



Literature Review: Budaya, Perilaku, dan Rekayasa Ketahanan dalam Manajemen Keselamatan di Era Industri 4.0

Ane Agustiana^{1)*}, Zahara Phonna²⁾, Yadi Hikmah Setiana³⁾

^{1), 2)}Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Subang. Blok Kaleng Banteng Desa Cibogo, Kec. Cibogo, Kabupaten Subang, Jawa Barat 41285, Indonesia

³⁾Teknik Mesin, Politeknik Negeri Subang. Blok Kaleng Banteng Desa Cibogo, Kec. Cibogo, Kabupaten Subang, Jawa Barat 41285, Indonesia

*email korespondensi: anneagust0814@gmail.com

INFORMASI ARTIKEL

Received:
09/05/2025

Received in revised:
18/05/2026

Accepted:
12/06/2025

ABSTRAK

Upaya yang bertujuan untuk meningkatkan keselamatan dalam sektor manufaktur terus-menerus menghadapi hambatan, terutama insiden yang dipicu oleh interaksi interpersonal dan faktor manusia. Menanggapi kesulitan ini, jurnal menggunakan metodologi yang komprehensif. Penelitian ini menggunakan tinjauan literatur dan analisis bibliometrik untuk memeriksa penggabungan ergonomi dan faktor manusia dalam desain keselamatan, serta pentingnya teknologi Industri 4.0 (seperti cloud computing dan Internet of Things) dalam manajemen keselamatan. Metode yang digunakan adalah Studi Literatur Sistematis (Systematic Literature Review) dengan menganalisis dari 6 jurnal internasional dan 1 artikel bereputasi untuk mengidentifikasi kebaruan dan tren dalam topik terkait, yaitu mengungkapkan bahwa budaya keselamatan secara signifikan dibentuk oleh kepatuhan dan kepemimpinan, sementara pelatihan pictogram meningkatkan pemahaman. Secara khusus, cloud computing dan IoT mewakili instrumen teknologi yang paling manjur. Meningkatnya fokus pada Rekayasa Ketahanan menggaris bawahi kekritisannya komitmen manajerial, kesadaran, dan kemampuan beradaptasi. Singkatnya, peningkatan keselamatan kerja memerlukan integrasi prinsip-prinsip desain, fortifikasi budaya keselamatan, dan penerapan teknologi kontemporer. Rekayasa Ketahanan menyajikan kerangka kerja yang menjanjikan untuk mendorong kemampuan beradaptasi sistem di masa depan.

Kata Kunci : Keselamatan Kerja, Industri 4.0, Faktor Manusia, Budaya Keselamatan, Resilience Engineering

ABSTRACT

Efforts aimed at enhancing safety within the manufacturing sector continually face obstacles, particularly incidents triggered by interpersonal interactions and human factors. In response to these difficulties, this journal employs a comprehensive methodology. This study uses a literature review and bibliometric analysis to examine the incorporation of ergonomics and human factors into safety design, as well as the significance of Industry 4.0 technologies (such as cloud computing and the Internet of Things) in safety management. The method used is a Systematic Literature Review, analyzing 6 and 1 article reputable international journals to identify novelty and trends in the related topic. The review reveals that safety culture is significantly shaped by compliance and leadership, while pictogram training enhances understanding. Specifically, cloud computing and the IoT represent the most potent technological instruments. The increasing focus on Resilience Engineering underscores the criticality of managerial commitment, awareness, and adaptability. In summary, the enhancement of occupational safety necessitates the integration of design principles, the fortification of safety culture, and the application of contemporary technologies. Resilience Engineering presents a promising framework for fostering future system adaptability.

Keywords : Occupational Safety, Industry 4.0, Human Factors, Safety Culture, Resilience Engineering

1. PENDAHULUAN

Keselamatan kerja menjadi aspek fundamental dalam menjamin keberlanjutan operasional industri, terutama di sektor manufaktur yang memiliki tingkat risiko kecelakaan lebih tinggi dibandingkan sektor lainnya. Meskipun berbagai kebijakan dan program keselamatan telah diterapkan, data global menunjukkan bahwa lebih dari 2,78 juta pekerja meninggal setiap tahun akibat kecelakaan kerja dan penyakit akibat kerja. Karena hal ini menunjukkan bahwa upaya peningkatan keselamatan perlu terus diperkuat melalui pendekatan yang lebih adaptif dan berorientasi pada faktor manusia serta teknologi (ILO, 2024).

