tata letak dan penanganan material, seperti tersandung, terpeleset, dan tertimpa batang besi, serta kegiatan perakitan dan akses ketinggian dikeluarkan, sehingga tersisa 71 baris. Semua sumber memakai skala lima tingkat, tetapi menentukan

kategori dengan matriks yang berbeda. Oleh karena itu, nilai L dan S tidak diubah, sedangkan skor R = L × S diklasifikasikan ulang dengan pita seragam pada Tabel 2, yang mengacu pada matriks konsekuensi dan kemungkinan dalam IEC 31010 (International Electrotechnical Commission, 2019) serta prinsip keterbacaan matriks menurut Jensen et al. (2022). Kategori asli sumber tetap dilaporkan berdampingan agar perbedaannya dapat ditelusuri.

Pengendalian yang diusulkan sumber diklasifikasikan menurut *hierarchy of controls* berdasarkan tingkat tertinggi yang dikandungnya. Analisis regulasi menggunakan pendekatan perundang-undangan terhadap peraturan yang berlaku, dengan status yang diperiksa melalui basis data JDIH. Hasilnya ditempatkan pada matriks keselarasan risiko dan kepatuhan. Alur analisis disajikan pada Gambar 1.



Sumber: Disusun oleh penulis (2026)

Gambar 1. Kerangka Integrasi HIRA, Hierarchy of Controls, dan Analisis Kepatuhan Regulasi

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Karakteristik Operasional Mesin dan Identifikasi Bahaya

Keempat sumber mencakup enam jenis mesin, yaitu bubut, milling, gerinda, las, mesin potong (*cutting*), dan mesin press, baik press *stamping* pada industri pabrikasi (Smarandana et al., 2021) maupun press pada *kernel crushing plant* pabrik kelapa sawit (Nurdziky et al., 2025). Dari 92 baris bahaya, 71 baris (77,2%) bersumber dari mesin. Bahaya mekanis mendominasi dengan 37 baris (52,1%), disusul bahaya listrik 10 baris (14,1%), termal 9 baris (12,7%), material atau zat 8 baris (11,3%), kebisingan 3 baris, radiasi 2 baris, dan ergonomi 2 baris. Bahaya mekanis yang tercatat meliputi terlilit atau tergulung elemen berputar, terjepit, terpotong, tergores perkakas, serta terkena geram, serpihan, atau piringan gerinda yang terlepas (Zahra & Sutrisno, 2022).

Pola tersebut sejalan dengan karakter mesin perkakas dan produksi yang mengandalkan elemen berputar, titik jepit, dan perkakas potong. Dua temuan dalam sumber layak dicatat. Pertama, bahaya dengan skor tertinggi pada press *kernel crushing plant* justru muncul ketika operator mengatasi masalah pada peralatan yang sedang beroperasi, dengan L = 5 dan S = 5 (Nurdziky et al., 2025). Temuan ini konsisten dengan Duarte et al. (2021) yang mencatat

banyaknya kecelakaan serius pada kegiatan perawatan. Kedua, bahaya terlilit pada bubut dalam Zahra dan Sutrisno (2022) justru bersumber dari baju panjang dan sarung tangan operator. Hal ini menunjukkan bahwa APD yang salah pilih dapat menjadi sumber bahaya pada elemen berputar.

2. Penilaian Risiko HIRA dan Klasifikasi Tingkat Risiko

Klasifikasi seragam pada Tabel 2 menghasilkan 20 baris rendah (28,2%), 20 baris sedang (28,2%), 22 baris tinggi (31,0%), dan 9 baris ekstrem (12,7%). Dengan demikian, 31 baris (43,7%) berada pada tingkat tinggi atau ekstrem. Distribusi per mesin disajikan pada Tabel 3.

Tabel 2. Matriks Risiko Seragam 5 × 5 untuk Analisis Ulang

L \ S	S = 1	S = 2	S = 3	S = 4	S = 5
L = 5	5 (Sedang)	10 (Tinggi)	15 (Tinggi)	20 (Ekstrem)	25 (Ekstrem)
L = 4	4 (Rendah)	8 (Sedang)	12 (Tinggi)	16 (Tinggi)	20 (Ekstrem)
L = 3	3 (Rendah)	6 (Sedang)	9 (Sedang)	12 (Tinggi)	15 (Tinggi)
L = 2	2 (Rendah)	4 (Rendah)	6 (Sedang)	8 (Sedang)	10 (Tinggi)
L = 1	1 (Rendah)	2 (Rendah)	3 (Rendah)	4 (Rendah)	5 (Sedang)

Sumber: Disusun oleh penulis (2026). Kategori: rendah (1 sampai 4), sedang (5 sampai 9), tinggi (10 sampai 16), ekstrem (20 sampai 25)

