Blend Sains
Jurnal Teknik
https://jurnal.ilmubersama.com/index.php/blendsains

Artikel Penelitian

Analisis dan Perbaikan Penggunaan APD pada Pekerja Pemilah Sampah Manual Berbasis RCA Level 4 dan *Fuzzy* FTA

M. Ibrahim Ats-Tsauri[*], *Muhamad Engkos Kosim, Mochamad Refly Robiansyah*

Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Pelita Bangsa, Bekasi, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 29 September 2026
Revisi Akhir: 28 Oktober 2026
Diterbitkan *Online*: 29 Oktober 2026

KATA KUNCI

Alat Pelindung Diri (APD/PPE)
Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA)
Human Factors Analysis and Classification System (HFACS)
Root Cause Analysis (RCA)
Triangular Fuzzy Numbers (TFN)

KORESPONDENSI [(*)]

Phone: +62 856-4370-3243
E-mail: Ibrahim.ats@pelitabangsa.ac.id

A B S T R A K

Ketidakpatuhan penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) di area pemilahan sampah manual Tempat Pembuangan Akhir (TPA) memicu risiko kecelakaan kerja dan penyakit akibat kerja yang tinggi. Penelitian ini bertujuan mengkuantifikasi risiko serta mengidentifikasi akar masalah sistemik ketidakpatuhan APD massal (±50% pekerja) melalui pendekatan hibrida *Root Cause Analysis* (RCA) Level 4, *Human Factors Analysis and Classification System* (HFACS), dan *Fuzzy Fault Tree Analysis* (FFTA). Data faktual diaudit melalui triangulasi lima jenis data dan disaring menggunakan KNOT *Chart*, dengan jumlah responden 30 pekerja (50% dari populasi), dan 4 orang pakar dari bidang K3 dan operasional. Struktur kausalitas diklasifikasikan ke dalam empat tingkatan HFACS dan dikuantifikasi menggunakan *Triangular Fuzzy Numbers* (TFN) berbasis konsensus pakar. Hasil kuantifikasi menunjukkan nilai probabilitas terjadinya ketidakpatuhan massal (*Top Event*) sebesar P(TE) = 5,69%. Akar masalah paling kritis teridentifikasi pada level *Organizational Influences* (BE4: sistem pengadaan kaku tahunan tanpa *buffer stock*, FPV = 0.058) dan Unsafe Supervision (BE7: ketiadaan SOP Progressive Disciplinary System, FPV = 0.048). Berdasarkan temuan tersebut, dirumuskan matriks rekomendasi terintegrasi berbasis *Hierarchy of Controls* dan CAPA 4-Level untuk mentransformasi sistem pengawasan serta logistik K3 secara permanen dan berkelanjutan.

PENDAHULUAN

Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) adalah sebuah inisiatif terencana untuk membangun lingkungan kerja yang aman, nyaman, serta sehat demi menghindari terjadinya kecelakaan di tempat kerja maupun Penyakit Akibat Kerja (PAK) dan untuk meraih tingkat produktivitas kerja yang maksimal [1]. Dalam teori keselamatan dan kesehatan kerja serta praktik manajemen risiko, pengelolaan ancaman yang mungkin terjadi di tempat kerja harus menggunakan Hierarki Pengendalian Risiko, yang mencakup eliminasi, substitusi, rekayasa teknik, pengendalian administratif, dan APD [2], [3]. Berada pada tingkatan pencegahan terakhir, APD berfungsi untuk mengisolasi sebagian atau seluruh tubuh pekerja dari paparan bahaya lingkungan kerja yang tidak dapat dieliminasi secara sepenuhnya [3]. Dari sudut pandang regulasi, Pasal 14c Undang-Undang No. 1 Tahun 1970 serta Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi No. PER.08/MEN/VII/2010 Pasal 2 ayat (1) dan (3) mengamanatkan bahwa pengusaha wajib menyediakan APD secara cuma-cuma dan sesuai standar keselamatan [4]. Pasal 6 ayat (1) pada Peraturan Menteri tersebut juga mewajibkan setiap pekerja untuk memakai APD sesuai dengan potensi bahaya dan risiko yang ada di tempat kerja [4] .

Pada sektor pengolahan pemisahan limbah secara manual, para pekerja menghadapi risiko paparan bahaya ganda yang sangat kompleks dan cukup spesifik yang mencakup faktor fisik, mekanis, kimia, dan biologis [5] . Aktivitas pemilahan memapar pekerja pada risiko luka tusuk atau luka sayat akibat pecahan kaca, paku, dan logam tajam, iritasi kulit dan dermatitis kontak akibat resapan air lindi (*leachate*) yang korosif dan licin, serta gangguan saluran pernapasan akibat

https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i2.2081 Attribution-ShareAlike 4.0 International Some rights reserved

paparan debu halus dan bioaerosol [6], [7]. Untuk mengendalikan risiko spesifik di area pemilahan tersebut, standar K3 menetapkan penggunaan matriks APD terpadu, yang meliputi helm keselamatan untuk melindungi kepala dari benturan dan kejatuhan benda keras; masker *respirator* dengan filter ganda untuk menyaring partikel debu, mikroorganisme, dan emisi gas; sarung tangan karet tebal (*heavy-duty nitrile gloves*) yang tahan robek dan kedap air untuk mencegah luka tusuk serta resapan lindi; *safety boots* anti-air (*waterproof steel-toe boots*) untuk melindungi kaki dari tertusuk benda tajam dan bahaya tergelincir di lantai basah; serta pakaian lengan panjang/wearpack dan apron anti-air untuk melindungi tubuh dari cipratan kontaminasi basah [4], [8].

Meskipun peran APD sangat mendasar dalam menekan risiko kecelakaan dan penyakit akibat kerja, fenomena ketidakpatuhan penggunaan APD di kalangan pekerja pengelolaan limbah dan industri di negara berkembang masih berada pada tingkat yang sangat krusial [5], [9] . Secara global, *International Labour Organization* (ILO) mencatat bahwa 34% kecelakaan kerja disebabkan oleh tidak digunakannya APD dan 13% akibat penggunaan APD yang tidak tepat [5], [10]. Pada sektor pekerja sanitasi dan pengolahan limbah di Uganda, studi empiris mengungkapkan bahwa tingkat penggunaan APD yang konsisten hanya mencapai 60,7%, dengan faktor utama ketidakpatuhan meliputi tidak disediakannya APD oleh pengelola (61,3%), sulitnya akses dan mahalnya harga APD (54,8%), serta rasa tidak nyaman saat bekerja [5] . Hal ini sejalan dengan temuan pada pekerja industri di Indonesia yang mencatat tingkat kepatuhan APD yang masih sangat rendah (hanya 43,7%), di mana kebijakan manajemen yang tegas khususnya penerapan sanksi atas pelanggaran yang menjadi faktor determinan terkuat dalam mendorong kepatuhan [8]. Kelemahan kontrol yang ketat, tidak tersedianya pelatihan K3, serta persepsi pekerja bahwa APD mengganggu fleksibilitas dan kecepatan kerja fisik semakin memperparah perilaku tidak aman di lini depan [11].