Keselamatan kerja merupakan isu krusial yang terus menjadi tantangan di berbagai sektor industri, terutama di lingkungan yang berisiko tinggi seperti manufaktur dan konstruksi. Meskipun regulasi dan sistem manajemen keselamatan terus diperketat, statistik menunjukkan bahwa tingkat kecelakaan tidak menurun secara signifikan (Vigoroso et al., 2025). Menurut penelitian yang dilakukan oleh Ranasinghe et al., (2020) Masalah ini sering kali bersumber dari interaksi yang tidak memadai antara manusia dan sistem teknis, kurangnya perhatian terhadap faktor manusia, serta ketidakmampuan pendekatan manajemen keselamatan konvensional dalam menangani ketidakpastian dan kejadian yang tidak terduga.

Selain itu, elemen dasar keselamatan seperti pemahaman terhadap pictogram bahaya juga menjadi perhatian. Menurut Gungor., (2024) Pictogram adalah alat penting untuk mengkomunikasikan risiko, namun efektivitas pelatihan untuk meningkatkan pemahaman dan retensi pengetahuan terhadap simbol-simbol ini masih perlu dievaluasi secara mendalam. Di sisi lain, pembentukan budaya keselamatan yang kuat di tempat kerja sangat esensial. Hal ini mendorong penelitian untuk menilai dampak perilaku keselamatan, seperti kepatuhan dan kepemimpinan, terhadap pembentukan budaya keselamatan yang kokoh di industri manufaktur (Amirah et al., 2024).

Dengan munculnya teknologi baru seperti Industri 4.0, lanskap manajemen keselamatan mengalami transformasi. Namun, para praktisi masih menghadapi kesulitan dalam memilih teknologi yang paling sesuai untuk meningkatkan sistem keselamatan mereka. Oleh karena itu, diperlukan kerangka kerja untuk mengeksplorasi dan mengevaluasi teknologi ini, seperti *Internet of Things (IoT)* dan *Cloud*, guna mengoptimalkan manajemen keselamatan (Forcina et al., 2024).

Dalam konteks ini, perkembangan teknologi Industri 4.0 menawarkan peluang besar dalam transformasi sistem keselamatan kerja. Teknologi seperti *Internet of Things (IoT)* memungkinkan pemantauan kondisi kerja secara *real time*, sementara komputasi awan memfasilitasi penyimpanan dan analisis data keselamatan dalam skala besar (Forcina et al., 2024). Namun, implementasi teknologi tetap menghadapi tantangan dalam penyelarasan antara kemampuan teknis dan kesiapan sumber daya manusia, sehingga integrasi yang efektif memerlukan pemahaman menyeluruh mengenai interaksi manusia–mesin (Vigoroso et al., 2025).

Di luar pendekatan konvensional, konsep ketahanan (*resilience*) menjadi semakin penting untuk memahami bagaimana sistem dapat berfungsi dan beradaptasi menghadapi bencana alam atau buatan manusia (De luliis et al., 2024). Meskipun telah banyak penelitian, belum ada tinjauan komprehensif yang memetakan metode dan kerangka kerja untuk menilai ketahanan, khususnya dalam sistem teknik sipil dan komunitasnya (De luliis et al., 2024). Sejalan dengan itu, *Resilience Engineering (RE)* diusulkan sebagai alternatif manajemen keselamatan tradisional, namun identifikasi dan standardisasi indikator RE yang umum masih menjadi celah penelitian yang signifikan (Ranasinghe et al., 2020). Oleh karena itu, penelitian yang ada bertujuan untuk mengisi celah ini dan menyediakan wawasan yang lebih holistik mengenai peningkatan keselamatan kerja melalui berbagai dimensi, mulai dari aspek manusia hingga teknologi dan rekayasa sistem.

2. METODE

Menanggapi kesulitan yang ditimbulkan oleh faktor manusia dan interaksi interpersonal dalam keselamatan manufaktur, penelitian ini menggunakan metodologi yang komprehensif. Meskipun metode penelitian dalam literatur terkait umumnya bervariasi, diklasifikasikan ke dalam tiga pendekatan utama (analisis pustaka, pendekatan kuantitatif, dan pengembangan sistem pendukung keputusan), penelitian ini secara khusus mengadopsi Studi Literatur Sistematis (*Systematic Literature Review*) dan analisis bibliometrik.