Tabel 3. Distribusi Tingkat Risiko Seragam per Jenis Mesin

Mesin	Sumber	n	Rendah	Sedang	Tinggi	Ekstrem	Rerata R	R Maks.
Bubut	S1, S2	14	7	3	4	0	7,1	16
Milling	S1, S2	14	2	8	4	0	8,4	16
Gerinda	S2, S3	15	6	1	4	4	10,7	25
Las	S1, S3	9	2	1	3	3	13,3	25
Cutting	S1, S3	7	1	3	2	1	11,3	25
Press	S1, S4	12	2	4	5	1	10,6	25
Total	S1 sampai S4	**71**	**20**	**20**	**22**	**9**	**9,9**	**25**

Sumber: Hasil analisis ulang data S1 sampai S4 (2026)

Rerata skor tertinggi terdapat pada las (9 baris, rerata R = 13,3), disusul mesin potong (11,3), gerinda (10,7), dan press (10,6), sedangkan milling (8,4) dan bubut (7,1) lebih rendah. Tingginya rerata pada las dan gerinda terutama berasal dari bahaya nonmekanis seperti percikan api, sinar las, debu, dan kebisingan. Sebaliknya, bahaya mekanis memiliki rerata L = 3,1 dan rerata S = 2,8. Artinya, pada data sumber tingkat risiko bahaya mekanis lebih banyak ditentukan oleh frekuensi paparan daripada oleh keparahan akibat.

Analisis ulang juga menemukan bahwa 20 dari 71 baris (28,2%) berubah kategori ketika diklasifikasikan dengan matriks seragam. Sebanyak 11 baris turun dari ekstrem menjadi tinggi, 6 baris dari tinggi menjadi sedang, dan 3 baris dari sedang menjadi rendah. Skor 12 dikategorikan *extreme* oleh Hamdani dan Andesta (2024), tetapi *high* oleh Smarandana et al. (2021). Skor 4 bahkan diberi kategori berbeda di dalam satu sumber, yaitu *medium* untuk

korsleting listrik (L = 4, S = 1) dan *low* untuk tersandung (L = 2, S = 2), karena kategori ditentukan dari posisi sel matriks, bukan dari skor. Penelusuran juga menemukan ketidakkonsistenan penomoran skala. Zahra dan Sutrisno (2022) serta Nurdziky et al. (2025) mendefinisikan tingkat 1 sebagai *almost certain* dalam tabel kriteria, tetapi perhitungan dan matriksnya memperlakukan angka 5 sebagai kemungkinan tertinggi. Selain itu, penilaian bahaya yang sama dapat berbeda jauh antarstudi. Paparan sinar las bernilai R = 1 pada Smarandana et al. (2021), tetapi R = 25 pada Hamdani dan Andesta (2024). Temuan ini menegaskan peringatan Jensen et al. (2022) bahwa rancangan matriks dan definisi skala menentukan konsistensi penilaian. Tanpa matriks yang seragam, hasil HIRA tidak dapat dibandingkan antarperusahaan dan sulit dijadikan dasar pengawasan berbasis risiko.

3. Prioritas Pengendalian Risiko

Prioritas ditetapkan dari tingkat risiko. Risiko ekstrem memerlukan penghentian aktivitas atau pengaman sementara sebelum mesin dioperasikan kembali, risiko tinggi memerlukan pengendalian rekayasa dengan penanggung jawab dan tenggat yang jelas, sedangkan risiko sedang dan rendah dikelola melalui prosedur dan pemantauan. Apabila skornya sama, bahaya dengan S lebih tinggi didahulukan. Tabel 4 menyajikan 18 baris dengan R ≥ 15 beserta pengendalian yang diusulkan sumber dan rekomendasi penelitian ini.

Tabel 4. Penilaian Risiko HIRA Data Sekunder untuk Bahaya Prioritas (R ≥ 15)

No.	Mesin	Hazard	L	S	R	Level Sumber/ Seragam	Existing Control pada Sumber	Recommended Control	Kode
1	Las	Kebakaran	5	5	25	Extreme / Ekstrem	Display K3 mudah terbakar, pengecekan lingkungan (A)	Penyekat tahan api, pemisahan bahan mudah terbakar (R)	S1
2	Cutting	Kebakaran	5	5	25	Extreme / Ekstrem	Display K3 mudah terbakar, pengecekan lingkungan (A)	Penyekat tahan api, pemisahan bahan mudah terbakar (R)	S1
3	Las	Paparan sinar las: Buta	5	5	25	Extreme / Ekstrem	Istirahat 5 menit setiap 1 jam kerja (A)	Tirai las, helm las peredup otomatis (R, APD)	S3
4	Gerinda	Kebisingan: Gangguan pendengaran	5	5	25	Extreme / Ekstrem	APD (ear plug)	Peredam di sumber, pengukuran NAB, ear plug (R, APD)	S3
5	Gerinda	Debu potongan: Sesak nafas, perih mata	5	5	25	Extreme / Ekstrem	APD (masker, kacamata), cover pelindung gerinda (R)	Ventilasi keluar setempat, cover pelindung (R)	S3
6	Press	Mengatasi masalah pada peralatan yang sedang beroperasi: Terjepit	5	5	25	Extreme / Ekstrem	Cover pelindung pada setiap mesin yang berputar (R)	LOTO sebelum intervensi, pelindung berinterlok (R, A)	S4