Research gap yang utama dalam literatur K3 terletak pada kecenderungan studi konvensional yang hanya berfokus secara segmental pada faktor internal individu pekerja seperti tingkat pengetahuan, sikap, dan karakteristik personal. Pendekatan parsial ini dinilai terbatas karena memperlakukan kesalahan manusia sebagai suatu hasil (*outcome*), padahal kesalahan individu merupakan akibat belumnya potensi terjadi gejala yang jelas pada tingkat sistem manajemen (*Management System Deficiencies*). Untuk mengatasi keterbatasan metodologis tersebut, Berdasarkan kerangka penelitian ini Root Cause Analysis (RCA) Level 4, investigasi kausalitas mampu menembus batas tindakan tidak aman (unsafe acts) untuk mengidentifikasi kelemahan pada standar, kebijakan, dan pengendalian administratif (*Standards, Policies, and Administrative Controls*/SPACs). Untuk memetakan struktur kausalitas tersebut secara terorganisir, metode HFACS [12], [13] menyediakan taksonomi 4 hierarki mulai dari *Unsafe Acts, Preconditions for Unsafe Acts, Unsafe Supervision*, hingga *Organizational Influences* [14], [15]. Mengingat data riwayat kecelakaan pada sektor informal sering kali bersifat kualitatif dan tidak pasti, penggabungan HFACS dengan *Fuzzy Fault Tree Analysis* (FFTA) berbasis *Triangular Fuzzy Numbers* (TFN) dan fungsi Onisawa [16] menjadi solusi ilmiah yang valid untuk mengkuantifikasi probabilitas kegagalan sistem serta mengidentifikasi akar masalah paling kritis pada tingkat pengawasan dan kebijakan organisasi.

TINJAUAN PUSTAKA

Berbagai literatur studi empiris mengenai K3 di sektor pengelolaan limbah serta industri di negara-negara berkembang menunjukkan bahwa kepatuhan dalam penggunaan APD di area produksi masih jauh dari angka ideal, berkisar antara 43,7% hingga 60,7% [8], [9], [11] . Data statistik *International Labour Organization* (ILO) menunjukkan bahwa 34% kecelakaan kerja disebabkan oleh tidak digunakannya APD dan 13% akibat penggunaan APD yang tidak tepat [5] . Riset pada pekerja sanitasi di Uganda mengungkapkan bahwa ketidakpatuhan utama dipicu oleh tidak disediakannya APD oleh pengelola (61,3%), keterbatasan akses dan tingginya harga (54,8%), serta rasa tidak nyaman saat bekerja [9] . Kondisi ini sejalan dengan temuan pada pekerja industri di Indonesia, di mana rasa pengap, beban termal, serta gangguan pergerakan fisik saat kerja berat menyebabkan pekerja secara sengaja mengabaikan standar APD [11] .

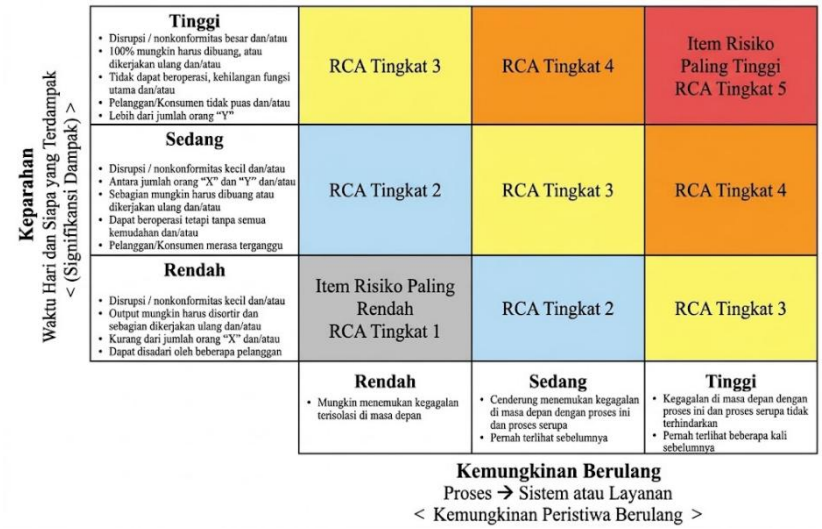
Kekurangan utama dalam literatur perilaku K3 terkini menunjukkan bahwa tingkat pemahaman dan sikap baik individu tidak selalu berujung pada tindakan yang aman saat bekerja di lapangan [11] . Sebaliknya, pelaksanaan regulasi oleh pihak manajemen (*perceived rule enforcement*) dan keberadaan struktur pengawasan K3 terbukti menjadi determinan terkuat dalam mengendalikan perilaku pekerja [5], [8], [9]. Penelitian pada pekerja industri semen di Indonesia membuktikan bahwa kebijakan manajemen khususnya penerapan sanksi K3 yang tegas memiliki pengaruh paling dominan terhadap kepatuhan APD (OR = 5,22) [8] . Sejalan dengan hal tersebut, studi pada fasilitas pengolahan limbah

di Uganda menegaskan bahwa ketersediaan regulasi K3 (AOR = 2,85), keberadaan petugas K3 di lapangan (AOR = 2,32), dan kebijakan penggunaan APD yang bersifat wajib dapat meningkatkan kepatuhan pekerja secara signifikan [9].

Dalam aspek pemodelan risiko dan keandalan sistemik, literatur terkini (2020-2026) secara luas mengadopsi integrasi hibrida antara *Human Factors Analysis and Classification System* (HFACS) dan *Fuzzy Fault Tree Analysis* (FFTA) [14], [17], [18]. Meskipun HFACS efektif mengklasifikasikan kegagalan laten ke dalam empat tingkatan (*Unsafe Acts, Preconditions, Unsafe Supervision,* dan *Organizational Influences*), kerangka kualitatif ini memiliki keterbatasan karena tidak mampu melakukan kalkulasi probabilitas dan mengukur ketergantungan antar-faktor secara kuantitatif [13], [14], [18]. Penggabungan dengan FFTA berbasis *Triangular Fuzzy Numbers* (TFN), defuzifikasi COA, dan fungsi konversi Onisawa hadir sebagai solusi ilmiah yang valid untuk mengkuantifikasi probabilitas kegagalan puncak (*Top Event*) serta memetakan akar masalah paling kritis (*Minimal Cut Sets*) dalam kondisi ketidakpastian dan kelangkaan data historis [18], [19], [20].

METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif-deskriptif dengan menggunakan metode analisis akar penyebab masalah (*Root Cause Analysis/*RCA) yang terstruktur guna mengevaluasi dan mengidentifikasi akar masalah terkait K3 di lingkungan kerja. Dalam inspeksi K3, tingkat kedalaman analisis ditentukan melalui RCA *Rigor Matrix* yang berbasis pada tingkat keparahan (*impact*) dan frekuensi perulangan kejadian (*recurrence*) [2].