Metode ini dipilih untuk mensintesis pengetahuan yang ada, memetakan tren penelitian, dan secara spesifik memeriksa penggabungan ergonomi dan faktor manusia dalam desain keselamatan, serta pentingnya teknologi Industri 4.0. Studi *Literatur* Sistematis dilakukan dengan menganalisis 6 jurnal internasional dan 1 artikel bereputasi untuk mengidentifikasi kebaruan dan tren dalam topik terkait. (Vigoroso *et al.*, 2025) menggunakan *scoping review* dan analisis bibliometrik untuk menginvestigasi bagaimana ergonomi dan faktor manusia diintegrasikan ke dalam desain untuk keselamatan. (Forcina *et al.*, 2024) melakukan tinjauan literatur sistematis sebagai dasar untuk memahami penerapan teknologi Industri 4.0. Sementara itu, (Ranasinghe *et al.*, 2020) juga menggunakan tinjauan literatur sistematis untuk mengidentifikasi indikator-indikator penting dari *Resilience Engineering* (RE). Terakhir, menerapkan metode bibliometrik dan visualisasi untuk memetakan status penelitian tentang ketahanan (*resilience*) dalam sistem teknik sipil.

Selain itu, dua jurnal menggunakan pendekatan kuantitatif untuk mengumpulkan data empiris. (Gungor, 2024) melakukan studi kuantitatif untuk mengevaluasi dampak pelatihan piktogram keselamatan dengan menguji 262 mahasiswa teknik sebelum dan sesudah sesi pelatihan. (Amirah *et al.*, 2024) juga menggunakan pendekatan kuantitatif, mengumpulkan data melalui kuesioner dari 342 karyawan dan menganalisisnya dengan *Structural Equation Modeling* (SEM) untuk menguji hubungan antara perilaku dan budaya keselamatan.

Terakhir, salah satu studi mengombinasikan tinjauan literatur dengan pengembangan sistem pendukung. (Forcina *et al.*, 2024) mengembangkan Sistem Pendukung Keputusan (DSS) berbasis TOPSIS untuk membantu praktisi memilih teknologi Industri 4.0 yang paling sesuai untuk manajemen keselamatan, yang kemudian divalidasi dengan studi kasus.

Penelitian-penelitian ini menggunakan beragam metode yang dipilih secara strategis untuk menjawab pertanyaan penelitian yang spesifik. Meskipun pendekatan berbeda, tujuannya sama untuk memberikan wawasan yang mendalam tentang keselamatan dan ketahanan di berbagai sektor. Metode yang digunakan dapat dikategorikan menjadi analisis literatur, pendekatan kuantitatif, dan pengembangan sistem pendukung keputusan.

2.1 Tabel Perbandingan Metode Penelitian

Berikut merupakan perbandingan metode penelitian yang dapat dilihat pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Tabel Perbandingan Metode Penelitian

No	Penulis (Tahun)	Topik Penelitian	Metode Penelitian	Temuan Utama	Kelemahan
1	Vigoroso <i>et al.</i> (2025)	Ergonomi & Design for Safety	Scoping Review + Analisis Bibliometrik	Memberikan pemetaan tema penelitian DfS dan integrasi HFE;	Tidak menghasilkan data empiris baru; bergantung pada kualitas literatur

				mengidentifikasi celah metodologi	
2	Gungor (2024)	Pelatihan Piktogram Keselamatan	Kuantitatif – Eksperimen (Pre–Post Test)	Pelatihan meningkatkan pemahaman jangka pendek; retensi menurun setelah 6 bulan	Sampel terbatas (mahasiswa); variabel eksternal sulit dikontrol
3	Forcina et al. (2024)	Industri 4.0 & Manajemen Keselamatan	Tinjauan Literatur + DSS (TOPSIS)	Cloud & IoT menjadi teknologi paling efektif untuk keselamatan; DSS membantu pengambilan keputusan	Validitas DSS bergantung pada kriteria; rancangan sistem kompleks
4	Amirah et al. (2024)	Budaya Keselamatan	Kuantitatif – SEM (Structural Equation Modeling)	Kepatuhan & kepemimpinan berpengaruh signifikan terhadap budaya keselamatan	Bergantung pada kualitas kuesioner; kausalitas sukar ditetapkan sepenuhnya
5	De luliis et al. (2024)	Ketahanan Sistem Teknik Sipil	Bibliometrik & Visualisasi	Menunjukkan tren penelitian resilience, kata kunci dominan, dan perkembangan model	Tidak menganalisis isi artikel secara mendalam; fokus meta-level
6	Ranasinghe et al. (2020)	Indikator Resilience Engineering	Tinjauan Literatur Sistematis	Mengidentifikasi 28 indikator RE; empat indikator utama: komitmen manajemen, kesadaran, pembelajaran, fleksibilitas	Tidak menghasilkan data baru; dibatasi oleh publikasi yang tersedia