No.	Mesin	Hazard	L	S	R	Level Sumber/ Seragam	Existing Control pada Sumber	Recommended Control	Kode
7	Gerinda	Listrik: Kesetrum listrik	5	4	20	Extreme / Ekstrem	APD (sarung tangan), peralatan listrik sesuai standar (R)	Pengaman arus sisa, pemeriksaan isolasi (R)	S2
8	Las	Percikan api: Luka bakar	5	4	20	Extreme / Ekstrem	APD welder, briefing	Pelindung roda atau penyekat percikan, apron (R, APD)	S3
9	Gerinda	Percikan api: Luka bakar	5	4	20	Extreme / Ekstrem	APD (sarung tangan dan apron)	Pelindung roda atau penyekat percikan, apron (R, APD)	S3
10	Press	Terpotong mesin stamping	4	4	16	Extreme / Tinggi	Memasang display K3 bahaya terjepit/terpotong (A)	Pelindung berinterlok atau tirai cahaya, kendali dua tangan (R)	S1
11	Cutting	Terpotong mesin cutting	4	4	16	Extreme / Tinggi	Memasang display K3 bahaya terjepit/terpotong (A)	Pelindung tetap atau berinterlok pada zona potong (R)	S1
12	Bubut	Arus listrik: Tersetrum listrik	4	4	16	Extreme / Tinggi	APD (sarung tangan), peralatan listrik sesuai standar (R)	Pengaman arus sisa, pembumian (R)	S2
13	Bubut	Baju panjang dan sarung tangan: Terlilit pada ulir yang berputar	4	4	16	Extreme / Tinggi	Memasang shield atau pelindung pada mesin bubut (R)	Pelindung chuck berinterlok, larangan sarung tangan (R, A)	S2
14	Milling	Geram: Geram masuk ke mata	4	4	16	Extreme / Tinggi	Modifikasi APD sesuai SOP (APD)	Pelindung transparan (chip shield), kacamata (R, APD)	S2
15	Gerinda	Mesin gerinda: Piringan terlepas dari mesin	4	4	16	Extreme / Tinggi	Perbaikan SOP dan pelatihan (A)	Pelindung roda, cek kecepatan maksimum piringan (R, A)	S2
16	Press	Tidak menggunakan ear plug di area bising: Gangguan pendengaran	4	4	16	Extreme / Tinggi	APD (ear plug)	Pengendalian bising di sumber, ear plug (R, APD)	S4

No.	Mesin	Hazard	L	S	R	Level Sumber/ Seragam	Existing Control pada Sumber	Recommended Control	Kode
17	Las	Sengatan listrik: Kematian	3	5	15	Extreme / Tinggi	Pengecekan rutin kabel las, rambu bahaya (A)	Pemeriksaan kabel, perangkat pengurang tegangan (R, A)	S3
18	Las	Menghirup asap las: Sesak nafas	3	5	15	Extreme / Tinggi	Blower untuk mengurangi penumpukan gas (R)	Ventilasi keluar setempat (R)	S3

Sumber: Nilai L, S, level sumber, dan existing control disalin dari S1 sampai S4. R, level seragam, dan rekomendasi hasil analisis penulis (2026). R = rekayasa teknik, A = administratif

Enam baris memperoleh skor maksimum 25, yaitu kebakaran pada las dan mesin potong, paparan sinar las, kebisingan dan debu gerinda, serta terjepit saat mengatasi masalah press yang sedang beroperasi. Di antara bahaya mekanis, prioritas tertinggi adalah terjepit pada press (R = 25), terpotong pada press *stamping* dan mesin potong (R = 16), terlilit pada bubut (R = 16), geram yang masuk ke mata pada milling (R = 16), dan piringan gerinda yang terlepas (R = 16). Aturan prioritas yang eksplisit ini sejalan dengan Pačaiová et al. (2024), yang mencatat keraguan manajemen terhadap efektivitas biaya tindakan keselamatan mesin, serta Sudiarno dan Maharani (2024), yang menjadikan *hierarchy of controls* sebagai dasar penilaian investasi program K3.

4. Kesesuaian Pengendalian dengan Prinsip Keselamatan Teknik

Pada 31 baris dengan R ≥ 10, pengendalian yang diusulkan sumber terdiri atas 11 rekayasa teknik (35,5%), 11 administratif (35,5%), dan 9 APD (29,0%). Sebanyak 20 pengendalian (64,5%) dengan demikian bertumpu pada lapisan administratif dan APD, dan tidak satu pun berada pada tingkat eliminasi atau substitusi. Pada 14 baris mekanis dengan R ≥ 10, proporsinya lebih timpang, yaitu 10 baris (71,4%) dikendalikan secara administratif atau dengan APD. Contohnya, bahaya terpotong pada press *stamping* dan mesin potong dengan R = 16 hanya dikendalikan dengan pemasangan *display* K3 (Smarandana et al., 2021). Bahaya tergulung putaran mata pahat milling bahkan dikendalikan dengan sarung tangan kulit, padahal sarung tangan termasuk sumber bahaya terlilit pada elemen berputar.