Gambar 1. RCA *Rigor Matrix*

Tingkat RCA	Dampak	Metode Pengumpulan Data & RCA yang Umum Digunakan	Rentang Analisis Tipikal*	Artefak Output (sesuai kebutuhan)
5	Tinggi-Tinggi	• Bagan KNOT • Lini Masa Acara • Pemetaan Proses • Pemetaan Penyebab • Diagram Tulang Ikan (Fishbone) • Analisis Sebab & Akibat Lanjutan • Analisis Pohon Masalah	2 - 6 Minggu (atau lebih lama)	• Temuan dan Kesimpulan RCA • Strategi Validasi dan Pengukuran • Ilustrasi Analisis Akar Masalah • Komunikasi di seluruh perusahaan
4	Tinggi-Sedang, Sedang-Tinggi	• Bagan KNOT • Lini Masa Acara • Pemetaan Proses • Pemetaan Penyebab • Diagram Tulang Ikan (Fishbone) • Analisis Sebab & Akibat Lanjutan	4 hari - 2 Minggu	• Temuan dan Kesimpulan RCA • Strategi Validasi dan Pengukuran • Ilustrasi Analisis Akar Masalah • Komunikasi Komunitas Pengguna
3	Tinggi-Rendah, Sedang-Sedang, Rendah-Tinggi	• Urun Rembuk • Lini Masa Acara • Pemetaan Penyebab • Diagram Tulang Ikan (Fishbone)	1 - 3 hari	• Temuan dan Kesimpulan RCA • Strategi Validasi dan Pengukuran • Ilustrasi Analisis Akar Masalah • Komunikasi kepada orang yang terdampak
2	Rendah-Sedang, Sedang-Rendah	• 5-Mengapa • Urun Rembuk • Diagram Tulang Ikan (Fishbone)	0.5 - 1 hari	• Temuan dan Kesimpulan RCA • Komunikasi kepada orang yang terdampak
1	Rendah-Rendah	• 5-Mengapa • Urun Rembuk	1 - 4 jam	• Temuan dan Kesimpulan RCA • Komunikasi kepada orang yang terdampak

Gambar 2. Matriks Penentuan Metode RCA Berdasarkan *Impact* pada RCA *Rigor Matrix*

Fenomena ketidakpatuhan pada saat inspeksi lapangan dalam menggunakan APD yang terlihat secara luas pada ±50% pekerja pada area pemilahan sampah dikategorikan sebagai kejadian atau kegagalan yang telah berulang kali terjadi dalam riwayat produksi atau operasional perusahaan sehingga datanya sudah sangat familiar bagi tim. Hal ini menimbulkan potensi risiko kesehatan gangguan kecil atau ketidaksesuaian standar (tidak fatal, namun tetap sebuah kesalahan) serta berdampak pada sejumlah orang dalam rentang tertentu. Berdasarkan parameter tersebut, penelitian ini diklasifikasikan ke dalam investigasi RCA level 4 [2], [21].

Klasifikasi level 4 RCA menentukan bahwa analisis tidak boleh berhenti pada gejala luar atau tindakan tidak aman yang dilakukan pekerja di lini depan. Investigasi harus menembus tingkat Defisiensi Sistem Manajemen (*Management System Deficiencies*) yang termasuk pada SPACs *Deficiency* untuk mengidentifikasi kelemahan pada standar, kebijakan, prosedur, dan kontrol administratif perusahaan [1].

Lokasi, Subjek Penelitian, dan Penentuan Panel Pakar

Penelitian ini dilaksanakan di area operasional pemilahan manual TPA. Untuk menjamin keandalan data dan mengeliminasi bias pengamatan, subjek penelitian dikelompokkan menjadi 2 kategori utama:

1. Responden Operasional Lapangan: Populasi pekerja pemilah sampah manual tercatat sebanyak N = 60 orang. Penentuan sampel wawancara dan observasi menggunakan teknik *Purposive Sampling* dengan jumlah sampel sebanyak n = 30 pekerja (50% dari total populasi) yang terdistribusi secara proporsional pada 3 shift kerja operasional.
2. Panel Pakar: Penilaian gerbang logika *boolean* (*AND/OR Gate*) serta fuzifikasi probabilitas *Basic Event* pada C/FTA dilakukan oleh panel pakar yang terdiri dari N = 4 orang. Panel pakar dipilih menggunakan teknik *Purposive Expert Sampling* dengan kriteria inklusi: (a) Pengalaman kerja > 5 tahun di bidang K3 atau operasional pengelolaan sampah, (b) Memiliki sertifikasi Ahli K3 Umum, dan (c) Memahami alur proses operasional TPA. Komposisi pakar terdiri dari: 1 Ahli K3 Akademisi, 1 Koordinator K3 Kawasan TPA, 1 Supervisor Operasional Area Pemilahan, dan 1 Penanggungjawab Gudang Logistik APD [14].

Adapun peran masing-masing subjek penelitian pada operasional TPA adalah sebagai berikut:

1. Pekerja Pemilah Sampah Manual sebagai pelaksana langsung aktivitas pemilahan di garis depan [1], [2].
2. Supervisor Operasional Area Pemilahan bertanggung jawab langsung atas pengarahan, kontrol harian, dan kedisiplinan kerja di lapangan [2].
3. Koordinator K3 Kawasan TPA bertugas mengawasi penerapan standar K3 dan pengelolaan risiko lingkungan kerja secara menyeluruh [2], [3].
4. Penanggungjawab Gudang Logistik APD bertugas mengelola ketersediaan, penyimpanan, dan rantai pasok alokasi APD bagi pekerja [2].

Objek penelitian ini difokuskan pada tingkat kepatuhan perilaku serta kelaikan kondisi fisik dari 5 APD wajib untuk pemilahan sampah [3], [4] yaitu:

1. Pakaian pelindung berlengan panjang (*wearpack*).
2. Masker respirator filter ganda untuk perlindungan saluran pernapasan.
3. Sarung tangan karet tebal berbahan *heavy-duty nitrile* untuk mencegah luka tusuk dan resapan lindi.
4. Sepatu *boots* safety anti-air untuk mengantisipasi bahaya slip dan tusukan benda tajam di lantai.
5. Apron anti-air untuk mengisolasi tubuh pekerja dari cipratan kontaminan basah.

Prosedur Pengumpulan Data

Untuk menjamin bahwa data yang dikumpulkan bersifat valid dan objektif, penelitian ini menggunakan 3 pilar kontrol kualitas data:

1. Triangulasi 5 jenis data: Sesuai standar pengumpulan data RCA, verifikasi dilakukan dengan uji silang lima jenis data terkait yaitu (a) Data manusia yang diperoleh melalui formulir pernyataan awal saksi dan wawancara terstruktur dengan pekerja dan pengawas, (b) Data fisik mencangkup observasi dan pemeriksaan kelayakan APD yang digunakan pada area pemilahan, (c) Data dokumen mencakup penulusuran standar operasional K3, catatan

penerimaan/pengeluaran APD, laporan inspeksi harian serta rekap absensi *safety briefing*, (d) Data elektronik berupa basis data laporan K3 bulanan dan data pemantauan kualitas udara area kerja, serta (e) Data posisi seperti pengambilan foto/video posisi kerja pemilah di *conveyor belt*, peta denah stasiun pemilahan, serta tata letak fasilitas higienis dan gudang APD.

2. Prosedur wawancara bebas yang dirancang untuk menggali fakta pengamatan sensori langsung tanpa mengarahkan atau mengintimidasi responden.
3. Penerapan ceklis investigasi sebelum dan selama pengumpulan data. Peneliti mengisi daftar periksa yang bebas bias untuk memastikan bahwa seluruh hipotesis diperlakukan setara, serta mencegah tim investigasi membuat kesimpulan terlalu cepat.

Prosedur Pemilahan dan Validasi Data dengan KNOT Chart

Semua informasi dan temuan lapangan yang diperoleh akan diaudit menggunakan KNOT *Chart* untuk mengelompokkan tingkat keandalan data sebelum dimasukkan ke dalam diagram analisis, seperti disajikan pada Tabel 1.