Berdasarkan analisis terhadap enam jurnal yang dibandingkan, terlihat bahwa metode penelitian yang digunakan memiliki perbedaan yang cukup banyak, mulai dari wawasan literatur, pendekatan bibliometrik, hingga metode kuantitatif eksperimental dan struktural. Secara umum, penelitian yang menggunakan metode kuantitatif seperti eksperimen (Gungor, 2024) dan SEM (Amirah et al., 2024) memberikan temuan yang jelas dan bisa diukur, tetapi memiliki keterbatasan dalam hal generalisasi karena bergantung pada sampel dan kualitas alat yang digunakan.

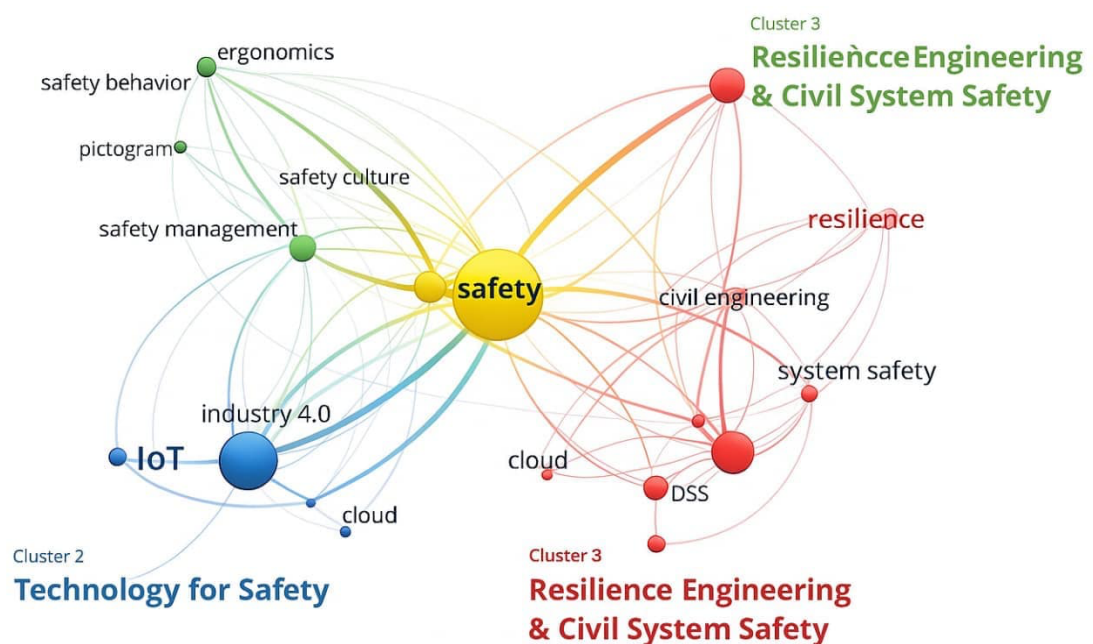
Metode pengamatan literatur sistematis dan bibliometrik (Vigoroso et al., 2025; De luliis et al., 2024; Ranasinghe et al., 2020) lebih baik dalam menunjukkan tren, celah, dan arah penelitian di bidang tertentu. Namun, metode ini tidak menghasilkan data baru dan sangat bergantung pada kualitas dan jumlah publikasi yang ada.

Penelitian yang menggunakan pendekatan pengambilan keputusan berbantuan komputer seperti TOPSIS (Forcina et al., 2024) mampu menganalisis pilihan secara mendalam dalam konteks keselamatan industri 4.0. Meskipun demikian, hasil yang diperoleh sangat bergantung pada pemilihan kriteria dan akurasi data yang digunakan

Secara keseluruhan, setiap metode memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Metode kuantitatif menghasilkan temuan yang operasional, metode bibliometrik memberikan gambaran ilmiah yang menyeluruh, sedangkan metode DSS memberikan rekomendasi yang didasarkan pada pemodelan. Oleh karena itu, pemilihan metode yang tepat harus disesuaikan dengan tujuan penelitian, data yang tersedia, serta tingkat analisis yang diinginkan.