Beberapa sumber sudah mengarah pada pengendalian yang tepat, seperti pemasangan *shield* pada bubut (Smarandana et al., 2021; Zahra & Sutrisno, 2022), sensor dan pelindung tambahan pada mesin potong (Hamdani & Andesta, 2024), serta *cover* pelindung pada setiap mesin berputar di *kernel crushing plant* (Nurdziky et al., 2025). Pola keseluruhan tetap sejalan dengan Ajslev et al. (2022), yang menemukan dominasi pengendalian administratif (53,6%) dan porsi eliminasi serta substitusi yang kecil. Yazdi dan Adumene (2025) menegaskan bahwa pengendalian rekayasa yang membatasi akses fisik ke zona bahaya adalah tindakan paling efektif pada mesin. Untuk bahaya terjepit saat perawatan, Ghasemi Pirbalouti et al. (2026) menunjukkan bahwa isolasi energi tetap menjadi pilihan dasar, sehingga *cover* pelindung saja belum memadai tanpa prosedur *lockout/tagout* (LOTO) sebelum intervensi. Marhavilas et al. (2026) juga menemukan bahwa kegagalan izin kerja dan prosedur *lockout* merupakan pemicu utama skenario berisiko tinggi.

5. Keterkaitan Hasil Penilaian Risiko dengan Regulasi Keselamatan Kerja

Tabel 5 memetakan temuan HIRA terhadap kewajiban hukum yang relevan. Setiap kelompok bahaya dalam data memiliki dasar kewajiban dalam hukum positif Indonesia, meskipun tingkat kerinciannya berbeda.

Tabel 5. Pemetaan Temuan HIRA terhadap Kewajiban Regulasi Keselamatan Kerja

Temuan HIRA	Kewajiban Hukum	Dasar Hukum	Implikasi
Seluruh bahaya pada mesin berbahaya	Menetapkan dan menerapkan syarat keselamatan sejak perencanaan hingga pemeliharaan	UU 1/1970 Pasal 2 ayat (2) huruf a, Pasal 3 ayat (1), Pasal 4 ayat (1)	HIRA menjadi dasar penetapan syarat keselamatan per mesin
31 baris berisiko tinggi dan ekstrem	Identifikasi bahaya, penilaian, dan pengendalian risiko dalam SMK3	UU 13/2003 Pasal 87 jo. UU 6/2023, PP 50/2012	Risiko prioritas wajib masuk rencana K3 dengan penanggung jawab dan tenggat
Bahaya mekanis pada bubut, milling, press, dan cutting	Penerapan syarat K3 pesawat tenaga dan produksi, pemeriksaan dan pengujian, operator kompeten	Permenaker 38/2016	Pengaman teknis merupakan bagian dari syarat K3, bukan pilihan
Kebisingan, debu, dan asap las	Pengendalian faktor fisika dan kimia sesuai nilai ambang batas	Permenaker 5/2018	Pengukuran lingkungan kerja diperlukan untuk memvalidasi nilai L dan S
Bahaya listrik pada gerinda, bubut, las, dan panel	Pemenuhan syarat K3 listrik di tempat kerja	Permenaker 12/2015	Pemeriksaan instalasi listrik mesin masuk rencana pengendalian
Pengendalian yang bertumpu pada APD	Penyediaan APD secara cuma-cuma dan penjelasan bahaya kepada pekerja	UU 1/1970 Pasal 9 dan Pasal 14 huruf c, Permenakertrans PER.08/MEN/VII/2010	APD melengkapi, tidak menggantikan, pengendalian rekayasa
Ketidakpatuhan yang ditemukan pengawas	Tindak lanjut pemeriksaan, sanksi, dan penghentian sementara peralatan	Permenaker 11/2026	Dokumen HIRA menjadi bukti dalam pemeriksaan berbasis risiko
Kecelakaan dengan luka berat atau kematian	Pertanggungjawaban pidana dan perdata	UU 1/1970 Pasal 15, UU 1/2023 Pasal 474, KUHPerdata Pasal 1365	Risiko tinggi yang tidak dikendalikan dapat menjadi indikasi kealpaan

Sumber: Hasil analisis peraturan perundang-undangan (2026)

Pasal 2 ayat (2) huruf a Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 menjadikan tempat yang menggunakan mesin berbahaya sebagai tempat kerja yang tunduk pada undang-undang tersebut. Pasal 9 mewajibkan pengurus menjelaskan bahaya dan alat pelindung kepada tenaga kerja baru, sedangkan Pasal 14 huruf c mewajibkan penyediaan APD secara cuma-cuma (Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970). Ketentuan ini mendasari seluruh lapisan pengendalian, tetapi tidak menetapkan urutan prioritasnya. Urutan itu baru dapat diturunkan dari kewajiban penilaian dan pengendalian risiko dalam SMK3, yang wajib bagi perusahaan dengan paling sedikit 100 pekerja atau dengan tingkat potensi bahaya tinggi menurut Pasal 5 ayat (2) (Peraturan Pemerintah Nomor 50 Tahun 2012). Pada tingkat teknis, Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 38 Tahun 2016 mengatur syarat K3 pesawat tenaga dan produksi,