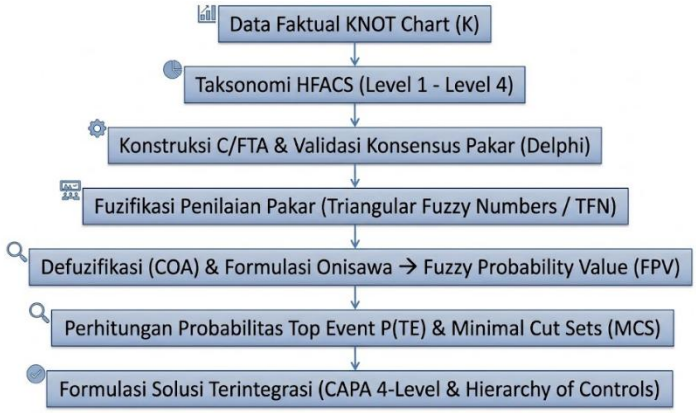
Tabel 1. KNOT *Chart* Klasifikasi Data Investigasi APD

ID Data	Deskripsi Informasi/ Temuan Lapangan	*K*	*N*	O	*T*	Tindakan Verifikasi (*Action Item*)
D1	Observasi: ±50% pekerja pemilah tidak menggunakan helm dan masker di Plant X	X				Fakta terverifikasi dengan observasi langsung
D2	Pekerja menyatakan masker *respirator* terasa pengap dan membuat sesak saat kerja berat			X		Uji kelaikan spesifikasi teknis masker dan wawancara sampel
D3	Stok *safety boots* ukuran standar pekerja seringkali kosong di gudang		X			Audit log pengeluaran barang gudang dan histori pengadaan
D4	Supervisor tidak memberikan teguran/sanksi bagi pekerja yang lalai menggunakan APD				X	Verifikasi via wawancara supervisor dan ceklis inspeksi harian
D5	Sarung tangan yang digunakan pekerja adalah kain biasa, bukan karet tebal anti-tusuk	X				Fakta terverifikasi dengan inspeksi fisik APD di lokasi
D6	SOP APD serta aturan *Reward* dan *Penalty* belum disosialisasikan ulang dalam 6 bulan terakhir		X			Periksa rekap absensi *safety briefing* dan log distribusi dokumen SOP

Aturan validasi yang digunakan pada KNOT Chart adalah Informasi yang berstatus *N (Need to Know), O (Opinion) dan T (Think We Know)* harus ditindaklanjuti dengan *Action Item*. Data tersebut hanya akan dianggap sebagai dasar bagi analisis RCA setelah melalui proses verifikasi dan dipindahkan ke kolom *K (Know).* Apabila hasil verifikasi menunjukkan bahwa informasi tersebut tidak akurat, data tersebut dapat dieliminasi [2].

Integrasi RCA Level 4, HFACS, dan Fuzzy C/FTA (FFTA)

Alur analisis sistemik dalam penelitian ini mengintegrasikan RCA Level 4, HFACS, dan *Fuzzy* C/FTA (FFTA) dengan tahapan seperti disajikan pada Gambar 3 .



Gambar 3. Tahapan Integrasi RCA Level 4, HFACS, dan *Fuzzy* C/FTA (FFTA)

Langkah Kuantifikasi Fuzzy FTA (FFTA)

1. Konversi skala Linguistik ke TFN: Penilaian pakar terhadap kemunculan *Basic Event* akan ditransformasikan ke dalam TFN $(low; medium; upper)$ dengan kriteria: (a) *Very Low* (0,0;0,1;0,3), (b) *Low* (0,1;0,3;0,5), (c) *Medium* (0,3;0,5;0,7), (d) *High* (0,5;0,7;0,9), dan (e) *Very High* (0,7;0,9;1,0) [14].
2. Agregasi Opini Pakar: Nilai TFN dari $N = 4$ pakar dihitung dengan operator rerata *Fuzzy*:

$$\tilde{A}_{avg} = \left(\frac{\sum l_i}{N}, \frac{\sum m_i}{N}, \frac{\sum u_i}{N}\right) \quad (1)$$

3. Defuzifikasi *Center of Area* (COA): Konversi rerata *Fuzzy* teragregasi ke *Fuzzy Possibility Score* (FPS) [17]:

$$FPS = \frac{l+2m+u}{4} \quad (2)$$

4. Konversi FPS ke *Fuzzy Probability Value* (FPV): Menghitung FPV dengan menggunakan fungsi Onisawa untuk mendapatkan probabilitas kegagalan kuantitatif [18], [20], [23]:

$$FPV = \frac{1}{10^K} \quad (3)$$

dimana

$$K = \left(\frac{1-FPS}{FPS}\right)^{1/3} \times 2.3026 \quad (4)$$

5. Perhitungan Gerbang Logika *Boolean* [10], [14]:

Gerbang OR: $P_{OR} = 1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - FPV_i)$ (5)

Gerbang AND: $P_{AND} = \prod_{i=1}^{n} F\,PV_i$ (6)

Formulasi Rekomendasi (CAPA 4-Level)

Rekomendasi tindakan perbaikan dan pencegahan dirumuskan menggunakan kerangka CAPA 4-Level yang diselaraskan dengan standar *Hierarchy of Controls* pada ISO 45001:2018 yaitu (1) Level 1 (Faktor Penyebab Langsung/Pengendalian) yaitu melakukan pengamanan secara langsung di lokasi, seperti penyediaan APD, (2) Level 2 (Tindakan Perbaikan Masalah Spesifik) seperti perbaikan yang bersifat fisik dan prosedural khusus, (3) Level 3 (Lingkup Kondisi/Meneruskan) yaitu meningkatkan pemeriksaan K3 dan pengelolaan kelengkapan APD di area kerja lainnya yang mungkin memiliki risiko yang sama, (4) Level 4 (Sistem Manajemen/Tindakan Pencegahan) yaitu perbaikan yang bersifat permanen pada sistem manajemen, termasuk persetujuan prosedur SOP APD yang baru, penerapan aturan *reward* dan *penalty*, serta integrasi akuntabilitas K3 ke dalam indikator kinerja utama (KPI) harian supervisor [1], [3], [20] .

HASIL DAN PEMBAHASAN

Investigasi K3 di lokasi pembuangan sampah secara manual dimulai dengan mengumpulkan semua item hasil temuannya menggunakan teknik triangulasi 5 kategori data. Semua informasi yang diperoleh diaudit dengan menggunakan instrumen KNOT *Chart* untuk membedakan fakta yang objektif dari pendapat dan spekulasi, dengan tujuan untuk menghindari bias konfirmasi serta perbaikan sasaran.

Hasil Temuan Audit Pengelolaan K3 dan APD

Tabel 2. KNOT *Chart* Setelah Pelaksanaan Audit Pengelolaan K3 dan APD di Area Pemilahan