2.1.1 Analisis Diagram Bibliometrik

Analisis bibliometrik digunakan dalam penelitian ini untuk membantu memahami secara menyeluruh struktur pengetahuan, tren penelitian, serta hubungan antar topik yang terjadi dalam literatur tentang keselamatan kerja, teknologi Industri 4.0, perilaku keselamatan, dan *Resilience Engineering*. Metode ini menggunakan pendekatan cooccurrence antar kata kunci untuk menggambarkan fokus tema, kluster penelitian utama, serta tingkat hubungan antar konsep yang muncul di enam jurnal yang diteliti. Dengan menerapkan pendekatan ini, penelitian dapat menampilkan pola hubungan secara sistematis, sehingga mempermudah pemahaman mengenai arah penelitian perkembangan, baik dari segi teknologi maupun faktor manusia, yang sangat penting dalam meningkatkan keselamatan dan ketahanan sistem. bibliometrik dapat dilihat pada Gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Diagram Bibliometrik

Analisis bibliometrik dilakukan untuk memetakan hubungan antar-topik penelitian dari enam jurnal yang menjadi objek kajian. Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi keterkaitan kata kunci, kluster penelitian, serta struktur pengetahuan yang berkembang pada bidang keselamatan kerja, teknologi Industri 4.0, ergonomi, perilaku keselamatan, dan *Resilience Engineering*. Proses analisis dilakukan dengan pendekatan co-occurrence, yaitu mengelompokkan kata kunci berdasarkan frekuensi kemunculan dan kedekatan hubungan antar-topik.

Berdasarkan visualisasi bibliometrik, terbentuk tiga kluster utama yang menggambarkan fokus penelitian terkini. Kluster pertama adalah *Technology for Safety* yang mencakup kata kunci seperti *Industry*

4.0, IoT, Cloud, dan safety management. Klaster ini menunjukkan bahwa teknologi digital memainkan peran penting dalam peningkatan keselamatan melalui pemantauan real-time, pengolahan data berbasis cloud, serta integrasi sistem keselamatan berbasis IoT.

Klaster kedua adalah *Human Factors and Safety Behavior*, yang terdiri dari kata kunci *ergonomics*, *pictogram*, *safety culture*, dan *safety behavior*. Klaster ini menekankan bahwa aspek manusia, termasuk pemahaman simbol keselamatan, ergonomi kerja, perilaku karyawan, dan budaya keselamatan, merupakan faktor kunci dalam menciptakan lingkungan kerja yang aman. Penelitian pada klaster ini menunjukkan bahwa intervensi berbasis pelatihan dan kepemimpinan berpengaruh terhadap peningkatan perilaku keselamatan.

Klaster ketiga adalah *Resilience Engineering dan Civil System Safety*, yang mencakup kata kunci *resilience*, *DSS (Decision Support System)*, *system safety*, dan *civil engineering*. Klaster ini menunjukkan fokus penelitian pada kemampuan sistem untuk beradaptasi dan pulih dari gangguan melalui pendekatan ketahanan. Penggunaan DSS dan model analitis seperti TOPSIS dalam penelitian ini memberikan gambaran bahwa pendekatan berbasis keputusan menjadi tren dalam pengelolaan keselamatan modern.

Node "safety" yang berada pada pusat jaringan menunjukkan bahwa keselamatan merupakan topik utama yang menghubungkan seluruh klaster. Ukuran node yang lebih besar menunjukkan frekuensi kemunculan yang tinggi, sementara ketebalan garis antarnode menunjukkan seberapa kuat hubungan antar-topik tersebut. Diagram bibliometrik ini memberikan gambaran bahwa peningkatan keselamatan kerja memerlukan pendekatan multidisipliner yang melibatkan teknologi, perilaku manusia, dan ketahanan sistem.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Penelitian

Analisis bibliometrik yang dilakukan pada enam jurnal menunjukkan bahwa penelitian terkait keselamatan kerja dan ketahanan sistem gagal dalam tiga klaster utama, yaitu: (1) teknologi untuk keselamatan, (2) faktor manusia dan perilaku keselamatan, dan (3) *Resilience Engineering*. Kata kunci yang paling sering muncul adalah 'safety', yang berada di tengah diagram jaringan dan menghubungkan semua klaster penelitian. Hal ini menunjukkan bahwa keselamatan merupakan topik utama yang menghubungkan berbagai disiplin ilmu dalam kajian ini.

Klaster pertama, Teknologi untuk Keselamatan, didominasi oleh kata kunci seperti Industri 4.0, IoT, Cloud, dan manajemen keselamatan. Hasil analisis menunjukkan bahwa perkembangan teknologi digital berperan penting dalam memperkuat sistem keselamatan, terutama melalui pemantauan risiko secara real time dan pengolahan data berbasis cloud. Temuan ini sejalan dengan penelitian Forcina et al. (2024), yang menyimpulkan bahwa IoT dan Cloud merupakan teknologi yang sangat efektif dalam meningkatkan kinerja keselamatan di perusahaan manufaktur.