termasuk pemeriksaan, pengujian, dan kompetensi operator (Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 38 Tahun 2016). Kebisingan, debu, dan asap las mengacu pada nilai ambang batas dalam Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 5 Tahun 2018, bahaya listrik mengacu pada Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 12 Tahun 2015, dan APD diatur dalam Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Nomor PER.08/MEN/VII/2010. Sebagian ketentuan pengawasan dalam peraturan teknis tersebut telah dicabut oleh Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 11 Tahun 2026, yang menetapkan status kepatuhan perusahaan berdasarkan pemetaan risiko, potensi bahaya, dan tingkat kepatuhan, serta memuat penghentian sementara terhadap peralatan yang tidak memenuhi norma (Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 11 Tahun 2026).

Temuan inkonsistensi matriks pada bagian sebelumnya memiliki implikasi regulatif langsung. Apabila status kepatuhan ditetapkan berbasis risiko, perbedaan kategori untuk skor yang sama dapat menghasilkan prioritas pengawasan yang berbeda untuk kondisi mesin yang serupa. Dari sisi tanggung jawab, sanksi pidana dalam Pasal 15 Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 berupa kurungan paling lama tiga bulan atau denda paling banyak Rp100.000,00, sehingga daya cegahnya lemah. Apabila kecelakaan mesin mengakibatkan luka berat atau kematian, pertanggungjawaban dapat bergeser ke delik kealpaan dalam Pasal 474 Undang-Undang Nomor 1 Tahun 2023, dengan ancaman pidana penjara paling lama tiga tahun untuk luka berat dan lima tahun untuk kematian (Undang-Undang Nomor 1 Tahun 2023). Pekerja yang dirugikan juga memiliki dasar gugatan perbuatan melawan hukum menurut Pasal 1365 (Kitab Undang-Undang Hukum Perdata). Dalam kerangka kealpaan, bahaya yang telah dinilai tinggi atau ekstrem tetapi hanya dikendalikan dengan rambu atau APD dapat menjadi indikasi kuat bahwa akibatnya dapat diduga namun tidak dicegah secara memadai. Sebaliknya, HIRA yang lengkap dan ditindaklanjuti menjadi bukti kehati-hatian (*due diligence*) pengurus.

Temuan tersebut dirangkum dalam matriks keselarasan risiko dan kepatuhan pada Tabel 6.

Tabel 6. Matriks Keselarasan Risiko dan Kepatuhan

Kuadran	Tingkat Risiko Sisa	Status Kepatuhan	Interpretasi	Tindakan
I. Patuh dan aman	Rendah atau sedang	Kewajiban hukum terpenuhi	Kondisi yang ditargetkan	Pertahankan dan tinjau secara berkala
II. Patuh tetapi belum aman	Tinggi atau ekstrem	Kewajiban hukum terpenuhi secara formal	Kepatuhan dokumen tidak mencerminkan pengaman teknis	Prioritaskan *engineering control* dan nilai ulang risiko
III. Tidak patuh, risiko rendah	Rendah atau sedang	Terdapat kewajiban yang belum dipenuhi	Kelemahan administratif	Lengkapi dokumen, pemeriksaan, dan sertifikasi
IV. Tidak patuh dan tidak aman	Tinggi atau ekstrem	Terdapat kewajiban yang belum dipenuhi	Kondisi paling kritis dengan potensi tanggung jawab hukum terbesar	Hentikan aktivitas dan kendalikan segera

Sumber: Disusun oleh penulis (2026)

Data sekunder tidak memuat status kepatuhan hukum perusahaan sumber, sehingga penempatan setiap perusahaan pada kuadran tidak dapat dilakukan. Namun, pola pengendalian dalam data menunjukkan risiko sistematis menuju kuadran II, yaitu patuh tetapi belum aman. Kewajiban penyediaan APD dan pemasangan rambu relatif mudah dipenuhi dan tampak dalam dokumen, sementara 64,5% pengendalian untuk risiko prioritas berhenti pada lapisan tersebut.

Albert et al. (2025) menemukan gejala serupa pada sektor perikanan, ketika regulasi yang ada tidak efektif mencegah kecelakaan terbelit. Vu et al. (2023) juga menunjukkan bahwa legalisasi penilaian risiko mendorong implementasi K3. Kedua temuan itu menunjukkan bahwa regulasi dapat mendorong penilaian risiko, tetapi hanya efektif apabila isi penilaian dan pengendaliannya diuji secara teknis.