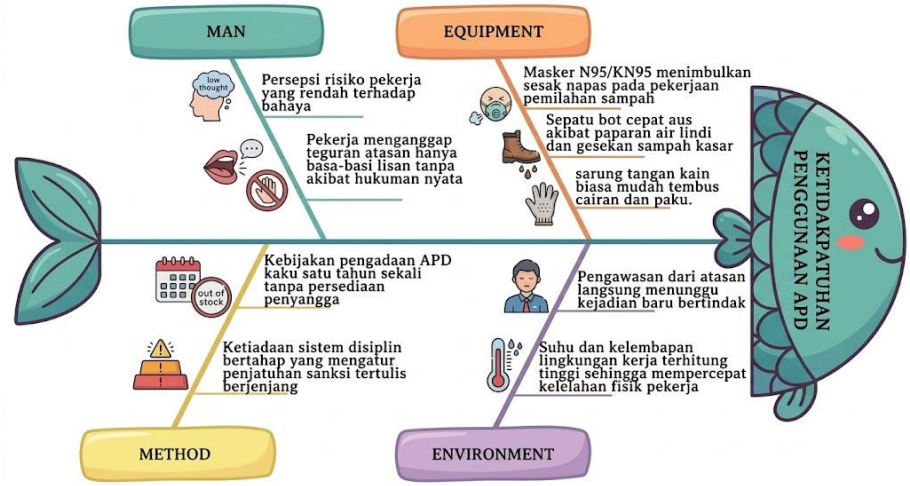
ID Temuan	Deskripsi Temuan Lapangan	Status Awal	Tindakan Audit/Verifikasi (*Action Item*)	Status Akhir
D1	Observasi: ±50% pekerja pemilah sampah manual bekerja tanpa dilengkapi 5 APD wajib (helm, masker, sarung tangan karet tebal, sepatu *boots*, *apron* anti-air, dan *wearpack*)	*Know* (K)	*Sampling* observasi harian pada 3 *shift* kerja operasional area pemilahan	*Know* (K)

 https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i2.2081

ID Temuan	Deskripsi Temuan Lapangan	Status Awal	Tindakan Audit/Verifikasi (*Action Item*)	Status Akhir
D2	Pemakaian masker N95/KN95 dan *respirator* dihindari pekerja karena pengap dan panas saat kerja fisik berat; *Respirator reusable* dihindari manajemen karena tingginya biaya pengadaan	*Opinion* (O)	Wawancara pekerja pemilah dan uji kelaikan spesifikasi teknis resistensi napas	*Know* (K)
D3	Tim K3 mengambil langkah kompromi dengan menyediakan masker medis (3-ply) yang selalu standby di Pos K3 agar pekerja tetap mau memakai pelindung pernapasan yang *breathable*	*Need to Know* (N)	Audit log distribusi logistik K3 dan verifikasi ketersediaan harian masker medis di Pos K3	*Know* (K)
D4	*Safety boots* cepat aus/rusak akibat gesekan dan air lindi sebelum 1 tahun, sementara stok gudang kosong karena pengadaan kaku 1 tahun sekali mengikuti pencairan dana tahunan	*Need to Know* (N)	Audit histori pencairan anggaran K3, catatan keluar-masuk gudang APD, dan evaluasi masa pakai *boots* di lapangan	*Know* (K)
D5	*Supervisor* telah memberikan teguran lisan di lapangan, tetapi tidak pernah menerbitkan sanksi tertulis atau *safety ticket* yang memberi efek jera	*Think We Know* (T)	Wawancara *supervisor*, audit buku rekap sanksi K3, dan pemeriksaan rekam jejak teguran tertulis	*Know* (K)
D6	Pekerja masih menggunakan sarung tangan kain biasa (bukan nitril/karet tebal) yang tembus lindi karena kurangnya sarana; SOP *Progressive Disciplinary System* dan aturan *reward* dan *penalty* belum disosialisasikan kembali	*Need to Know* (N)	Inspeksi fisik sampel APD terpakai dan periksa dokumen SOP K3 serta rekap absensi *safety briefing*	*Know* (K)

Analisis Akar Masalah

Data faktual yang berstatus K dipetakan ke dalam *Fishbone Diagram* untuk memetakan kelompok pemicu ketidakpatuhan APD dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Analisis Akar Masalah dengan *Fishbone Diagram*

Analisis Kuantifikasi Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA)

Pemetaan hubungan antara kode audit bagan KNOT, BE1-BE9 serta berdasarkan agregasi penilaian panel pakar dan perhitungan fungsi Onisawa, nilai *Fuzzy Probability Value* (FPV) untuk setiap *Basic Event* disajikan pada Tabel 3. Enam fakta (D_1-D_6) dari KNOT *chart* kemudian lebih lanjut diuraikan menjadi sembilan akar masalah (BE_1-BE_9) untuk analisis dan pengukuran probabilitas FFTA, sebagaimana digambarkan dalam diagram kausalitas pada Gambar 5.

Tabel 3. Kuantifikasi Probabilitas *Fuzzy* pada *Basic Event* (BE_1-BE_9)

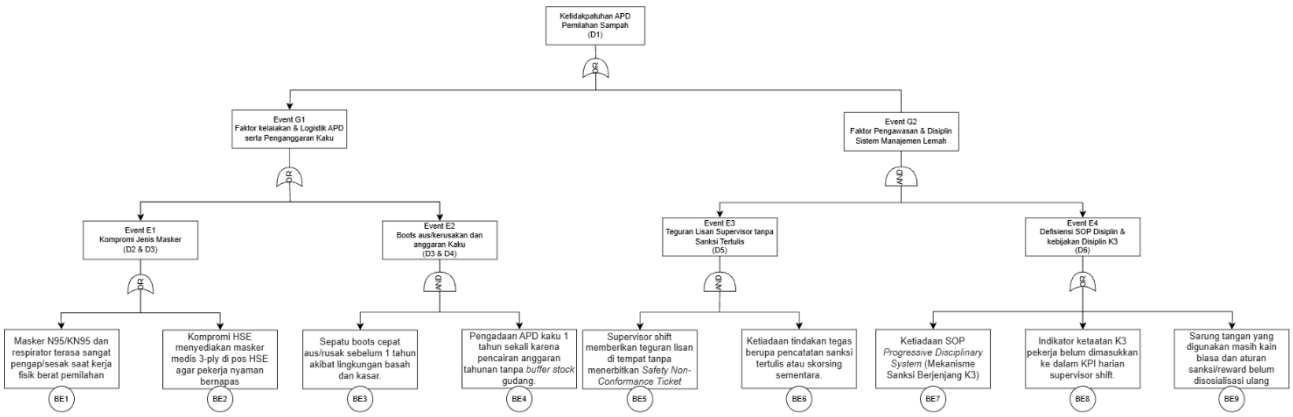
ID BE	Deskripsi *Basic Event*	ID Temuan	Level HFACS	Agregasi TFN	Nilai FPS	Nilai FPV
BE_1	Masker N95/KN95 pengap dan sesak saat kerja berat	D1	*Preconditions*	(0,50;0,70;0,85)	0,69	0,0383
BE_2	Langkah kompromi Bagian K3 menyediakan masker 3-ply	D1	*Preconditions*	(0,30;0,50;0,70)	0,50	0,0166
BE_3	Sepatu *boots* cepat aus akibat lingkungan basah lindi	D2	*Preconditions*	(0,55;0,75;0,90)	0,74	0,0452
BE_4	Pengadaan APD kaku setahun sekali tanpa *buffer stock*	D3	*Organizational*	(0,65;0,85;0,98)	0,83	0,0581
BE_5	Supervisor hanya memberi teguran lisan di tempa	D4	*Supervision*	(0,50;0,70;0,85)	0,69	0,0383
BE_6	Ketiadaan tindakan tegas/sanksi skorsing sementara	D5	*Supervision*	(0,45;0,65;0,80)	0,64	0,0315
BE_7	Ketiadaan SOP *Progressive Disciplinary System* K3	D6	*Organizational*	(0,60;0,80;0,95)	0,79	0,0482
BE_8	Ketaatan K3 belum dimasukkan ke KPI supervisor	D6	*Supervision*	(0,45;0,65;0,85)	0,65	0,0334
BE_9	Sarung tangan kain biasa dan aturan belum disosialisasikan	D6	*Preconditions*	(0,35;0,55;0,75)	0,55	0,0217

Meskipun pembentukan *buffer stock* sebesar 20% dengan menggunakan mekanisme *Reorder Point* (ROP) secara teori merupakan solusi permanen untuk menghilangkan risiko kehabisan stok APD (BE4), penerapan sistem ini di tempat pembuangan sampah umum menghadapi tantangan birokrasi dan administrasi yang kompleks. Dari sudut pandang operasional, pengelolaan tempat pembuangan sampah di bawah yurisdiksi departemen atau pemerintah daerah sangat bergantung pada alokasi anggaran tahunan, di mana pencairan dana untuk APD sangat bergantung pada siklus persetujuan anggaran daerah (APBD), serta pada peraturan publik yang mengatur pengadaan barang dan jasa. Kekakuan administratif ini membatasi fleksibilitas pengelolaan tempat pembuangan akhir dalam melakukan pembelian APD secara mendesak atau mencairkan dana darurat ketika kondisi APD yang aus dan rusak melebihi perkiraan akibat paparan terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem di tempat pembuangan akhir.