Klaster kedua, Faktor Manusia dan Perilaku Keselamatan, mengandung kata kunci seperti ergonomic, pictogram, budaya keselamatan, dan perilaku keselamatan. Klaster ini membuktikan bahwa faktor manusia tetap menjadi elemen utama dalam peningkatan keselamatan kerja. Gungor (2024) menemukan bahwa pelatihan pictogram dapat meningkatkan pemahaman pekerja terhadap simbol bahaya, meskipun pengetahuan yang diperoleh cenderung berkurang seiring berjalannya waktu. Sementara itu, Amirah dkk. (2024) menunjukkan bahwa kepemimpinan dan kepatuhan karyawan memiliki pengaruh besar dalam terbentuknya budaya keselamatan di industri manufaktur. Hasil ini selaras dengan klaster yang terbentuk, yaitu bahwa keselamatan tidak hanya dibangun melalui sistem tekni, tetapi juga melalui perilaku dan budaya organisasi.

Klaster ketiga, *Resilience Engineering* dan Keselamatan Sistem Sipil, berisi kata kunci seperti *resilience*, *system safety*, *DSS*, dan *civil engineering*. Temuan ini menunjukkan bahwa arah penelitian keselamatan mulai berubah dari pendekatan reaktif menjadi pendekatan ketahanan yang lebih adaptif. Ranasinghe dkk. (2020) mengidentifikasi empat indikator utama dalam *Resilience Engineering*, yaitu komitmen manajemen, kesadaran, pembelajaran, dan keanehan, yang semuanya mendukung kemampuan sistem dalam menanggapi infeksi. Hal yang sama juga ditemukan oleh De Luliis dkk. (2024), yang menemukan bahwa penelitian ketahanan dalam sistem teknik sipil terutama fokus pada strategi pemulihan dan infrastruktur kritis.

3.2 Pembahasan

Analisis bibliometrik menunjukkan bahwa penelitian tentang keselamatan kerja semakin berkembang secara multidisipliner. Kini, keselamatan tidak hanya dipandang sebagai cara mengurangi kecelakaan, namun juga sebagai proses membangun sistem yang fleksibel dan berkelanjutan. Integrasi antara teknologi digital, faktor manusia, dan sistem ketahanan menunjukkan perubahan pendekatan dalam bidang ini.

Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, hasil analisis ini menunjukkan beberapa perkembangan penting:

1. Peran teknologi semakin besar dan dominan

Penelitian terbaru menempatkan IoT, Cloud, dan sistem pendukung pengambilan keputusan sebagai bagian utama dalam pemeliharaan keselamatan. Ini memperkuat temuan sebelumnya yang menunjukkan bahwa teknologi digital dapat mengubah cara pendekatan keselamatan dari reaktif menjadi prediktif (Forcina et al., 2024).

2. Faktor tetap manusia menjadi dasar utama dalam keselamatan

Meskipun teknologi terus berkembang, perilaku karyawan, kepemimpinan, dan ergonomi tetap berpengaruh besar terhadap tingkat keselamatan. Hal ini selaras dengan temuan Gungor (2024) dan Amirah et al. (2024), yang menekankan bahwa pelatihan dan budaya organisasi adalah kunci keberhasilan dalam program keselamatan.

3. Pendekatan Resilience Engineering semakin relevan

Penelitian sebelumnya seperti Ranasinghe dkk. (2020) telah menyoroti kelemahan pendekatan tradisional yang terlalu fokus pada pencegahan kesalahan. Analisis ini menunjukkan bahwa pendekatan ketahanan—yang kondisi adaptasi, pemulihan, dan pembelajaran—mulai menjadi tren utama dalam keselamatan literatur.

4. Keselamatan juga mencakup integrasi antara manusia, mesin, dan sistem

Tiga klaster yang terbentuk saling terhubung melalui simpul “keselamatan”, menunjukkan bahwa keselamatan modern memerlukan hubungan antara teknologi, perilaku kerja, dan kemampuan sistem untuk beradaptasi dan pulih. Pola ini sesuai dengan perkembangan industri 4.0 yang membutuhkan sistem keselamatan yang fleksibel dan terukur.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan keselamatan kerja hanya dapat dicapai melalui pendekatan kombinasi. Tidak cukup hanya mengandalkan satu metode. Diperlukan strategi yang menggabungkan teknologi, perilaku manusia, dan kemampuan sistem untuk beradaptasi dan memulihkan. Temuan ini memperkuat referensi sebelumnya dan memberi dasar bagi penelitian selanjutnya dalam pengembangan kerangka keselamatan yang lebih komprehensif dan cocok dengan kebutuhan industri saat ini.