6. Rekomendasi Teknis dan Regulatif

Rekomendasi teknis mengikuti kolom *recommended control* pada Tabel 4. Untuk bahaya mekanis, pelindung tetap dan pelindung berinterlok perlu dipasang atau dipulihkan pada chuck, transmisi, perkakas tekan, dan zona potong, tirai cahaya atau kendali dua tangan perlu dipertimbangkan pada press, dan larangan sarung tangan di dekat elemen berputar perlu ditegakkan. Setiap intervensi pada mesin yang sedang bermasalah harus didahului prosedur LOTO tertulis dengan verifikasi energi nol. Bahaya listrik dikendalikan dengan pengaman arus sisa dan pemeriksaan pembumian, sedangkan debu dan asap las memerlukan ventilasi keluar setempat. APD tetap diperlukan sebagai lapisan pelengkap, dan setiap perubahan pengaman perlu diikuti penilaian ulang risiko.

Rekomendasi regulatif ditujukan kepada tiga pihak. Perusahaan perlu mengintegrasikan HIRA ke dalam SMK3 dengan matriks yang konsisten dan mengaitkan setiap risiko tinggi dengan dasar hukum serta penanggung jawabnya. Pengawas ketenagakerjaan perlu menguji keberadaan dan fungsi pengaman teknis secara fisik, bukan hanya kelengkapan dokumen. Pembentuk regulasi perlu mempertimbangkan penetapan matriks risiko acuan nasional untuk pengawasan berbasis risiko, kewajiban eksplisit mengenai urutan hierarki pengendalian, serta pembaruan sanksi Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 yang tidak lagi proporsional.

7. Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu dan Kebaruan

Keempat studi sumber berhenti pada kategori risiko dan daftar pengendalian dalam lingkup satu perusahaan. Penelitian ini menempatkan hasilnya dalam satu matriks seragam, sehingga terlihat bahwa hampir tiga dari sepuluh kategori berubah dan bahwa bahaya yang sama dapat dinilai sangat berbeda antarstudi. Dibandingkan dengan Budiman et al. (2025) yang menindaklanjuti risiko ekstrem melalui mekanisme pengetahuan organisasi, penelitian ini menawarkan tindak lanjut berupa pengendalian rekayasa. Kajian hukum K3 terdahulu (Irfani & Hamzah, 2021; Putri et al., 2024) belum memanfaatkan tingkat risiko teknis, sedangkan penelitian ini menjadikannya dasar untuk menentukan kewajiban hukum yang paling mendesak menurut hukum Indonesia yang berlaku, bukan hukum negara lain seperti pada Yazdi dan Adumene (2025) serta Albert et al. (2025).

Temuan penelitian (*novelty*) adalah bahwa kepatuhan formal terhadap regulasi K3 dan keselamatan teknis mesin merupakan dua dimensi yang dapat berbeda arah, sehingga perlu dinilai bersamaan melalui matriks keselarasan risiko dan kepatuhan. Analisis ulang terhadap 71 baris HIRA terbitan menunjukkan dua mekanisme yang membuat kesenjangan itu terjadi, yaitu ketidakkonsistenan matriks antarstudi dan dominasi pengendalian administratif serta APD pada risiko prioritas. Kerangka ini juga memberi fungsi ganda bagi dokumen HIRA, yaitu sebagai alat rekayasa untuk mereduksi risiko dan sebagai bukti kehati-hatian dalam menilai ada atau tidaknya kealpaan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Analisis ulang terhadap 71 baris HIRA dari empat studi terbitan menunjukkan bahwa bahaya operasional mesin industri didominasi bahaya mekanis (52,1%), berupa terlilit, terjepit, terpotong, dan terkena benda terlontar, dengan skor tertinggi pada intervensi terhadap press yang sedang beroperasi. Dengan matriks seragam, 43,7% baris berada pada tingkat tinggi atau

ekstrem, dan 28,2% baris berubah kategori dibandingkan klasifikasi sumber. Hal ini menunjukkan bahwa hasil HIRA antarstudi belum dapat dibandingkan tanpa matriks acuan yang konsisten.

Pengendalian yang diusulkan untuk risiko prioritas belum sesuai dengan prinsip keselamatan teknik, karena 64,5% bertumpu pada langkah administratif dan APD dan tidak ada yang berada pada tingkat eliminasi atau substitusi. Setiap tingkat risiko dapat dipetakan ke kewajiban dalam Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970, Undang-Undang Nomor 13 Tahun 2003, Peraturan Pemerintah Nomor 50 Tahun 2012, dan peraturan menteri teknis terkait. Matriks keselarasan risiko dan kepatuhan menunjukkan bahwa kepatuhan formal belum tentu berarti mesin aman. Bagi bidang teknik mesin, kerangka ini memberikan prosedur prioritas pengendalian yang dapat diaudit secara hukum.