Untuk mengatasi hambatan birokratis ini tanpa mengorbankan kelangsungan perlindungan pekerja, tim manajemen keselamatan dan kesehatan kerja tempat pembuangan akhir harus mengembangkan mekanisme pengadaan yang adaptif. Solusi administratif yang realistis meliputi: (1) kewajiban memasukkan klausul stok cadangan sebesar 20 persen dalam kontrak pengadaan APD tahunan dengan pihak ketiga (pemasok) dimana pemasok diwajibkan untuk menyimpan stok cadangan di gudang lokal dan pembayaran dilakukan berdasarkan barang yang diambil; serta (2) mereformasi prosedur operasional untuk distribusi logistik dengan menyiapkan dana diskresioner darurat untuk keselamatan dan kesehatan kerja, yang disetujui oleh manajemen lembaga. Penekanan pada tantangan birokratis ini menunjukkan bahwa keberhasilan reformasi keselamatan dan kesehatan kerja di TPA tidak hanya bergantung pada ketepatan model matematis keselamatan dan kesehatan kerja, tetapi juga pada kecerdasan manajerial untuk mengatasi hambatan administratif di sektor publik secara legal dan berkelanjutan.

Rantai sebab akibat dapat dianalisis dengan menggunakan *Fuzzy Fault Tree Analysis* (FFTA) yang berlandaskan logika *Boolean* (*AND/OR Gate*) untuk mengidentifikasi kombinasi pemicu utama (*Minimal Cut Sets*) disajikan pada Gambar 5.

 https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i2.2081



Gambar 5. *Fuzzy Fault Tree Analysis* (FFTA)

Penjelasan *Minimal Cut Sets* (MCS):

1. MCS 1 (Pelanggaran dan Logistik APD): {(BE_1 OR BE_2) AND (BE_3 AND BE_4)} menunjukan APD tidak ergonomis atau *safety boots* cepat aus AND pengadaan kaku 1 tahun sekali tanpa stok cadangan yang memadai di gudang.
2. MCS 2 (Pengawasan dan Disiplin Sistemik): {(BE_5 AND BE_6) AND (BE_7 OR BE_8 OR BE_9)} menunjukan bahwa teguran supervisor hanya sebatas lisan tanpa sanksi tertulis AND manajemen tidak memiliki SOP disiplin berjenjang serta KPI K3.

Melalui substitusi nilai FPV ke dalam logika *Boolean* seperti pada Gambar 5, dapat dilakukan Perhitungan *Top Event Probability* $P(TE)$:

- Cabang Logistik (G_1):
  $P(E_1) = 0{,}05426$; $P(E_2) = FPV_{BE3} \times FPV_{BE4} = 0{,}0452 \times 0{,}0581 = 0{,}002626$.
  Maka $P(G_1) = 1 - (1 - 0{,}05426)(1 - 0{,}002626) = 0{,}05675$.
- Cabang Pengawasan (G_2):
  $P(E_3) = 0{,}001206$; $P(E_4) = 0{,}009995$.
  Maka $P(G_2) = 0{,}001206 \times 0{,}09995 = 0{,}0001206$.
- *Top Event* (TE - Ketidakpatuhan APD Massal):
  $P(TE) = 1 - \big(1 - P(G_1)\big)\big(1 - P(G_2)\big) = 0{,}05686$ (5,69%).

Hasil kuantifikasi ini membuktikan secara empiris bahwa peluang terjadinya ketidakpatuhan APD massal mencapai 5,69%. Pemicu paling dominan tidak terletak pada kesalahan individu pekerja semata, melainkan didorong oleh BE_4 (Sistem Pengadaan Kaku, $FPV = 0.058$) dan BE_7 (Ketiadaan SOP *Progressive Disciplinary System*, $FPV = 0.048$).

Pembahasan Kausalitas Bertingkat Berbasis Kerangka HFACS

Hasil sintesis RCA Level 4 dan C/FTA kemudian diklasifikasikan ke dalam 4 tingkatan HFACS untuk membedah rantai interaksi antara faktor manusia, pengawasan, dan keputusan manajemen:

1. Level 1 (*Unsafe Acts*): Terwujud dalam bentuk pelanggaran rutin oleh ±50% pekerja yang sengaja melepas helm, masker, dan sarung tangan saat memilah sampah (D_1).
2. Level 2 (*Preconditions for Unsafe Acts*): Pelanggaran pekerja dipicu oleh ketidaknyamanan fisik dan lingkungan kerja yang ekstrim. Masker N95/KN95 dapat menyebabkan beban termal dan hambatan pernapasan saat pekerja melakukan kerja berat (BE_1/D_2), sementara safety *boots* cepat rusak akibat gesekan dengan sampah dan paparan air lindi (BE_3/D_4).
3. Level 3 (*Unsafe Supervision*): Supervisor menunjukkan pola pengawasan pasif-reaktif. Teguran yang diberikan hanya sebatas lisan tanpa menerbitkan *Safety Non-Conformance Ticket* (BE_5/D_5), karena ketaatan K3 belum diintegrasikan ke dalam KPI harian supervisor (BE_8/D_6).
4. Level 4 (*Organizational Influences*): Berada di puncak hierarki sebagai kegagalan laten utama. Kebijakan pengadaan APD kaku tahunan tanpa *buffer stock* memadai (BE_4/D_4) serta belum disahkannya SOP *Progressive Disciplinary System* (BE_7/D_6) menjadi bukti nyata defisiensi pada sistem manajemen (SPACs *Deficiency*).

Rekomendasi Terintegrasi (CAPA 4-Level)

Rekomendasi tindakan korektif serta pencegahan dirumuskan berdasarkan model CAPA 4-Level untuk mengubah sistem manajemen secara permanen dapat di lihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Formulasi Rekomendasi Terintegrasi (CAPA 4-Level)