Hasil analisis bibliometrik yang menunjukkan tiga klaster utama—*Technology for Safety, Human Factors and Safety Behavior*, dan *Resilience Engineering*—mengindikasikan bahwa keselamatan kerja di era Industri 4.0 tidak dapat dilihat secara parsial. Ketiga klaster tersebut saling berhubungan dan membentuk kerangka kerja keselamatan yang komprehensif. Integrasi ini menjadi penting karena setiap pendekatan memiliki kelebihan sekaligus keterbatasan yang perlu diselaraskan.

Dari klaster teknologi, penelitian memperlihatkan bahwa sistem berbasis IoT dan Cloud Computing mampu meningkatkan kemampuan deteksi dini dan respon cepat terhadap kondisi berbahaya (Forcina et al., 2024). Namun, beberapa penelitian terdahulu menyebutkan bahwa teknologi hanya efektif jika didukung oleh kesiapan organisasi serta kompetensi pekerja dalam mengoperasikan dan menafsirkan data yang dihasilkan (Vigoroso et al., 2025). Hal ini memperjelas bahwa teknologi saja tidak cukup untuk menjamin keselamatan tanpa dukungan faktor manusia.

Pada klaster faktor manusia, temuan menunjukkan bahwa budaya keselamatan dan perilaku pekerja tetap menjadi penentu utama dalam mencegah kecelakaan. Studi Amirah et al. (2024) memperkuat bahwa kepemimpinan transformasional dan komunikasi keselamatan yang efektif mampu meningkatkan kepatuhan pekerja terhadap prosedur keselamatan. Hal serupa dijelaskan oleh Gungor (2024), yang menemukan bahwa pelatihan piktoqram efektif dalam meningkatkan pemahaman bahaya, namun dampaknya terhadap perilaku jangka panjang masih terbatas. Temuan ini menegaskan bahwa perubahan perilaku memerlukan pendekatan pembelajaran yang berkelanjutan dan evaluasi berkala.

Sementara itu, pada klaster Resilience Engineering, hasil penelitian menunjukkan bahwa organisasi yang mampu beradaptasi, belajar dari kesalahan, dan memodifikasi strategi kerjanya memiliki tingkat keselamatan yang lebih tinggi (Ranasinghe et al., 2020). Dibandingkan pendekatan keselamatan tradisional yang fokus pada pencegahan insiden melalui penegakan aturan, Resilience Engineering menawarkan pendekatan yang lebih dinamis karena mempertimbangkan ketidakpastian operasi modern. Penelitian De luliis et al. (2024) membuktikan bahwa integrasi kemampuan adaptif dan evaluasi berkelanjutan meningkatkan ketahanan sistem teknik sipil terhadap gangguan besar, termasuk bencana.

Hasil penelitian ini sejalan dengan literatur sebelumnya yang menyebutkan bahwa integrasi teknologi dan faktor manusia merupakan kunci utama dalam membangun sistem keselamatan yang efektif (ILO, 2024). Dengan semakin kompleksnya lingkungan industri modern, organisasi dituntut untuk tidak hanya mengandalkan satu metode, tetapi menggabungkan keunggulan masing-masing pendekatan untuk menghasilkan strategi keselamatan yang lebih prediktif, adaptif, dan berkelanjutan.

Secara keseluruhan, pembahasan ini menunjukkan bahwa keberhasilan manajemen keselamatan kerja sangat ditentukan oleh kemampuan organisasi dalam mengintegrasikan inovasi teknologi, penguatan perilaku manusia, budaya keselamatan yang kuat, dan konsep ketahanan sistem. Ketiga komponen tersebut saling melengkapi, sehingga membentuk kerangka keselamatan yang lebih komprehensif dibandingkan pendekatan tradisional yang hanya fokus pada pengendalian risiko atau kepatuhan prosedural.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa upaya peningkatan keselamatan kerja di era Industri 4.0 memerlukan pendekatan multidisipliner yang mengintegrasikan teknologi digital, faktor manusia, budaya keselamatan, serta konsep ketahanan sistem. Berdasarkan analisis bibliometrik yang dilakukan terhadap enam jurnal internasional dalam rentang sepuluh tahun terakhir, ditemukan bahwa keselamatan kerja berkembang melalui tiga klaster utama, yaitu *Technology for Safety, Human Factors and Safety Behavior*,

serta *Resilience Engineering*. Ketiga klaster tersebut menunjukkan bahwa keselamatan modern bukan hanya bergantung pada satu pendekatan tunggal, melainkan pada interaksi antara sistem teknis, perilaku manusia, dan kemampuan adaptif organisasi.