Keterbatasan

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, data bersumber dari empat studi terbitan sehingga kualitas penilaian L dan S bergantung pada metode masing-masing sumber, termasuk penilaian berbasis kuesioner dengan jumlah responden yang kecil. Kedua, mesin bor serta gerinda silinder dan permukaan belum tercakup karena tidak ditemukan data sumber yang memenuhi kriteria. Ketiga, klasifikasi tingkat hierarki pengendalian dan pemilihan baris yang dianalisis mengandung pertimbangan penulis, meskipun aturannya dinyatakan secara eksplisit. Keempat, status kepatuhan hukum perusahaan sumber tidak tersedia, dan analisis tanggung jawab hukum belum diuji dengan putusan pengadilan.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan menguji kerangka ini dengan data lapangan primer pada beberapa jenis mesin, termasuk mesin bor dan gerinda presisi, menggunakan satu matriks yang sama serta penilaian oleh beberapa penilai untuk mengukur konsistensi. Penilaian kemungkinan dapat diperkuat dengan data keandalan komponen pengaman atau *fault tree analysis*. Kajian lanjutan juga perlu menelaah putusan pengadilan terkait kecelakaan mesin untuk menguji peran dokumen penilaian risiko dalam pembuktian unsur kealpaan.

Kontribusi Author

Penulis kedua berkontribusi pada konseptualisasi aspek teknik, pengolahan dan verifikasi data teknis sekunder, analisis HIRA, interpretasi teknis, serta penyusunan naskah. Penulis pertama berkontribusi pada analisis regulasi keselamatan kerja, analisis aspek hukum, pengembangan kerangka konseptual interdisipliner, interpretasi aspek regulatif, serta telaah dan penyempurnaan naskah. Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui versi final artikel.

REFERENSI

Ajslev, J. Z. N., Møller, J. L., Andersen, M. F., Pirzadeh, P., & Lingard, H. (2022). The hierarchy of controls as an approach to visualize the impact of occupational safety and health coordination. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 19*(5), 2731. https://doi.org/10.3390/ijerph19052731

Albert, M., Le Du, S., Renault, C., & Chauvin, C. (2025). Analysis of occupational accidents on board fishing vessels: What scope of regulations to prevent accidents involving deck machinery? *Safety Science, 191*, 106950. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.106950

Budiman, R., Handoko, F., & Laksmana, D. I. (2025). Mitigasi resiko kategori extreme dari hasil analisis HIRA (Hazard Identification and Risk Assessment) pada industri aviasi. *Jurnal Keselamatan Kesehatan Kerja dan Lingkungan, 6*(1), 19–32. https://doi.org/10.25077/jk3l.6.1.19-32.2025

Duarte, J., Torres Marques, A., & Santos Baptista, J. (2021). Occupational accidents related to heavy machinery: A systematic review. *Safety, 7*(1), 21. https://doi.org/10.3390/safety7010021

Ghasemi Pirbalouti, R., Burlet-Vienney, D., Chinniah, Y. A., & Poisson, P. (2026). Toward a decision-aiding framework for selecting alternative methods to lockout in machinery energy control: A literature-based approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 143*(11), 5967–5993. https://doi.org/10.1007/s00170-026-17755-w

Gualtieri, L., Rauch, E., & Vidoni, R. (2021). Emerging research fields in safety and ergonomics in industrial collaborative robotics: A systematic literature review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 67*, 101998. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101998

Hamdani, M. I., & Andesta, D. (2024). Analisis potensi bahaya menggunakan metode JSA dan HIRARC untuk mengurangi angka kecelakaan kerja pada area workshop fabrikasi PT. ABC. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan, 8*(2), 887–895. https://doi.org/10.33379/gtech.v8i2.4076

Harianto, F. D., & Wahyuni, H. C. (2023). Risk identification of roll forming machine area with the (HIRARC) approach at PT. Bumi Lestrai Karya Perkasa. *Academia Open, 8*(2). https://doi.org/10.21070/acopen.8.2023.7744

Hendro, V., & Apsari, A. E. (2023). Pengendalian risiko bahaya kecelakaan dengan metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) dan Hazard Identification Risk Assessment (HIRA). *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, Elektro dan Komputer, 3*(2), 333–340. https://doi.org/10.51903/juritek.v3i2.1872

Herlina, L., Dewantari, N. M., Sonda, A., & Mulyana, M. R. (2022). Hazard identification in fabrication industry using Hazard Identification and Risk Assessment (HIRA) and Job Safety Analysis (JSA). *Journal Industrial Servicess, 8*(2), 170–175. https://doi.org/10.36055/jiss.v8i2.17112

Hollá, K., Kuricová, A., Kočkár, S., Prievozník, P., & Dostál, F. (2024). Risk assessment industry driven approach in occupational health and safety. *Frontiers in Public Health, 12*, 1381879. https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1381879

International Electrotechnical Commission. (2019). *Risk management: Risk assessment techniques* (IEC 31010:2019). IEC.

International Organization for Standardization. (2010). *Safety of machinery: General principles for design: Risk assessment and risk reduction* (ISO 12100:2010). ISO.

International Organization for Standardization. (2018). *Occupational health and safety management systems: Requirements with guidance for use* (ISO 45001:2018). ISO.

Irfani, J. T., & Hamzah, A. S. (2021). Perlindungan hukum keselamatan dan kesehatan kerja terhadap pekerja/buruh PT. Telkom Indonesia ditinjau dari perspektif hukum positif Indonesia. *Private Law, 1*(3), 529–535. https://doi.org/10.29303/prlw.v1i3.428

Jensen, R. C., Bird, R. L., & Nichols, B. W. (2022). Risk assessment matrices for workplace hazards: Design for usability. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 19*(5), 2763. https://doi.org/10.3390/ijerph19052763

Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia. (2022). *The Indonesian national occupational safety and health profile 2022*. Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia.