ID Akar Masalah	Level HFACS	Akar Masalah	Intervensi Rekayasa dan Manajerial (*Hierarchy of Controls*)	Indikator Keberhasilan
BE_1/BE_2	*Preconditions* (*Physical Environment*)	Masker N95 menimbulkan *thermal stress* dan *breathing resistance* tinggi	*Engineering* dan *PPE Redesign*: Substitusi unit APD pernapasan dari respirator cangkir pejal ke respirator setengah wajah berventilasi yang memenuhi standar filtrasi bioaerosol namun memiliki hambatan pembuangan napas yang rendah	Penurunan *thermal discomfort score* >40%; tingkat pemakaian masker harian 100%
BE_3/BE_4	*Organizational Influences* (*Resource Management*)	*Safety boots* cepat rusak akibat lindi; pengadaan kaku tahunan tanpa *buffer stock*	*Supply Chain* dan *Material Engineering*: Redesain spesifikasi material *boots* (komposit *polyurethane/nitrile rubber* tahan asam/lindi) dan penerapan *Min-Max Inventory Control* dengan *Reorder Point* (ROP) berbasis sistem terintegrasi	*Zero stock-out rate* APD di gudang; efisiensi biaya penggantian APD tahunan
BE_5/BE_6/BE_7	*Unsafe Supervision dan Organizational*	Supervisor pasif; tiada *Progressive Disciplinary System* dan sanksi tertulis	*Administrative* dan *Digital Controls*: Digitalisasi pengawasan melalui aplikasi *Mobile Safety Ticket* dan penyusunan SOP *Progressive Disciplinary System* (SP1-SP3 dan potong insentif)	100% pelanggaran tercatat *real-time*; peningkatkan indeks akuntabilitas supervisor
BE_8	*Unsafe Supervision*	Ketaatan K3 belum masuk KPI supervisor	*Organizational Governance*: Restrukturisasi penilaian kinerja supervisor dengan bobot KPI K3 sebesar minimal 20% dari total insentif bulanan	*Safety scorecard* terintegrasi dalam skema *Performance Appraisal*

Formulasi rekomendasi terintegrasi CAPA 4-Level di atas menandakan adanya perubahan besar dalam cara menangani keselamatan kerja di sektor pemilahan sampah manual, yaitu dengan mengalihkan perhatian dari sekadar menyalahkan pekerja individu menuju peningkatan menyeluruh dalam Sistem Manajemen. Penanganan yang hanya mengandalkan respon darurat di lapangan tanpa memperbaiki kebijakan manajerial terbukti hanya menghasilkan hasil sementara, sehingga pelanggaran penggunaan APD akan terus berulang dalam pola yang sama. Analisis terhadap *Basic Event* BE_1 dan BE_2 menunjukkan bahwa penurunan kepatuhan terhadap peraturan perlindungan pernapasan di kalangan petugas pemilah di tempat pembuangan akhir disebabkan oleh penumpukan panas dan resistansi pernapasan yang tinggi akibat penggunaan masker standar model cangkir tanpa sirkulasi udara. Dari perspektif kesehatan dan keselamatan kerja, beralih ke masker medis 3-lapis tidak direkomendasikan, karena masker tersebut tidak dirancang untuk menyaring bioaerosol, spora jamur, dan partikel halus di lingkungan tempat pembuangan akhir. Solusi ergonomis yang tepat adalah mengganti alat pelindung tersebut dengan respirator setengah wajah (*half-mask respirator*) yang dilengkapi katup pernafasan (*exhalation valve*). Katup pernafasan berfungsi sebagai katup satu arah (*one-way valve*), katup ini terbuka saat menghembuskan napas memungkinkan udara hangat dan uap air keluar dari dalam masker dan menutup rapat saat menghirup napas untuk memastikan bahwa kinerja filter terhadap partikel berbahaya tetap memenuhi standar keselamatan. Langkah ergonomis ini secara signifikan mengurangi stres termal dan hambatan pernapasan tanpa mengorbankan efektivitas perlindungan terhadap kontaminan yang tersebar di udara.

Melalui pendekatan bertahap ini, intervensi dimulai dengan langkah pengamanan langsung (*Level 1 Containment*) untuk memutus rantai risiko paparan bahaya sehari-hari melalui Pos K3 serta penyediaan APD darurat. Selanjutnya, tindakan perbaikan spesifik (*Level 2 Specific Action*) secara tepat menyelesaikan kesenjangan fisik dan operasional (dengan memperbarui spesifikasi APD ke tipe yang lebih tahan lama dan ergonomis seperti sepatu *boots heavy-duty*, masker yang *breathable*, serta sarung tangan karet tebal anti-tusuk serta dilengkapi dengan penerapan *Safety Non-Conformance Ticket* saat teguran lisan diberikan. Perluasan lingkup (*Level 3 Read-Across*) kemudian memastikan bahwa standar kelayakan fasilitas dan mekanisme pengawasan K3 serupa diterapkan secara konsisten di area operasional pendukung lainnya.

 https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i2.2081

Puncak dari pengelolaan keberlanjutan K3 terletak pada upaya pencegahan berbasis sistem (*Level 4 Management System).* Dengan mengubah kebijakan anggaran dari sistem tahunan yang kaku menjadi sistem pengadaan berdasarkan persediaan bersama dengan penyediaan dana cadangan K3, masalah kekurangan stok APD akibat cepatnya keausan alat bisa dihilangkan secara permanen. Persetujuan SOP *Progressive Disciplinary System* yang imparsial dan transparan, ditambah dengan pengintegrasian kepatuhan K3 dalam KPI harian untuk supervisor *shift*, memberikan kepastian hukum serta tanggung jawab dalam pengawasan di lapangan. Pendekatan menyeluruh terhadap seluruh tingkatan CAPA ini tidak hanya memastikan kepatuhan terhadap peraturan K3 yang ada, tetapi juga mengembangkan budaya keselamatan yang berkelanjutan di wilayah pembuangan sampah akhir.

Meskipun sejalan dengan literatur K3 sebelumnya dalam menyoroti risiko bahaya kerja di sektor informal serta penerapan model kausalitas HFACS-FFTA, studi ini menghadirkan inovasi signifikan melalui integrasi model hibrida RCA Level 4 serta audit fakta menggunakan KNOT *Chart*, HFACS, dan *Fuzzy* FTA Onisawa untuk mengungkap fenomena ketidakpatuhan APD secara massal di area pemilahan sampah manual TPA. Berbeda dari penelitian konvensional yang hanya melihat ketidakpatuhan sebagai kelalaian individu pekerja, studi ini membuktikan secara kuantitatif bahwa nilai probabilitas kegagalan $P(TE) = 5{,}69\%$ disebabkan oleh defisiensi tersembunyi pada level Sistem Manajemen khususnya kaku nya sistem pengadaan APD tanpa *buffer stock* (BE4) serta ketiadaan SOP *Progressive Disciplinary System* (BE7). inovasi ini menghasilkan matriks rekomendasi terintegrasi CAPA 4-Level.

KESIMPULAN DAN SARAN

Ketidakpatuhan penggunaan APD di area pemilahan sampah manual TPA tergolong massal (±50%) dan dipicu oleh beban termal serta rasa pengap akibat penggunaan respirator pejal tanpa katup sirkulasi. Pengadaan masker respirator berventilasi yang lebih ergonomis serta disalurkan secara teratur di Pos Cekpoin K3 terbukti menjadi solusi rekayasa dan manajerial yang tepat dalam menjaga tingkat kepatuhan pekerja tanpa mengorbankan standar isolasi bioaerosol dan kontaminan udara. Hasil kuantifikasi *Fuzzy* FTA menunjukkan probabilitas ketidakpatuhan APD massal sebesar P(TE) = 5,69%. Akar masalah paling kritis berakar pada dua defisiensi utama Sistem Manajemen, yaitu sistem pengadaan APD kaku tanpa *buffer stock* (BE_4: FPV = 0,0581) dan ketiadaan SOP *Progressive Disciplinary System* K3 (BE_7: FPV = 0,0482).

Penanganan ketidakpatuhan dituntaskan melalui matriks CAPA 4-Level yang mencakup penyediaan Pos Cekpoin K3 harian (*Containment*), penerapan *Safety Non-Conformance Ticket* (*Specific Action*), replikasi standar K3 ke seluruh TPA (*Read-Across*), serta penetapan *buffer stock* logistik 20%, SOP sanksi berjenjang, dan integrasi bobot K3 ke dalam KPI harian supervisor (*Management System*).