Teknologi Industri 4.0—termasuk Internet of Things (IoT), sensor digital, dan komputasi awan—memiliki peran penting dalam memperkuat sistem keselamatan melalui mekanisme pemantauan real-time, deteksi dini risiko, serta pengambilan keputusan berbasis data. Namun demikian, penelitian juga menunjukkan bahwa adopsi teknologi tidak akan efektif tanpa dukungan perilaku kerja yang aman, kepemimpinan yang kuat, dan budaya keselamatan yang matang. Faktor manusia, seperti pemahaman simbol keselamatan, ergonomi, dan kepatuhan prosedur, terus menjadi fondasi utama dalam menciptakan lingkungan kerja yang aman.

Di sisi lain, pendekatan *Resilience Engineering* memberikan kerangka baru dalam memahami keselamatan sebagai kemampuan sistem untuk beradaptasi, bertahan, dan pulih dari kondisi tidak terduga. Pendekatan ini relevan bagi industri modern yang menghadapi kompleksitas dan ketidakpastian tinggi. Indikator ketahanan seperti fleksibilitas, pembelajaran organisasi, dan komitmen manajemen berperan penting dalam memperkuat stabilitas operasional.

Secara keseluruhan, penelitian ini mempertegas bahwa integrasi antara teknologi, perilaku manusia, budaya keselamatan, dan rekayasa ketahanan merupakan kunci utama dalam menciptakan sistem keselamatan kerja yang prediktif, adaptif, dan berkelanjutan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi model integrasi teknologi dan faktor manusia secara lebih mendalam, termasuk pengembangan sistem keselamatan berbasis kecerdasan buatan dan analitik prediktif, sehingga dapat memberikan inovasi baru dalam pengelolaan keselamatan di era Revolusi Industri 4.0.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis dengan penuh rasa syukur menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih kepada Politeknik Negeri Subang dan lingkungan akademik yang kondusif sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur dan arahan yang diberikan selama proses penyusunan penelitian ini.

Penulis turut mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing Bapak Firdaus Ashari, S.T.,M.T, rekan-rekan mahasiswa, serta seluruh pihak yang telah memberikan masukan ilmiah, dukungan teknis, maupun data pendukung yang sangat membantu dalam penyempurnaan artikel ini. Apresiasi juga disampaikan kepada para peneliti terdahulu yang karyanya menjadi dasar pengembangan analisis pada studi ini.

Akhir kata, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu atas kontribusi, bantuan, dan kerja samanya selama proses penelitian dan penulisan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Amirah, N.A. *et al.* (2024) "Fostering a safety culture in manufacturing through safety behavior: A structural equation modelling approach," *Journal of Safety and Sustainability*, 1(2), pp. 108–116. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jsasus.2024.03.001>.
- Forcina, A. *et al.* (2024) "Exploring Industry 4.0 technologies to improve manufacturing enterprise safety management: A TOPSIS-based decision support system and real case study," *Safety Science*, 169. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106351>.

-
- Gungor, C. (2024) "Evaluating the impact of safety pictogram training on comprehension scores and knowledge retention among engineering students," *Journal of Safety Science and Resilience*, 5(3), pp. 317–329. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2024.05.003>.
- De Iuliis, M., Cardoni, A. and Paolo Cimellaro, G. (2024) "Resilience and safety of civil engineering systems and communities: A bibliometric analysis for mapping the state-of-the-art," *Safety Science*, 174. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106470>.
- International Labour Organization (ILO). (2024). *Global trends on occupational accidents and work-related diseases*. <https://www.ilo.org>
- Ranasinghe, U. *et al.* (2020) "Resilience Engineering Indicators and Safety Management: A Systematic Review," *Safety and Health at Work*. Elsevier Science B.V., pp. 127–135. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2020.03.009>.
- Vigoroso, L. *et al.* (2025) "Ergonomics and design for safety: A scoping review and bibliometric analysis in the industrial engineering literature," *Safety Science*. Elsevier B.V. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.106799>.