Kitab Undang-Undang Hukum Perdata (Burgerlijk Wetboek). (1847). Staatsblad 1847 Nomor 23.

Lamy, P., & Flaus, J.-M. (2026). A method of cyber risk assessment for occupational risk in machinery. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 32*(3), 778–793. https://doi.org/10.1080/10803548.2025.2595860

Marhavilas, P. K., Iliopoulou, T. C., & Delianidis, N. (2026). From risk perception to actionable controls: A hybrid occupational risk analysis and assessment approach in a combined cycle power plant construction. *Safety, 12*(4), 111. https://doi.org/10.3390/safety12040111

Nurdziky, I., Barokah, Aminah, S., Linangsari, T., & Jaya, J. D. (2025). Evaluasi risiko keselamatan pada kernel crushing plant dengan pendekatan HIRARC di PT ABC. *Jurnal Humaniora dan Teknologi, 11*(2), 114–127. https://doi.org/10.34128/jht.v11i2.197

Pačaiová, H., Turisová, R., Glatz, J., & Onofrejová, D. (2024). Sustainability assessment of machinery safety in a manufacturing organization using AHP and CART methods. *Sustainability, 16*(9), 3718. https://doi.org/10.3390/su16093718

Park, J. H., Min, S. N., & Kang, C. (2026). Factors contributing to recurrent accidents involving industrial machinery in the manufacturing sector: Evidence from government accident reports. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. Advance online publication. https://doi.org/10.1080/10803548.2026.2671537

Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 11 Tahun 2026 tentang Tata Cara Pengawasan Ketenagakerjaan. (2026). Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2026 Nomor 438.

Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 12 Tahun 2015 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Listrik di Tempat Kerja. (2015). Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia.

Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 38 Tahun 2016 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Pesawat Tenaga dan Produksi. (2016). Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2016 Nomor 1989.

Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 5 Tahun 2018 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Lingkungan Kerja. (2018). Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia.

Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Nomor PER.08/MEN/VII/2010 tentang Alat Pelindung Diri. (2010). Kementerian Tenaga Kerja dan Transmigrasi Republik Indonesia.

Peraturan Pemerintah Nomor 50 Tahun 2012 tentang Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja. (2012). Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2012 Nomor 100.

Putri, F. N. H., Solechan, & Suhartoyo. (2024). Perlindungan hukum pekerja terhadap keselamatan dan kesehatan kerja di PT. Perusahaan Listrik Negara (PLN) Unit Induk Distribusi (UID) Jateng dan DIY Semarang. *Diponegoro Law Journal, 13*(4). https://doi.org/10.14710/dlj.2024.45297

Smarandana, G., Momon, A., & Arifin, J. (2021). Penilaian risiko K3 pada proses pabrikasi menggunakan metode Hazard Identification, Risk Assessment and Risk Control (HIRARC). *Jurnal INTECH Teknik Industri Universitas Serang Raya, 7*(1), 56–62. https://doi.org/10.30656/intech.v7i1.2709

Sudiarno, A., & Maharani, N. P. (2024). A conceptual framework for analyzing occupational safety and health program investment: Hierarchy of controls-based approach. *The Indonesian Journal of Occupational Safety and Health, 13*(2), 201–212. https://doi.org/10.20473/ijosh.v13i2.2024.201-212

Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja. (1970). Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 1970 Nomor 1.

Undang-Undang Nomor 1 Tahun 2023 tentang Kitab Undang-Undang Hukum Pidana. (2023). Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2023 Nomor 1.

Undang-Undang Nomor 13 Tahun 2003 tentang Ketenagakerjaan. (2003). Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2003 Nomor 39.

Undang-Undang Nomor 6 Tahun 2023 tentang Penetapan Peraturan Pemerintah Pengganti Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2022 tentang Cipta Kerja menjadi Undang-Undang. (2023). Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2023 Nomor 41.

Vu, G.-K., Le, T.-A., Ngoc, T.-P., Nguyen, T.-H. T., & Ha-Nguyen, M.-Q. (2023). Risk assessment, implementation of occupational health, safety and hygiene in small and medium manufacturing enterprises: A case study in central Vietnam. *Decision Science Letters*, *12*(4), 739–748. https://doi.org/10.5267/j.dsl.2023.7.002

Yazdi, M., & Adumene, S. (2025). Innovative risk management for machine safety: Insights from AS/NZS 4024 standards. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *137*(1), 659–682. https://doi.org/10.1007/s00170-025-15149-y

Zahra, F. S., & Sutrisno. (2022). Analisis bahaya dan penilaian risiko menggunakan metode HIRARC PT. Cahaya Mekanindo Perkasa. *SITEKIN: Jurnal Sains, Teknologi dan Industri*, *20*(1), 255–264. https://doi.org/10.24014/sitekin.v20i1.19762