Disarankan agar pihak pengelola tempat pembuangan akhir dapat meninjau spesifikasi pengadaan APD pernapasan agar mencakup respirator pemurni udara, menetapkan persediaan cadangan sebesar 20% dengan klausul kontrak untuk *Vendor-Managed Inventory* (VMI), serta menyetujui prosedur operasional standar (SOP) untuk Sistem Disiplin Bertahap yang terintegrasi dengan indikator kinerja utama (KPI) para supervisor.

Disarankan agar penelitian di masa mendatang mengintegrasikan model *Fuzzy* FTA ini dengan analisis tekno-ekonomi investasi keselamatan dan kesehatan kerja guna mengukur kelayakan finansial dari pembuatan sistem stok cadangan dan pengadaan APD ergonomis, mengingat potensi penurunan biaya kompensasi akibat kecelakaan kerja dan penyakit akibat kerja di sektor pengolahan limbah.

DAFTAR PUSTAKA

[1] L. N. Vanden Heuvel, D. K. Lorenzo, L. O. Jackson, W. E. Hanson, J. J. Rooney, and D. A. Walker, “Root Cause Analysis Handbook: A Guide to Efficient and Effective Incident Investigation*,”* Rothstein Publishing, 2008.

[2] R. J. Duphily, “Root Cause Investigation Best Practices Guide,” AEROSPACE, Chantilly, VA, May 2014.

[3] International Organization for Standardization, “ISO 45001:2018 Occupational Health and Safety Management System Requirements with Guidance for Use,” 2018.

[4] Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Republik Indonesia, "Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Nomor PER.08/MEN/VII/2010 tentang Alat Pelindung Diri," Kementerian Tenaga Kerja dan Transmigrasi RI, 2010.

[5] S. Y. Lissah, M. A. Ayanore, J. K. Krugu, M. Aberese-Ako, and R. A. C. Ruiter, "Assessing The Socio-cognitive Determinants of Personal Protective Equipment Uses among Domestic Waste Collectors in the Ho Municipality, Ghana: A Cross-sectional Study," *PLoS One*, vol. 20, no. 11, Nov. 2025, doi: 10.1371/journal.pone.0334542.

[6] M. Khurram *et al.*, "Artificial Intelligence in Manufacturing Industry Worker Safety: A New Paradigm for Hazard Prevention and Mitigation," *Processes*, vol. 13, no. 5, May 2025, doi: 10.3390/pr13051312.

[7] N. Singh, Y. Tang, and O. A. Ogunseitan, "Environmentally Sustainable Management of Used Personal Protective Equipment," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 54, no. 14, Jul. 2020, doi: 10.1021/acs.est.0c03022.

[8] F. B. Setyawan, S. Supriyanto, E. Ernawaty, and R. Lestari, "Developing a Holistic-comprehensive Assessment Model: Factors Contributing to Personal Protective Equipment Compliance Among Indonesian Cement Workers," *Indian J. Occup. Environ. Med.*, vol. 24, no. 1, Jan 2020, doi: 10.4103/ijoem.IJOEM_115_19.

[9] D. Bulafu *et al.*, "Utilization of Personal Protective Equipment Among Sanitation Workers in Faecal-waste Management Plants in Cities in Uganda," *Frontiers in Environmental Health*, vol. 4, Jun. 2025, doi: 10.3389/fenvh.2025.1534012.

[10] P. Aghaei, G. Asadollahfardi, and A. Katabi, "Safety Risk Assessment in Shopping Center Construction Projects Using *Fuzzy* Fault Tree Analysis Method," *Qual. Quant.*, vol. 56, no. 1, Feb. 2022, doi: 10.1007/s11135-021-01115-9.

[11] A. C. V. Parawansa, N. Cimera, A. R. Y. Prayogi, and D. N. Haqi, "The Relationship between Personal Factors and Behavior of Using Personal Protective Equipment on Workers," *Indonesian Journal of Occupational Safety and Health*, vol. 11, no. 1, pp. 63-71, Mar. 2022, doi: 10.20473/ijosh.v11i1.2022.63-71.

[12] C. Dong, Y. Zhang, Z. Wang, J. Liu, and J. Zhang, "The hybrid systems method integrating STAMP and HFACS for the causal analysis of the road traffic accident," *Ergonomics*, vol. 67, no. 7, pp. 971-994, 2024, doi: 10.1080/00140139.2023.2270783.

[13] J. J. H. Liou, P. C. Y. Liu, S. S. Luo, H. W. Lo, and Y. Z. Wu, "A hybrid model integrating FMEA and HFACS to assess the risk of inter-city bus accidents," *Complex and Intelligent Systems*, vol. 8, no. 3, pp. 2451-2470, Jun. 2022, doi: 10.1007/s40747-022-00657-1.

[14] C. Lin *et al.*, "Applications of FFTA-HFACS for Analyzing Human and Organization Factors in Electric Misoperation Accidents.," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 19, Oct. 2021, doi: 10.3390/app11199008.

[15] Shappell, Scott and D. A. Wiegmann., "The Human Factors Analysis and Classification System: HFACS: Final Report," Civil Aeromedical Institute, 2000. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/21482.

[16] T. Onisawa, *Reliability and Safety Analyses under Fuzziness*, vol. 7 (1). Physica-Verlag HD, 1995. doi: 10.1007/978-3-7908-1898-7.

[17] W. Qiao, Y. Liu, X. Ma, and Y. Liu, "A Methodology to Evaluate Human Factors Contributed to Maritime Accident by Mapping *Fuzzy* FT into ANN Based on HFACS," *Ocean Engineering*, vol. 197, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106892.

[18] L. Wang, Y. Feng, L. Ye, Y. Mou, and Y. Wang, "Quantitative Assessment of Human Factors in Civil Aircraft Flight Test Risks Based on *Fuzzy* Bayesian Network and Improved HFACS Model," *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2026, no. 1, 2026, doi: 10.1155/ijae/8879803.

[19] A. Rostamabadi, M. Jahangiri, E. Zarei, M. Kamalinia, and M. Alimohammadlou, "A Novel *Fuzzy* Bayesian Network Approach for Safety Analysis of Process Systems; An Application of HFACS and SHIPP Methodology," *J. Clean. Prod.*, vol. 244, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118761.

[20] M. Yazdi, O. Korhan, and S. Daneshvar, "Application of *Fuzzy* Fault Tree Analysis Based on Modified *Fuzzy* AHP and *Fuzzy* TOPSIS for Fire and Explosion in The Process Industry," *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, vol. 26, no. 2, pp. 319-335, Apr. 2020, doi: 10.1080/10803548.2018.1454636.

[21] T. D. Smith, C. Mullins-Jaime, M. A. Dyal, and D. M. DeJoy, "Stress, Burnout and Diminished Safety Behaviors: An Argument for Total Worker Health Approaches in The Fire Service," *J. Safety Res.*, vol. 75, pp. 189-195, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jsr.2020.09.010.

[22] D. Okes, *Root Cause Analysis: The Core of Problem Solving and Corrective Action*, 2nd ed. Milwaukee, WI: ASQ Quality Press, 2019.

[23] A. Cem Kuzu, E. Akyuz, and O. Arslan, "Application of *Fuzzy* Fault Tree Analysis (FFTA) to Maritime Industry: A Risk Analysing of Ship Mooring Operation," *Ocean Engineering*, vol. 179, pp. 128-134, May 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.03.029.