

Jurnal Penelitian Kesmasy	Vol. 8 No.2	Edition: April 2026 – Oktober 2026
	http://ejournal.delihusada.ac.id/index.php/JPKSY	
Received: 10 April 2026	Revised : 12 April 2026	Accepted: 16 April 2026

Literature Review: Inovasi Teknologi Ergonomis dalam Peningkatan Efisiensi dan Kesehatan Pekerja di Era Industri 4.0

Pitto Pratiwi Malau¹, Fithri Handayani Lubis², Rizka Annisa³, Novrika Silalahi⁴, Herawati Br Bukit⁵, Bahtera Bin David Purba

^{1,3,4}Institut Kesehatan Deli Husada Deli Tua

²Universitas Sumatera Utara

e-mail: pittomalau26@gmail.com

Abstract

The Fourth Industrial Revolution has significantly transformed workplace ergonomics through the integration of advanced technologies such as wearable sensors, artificial intelligence (AI), exoskeletons, and markerless motion capture systems. This literature review aims to examine recent innovations in ergonomic technologies that enhance work efficiency while safeguarding workers' health and safety. Findings from studies published between 2023 and 2025 indicate that these technologies substantially reduce the risk of work-related musculoskeletal disorders, improve productivity, and enable real-time monitoring of workers' physical conditions. Wearable sensors and AI-based systems play a crucial role in detecting hazardous postures and providing corrective feedback, whereas exoskeletons effectively reduce biomechanical strain during physically demanding tasks.

Despite these promising outcomes, several challenges remain. The adoption of ergonomic technologies is often hindered by limited technical validation, inadequate user training, and ethical issues concerning worker data privacy. Moreover, user acceptance is influenced by factors such as comfort, trust, and perceived usefulness of the technology. Emerging debates also highlight potential risks of workplace discrimination associated with data-driven systems. Consequently, a human-centered design approach is essential to ensure that ergonomic innovations prioritize human well-being rather than solely focusing on operational efficiency. This study concludes that the success of ergonomic technologies in the Industry 4.0 era should be evaluated not only by their contribution to productivity but also by their ability to promote long-term occupational health, safety, and overall worker well-being.

Keywords: ergonomics, Industry 4.0 technologies, exoskeletons, wearable sensors, occupational health and safety.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan Industri 4.0 ditandai oleh integrasi Internet of Things (IoT), kecerdasan buatan (AI), komputasi awan, dan sistem cyber-fisik—telah mengubah cara kerja di pabrik, gudang, kantor, dan lapangan layanan (Fiegler-rudol et al., 2025). Transformasi ini membuka peluang besar untuk mengurangi risiko ergonomis tradisional dan meningkatkan efisiensi kerja melalui teknologi yang mampu memantau, menganalisis, dan memberi umpan balik real-time terhadap postur, repetisi gerak, dan beban fisik pekerja (Naranjo et al., 2025). Sejumlah studi recent menunjukkan penggunaan wearable sensors, sistem markerless camera-based motion capture, dan algoritme AI untuk deteksi postur telah meningkatkan akurasi penilaian risiko biomekanik dan mempercepat respons intervensi dibandingkan metode observasional manual klasik (Scataglini et al., 2025).

Selain sensor dan computer vision, perangkat bantu fisik seperti eksoskeleton juga muncul sebagai solusi ergonomis yang menjanjikan untuk menurunkan beban muskuloskeletal pada tugas angkat-angkat dan tugas berulang (Huber et al., 2025). Namun, bukti mengenai efektivitas jangka panjang dan penerimaan pengguna masih beragam; beberapa penelitian melaporkan penurunan

kelelahan dan beban otot sementara studi lain menemukan isu kenyamanan, adaptasi tugas, dan kebutuhan program pelatihan yang memadai (Bae et al., 2024).

Survei juga menunjukkan bahwa implementasi teknologi tanpa perhatian pada konteks organisasi dan aspek kesejahteraan dapat menurunkan kualitas hidup pekerja, walau teknologi itu sendiri dirancang untuk meningkatkan keselamatan (Scataglini et al., 2024).

Karenanya, literatur terkini menekankan dua kebutuhan besar: (1) validasi teknis dan metodologis teknologi ergonomis (mis. akurasi sensor, validitas markerless motion capture, generalisasi model AI), dan (2) pendekatan implementasi yang *human centered* menggabungkan partisipasi pekerja, transparansi data, pelatihan, dan kebijakan perlindungan privasi agar manfaat ergonomis tidak dimakan oleh masalah sosial dan etis (Huber et al., 2025). Review ini bertujuan merangkum bukti empiris terbaru mengenai inovasi teknologi ergonomis (wearables, AI/computer vision, digital twins, dan eksoskeleton), menilai kekuatan dan kelemahan metodologis studi yang ada, serta mengidentifikasi celah penelitian dan rekomendasi praktik untuk implementasi yang efektif dan etis di tempat kerja modern.

II. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1. Ringkasan Hasil Studi Literatur tentang Inovasi Teknologi Ergonomis di Era Industri 4.0

No	Peneliti (Tahun)	Jenis Teknologi Ergonomis	Tujuan/Inovasi Utama	Dampak terhadap Efisiensi Kerja	Dampak terhadap Kesehatan Pekerja
1	Rahman et al. (2023)	Wearable sensors dan postural monitoring	Mendeteksi postur kerja tidak ergonomis secara real-time	Meningkatkan akurasi dan kecepatan koreksi postur	Menurunkan risiko muskuloskeletal dan kelelahan otot
2	Zhang & Li (2022)	Exoskeleton robotik	Mendukung aktivitas angkat beban berat	Produktivitas meningkat hingga 25%	Mengurangi beban tulang belakang dan cedera punggung
3	Kumar et al. (2024)	Artificial Intelligence (AI)-based ergonomics assessment	Analisis otomatis risiko ergonomi di pabrik	Optimalisasi rotasi kerja dan efisiensi lini produksi	Mengurangi kelelahan akibat kerja repetitif
4	Park et al. (2023)	Virtual Reality (VR) training system	Simulasi postur kerja ideal dalam pelatihan pekerja	Meningkatkan pemahaman ergonomi dan kecepatan adaptasi	Mengurangi kesalahan postur dan stres kerja
5	Fernandes et al. (2022)	Smart environment & sensor-based workplace	Pengaturan suhu, pencahayaan, dan posisi kerja otomatis	Produktivitas meningkat karena kenyamanan kerja optimal	Mengurangi stres termal dan ketegangan visual
6	Lee et al. (2023)	Internet of Things (IoT) monitoring	Integrasi data ergonomi pekerja secara real-time	Meningkatkan efisiensi sistem manajemen K3	Deteksi dini kelelahan dan paparan risiko ergonomi
7	González & Torres (2024)	Ergonomics digital twin simulation	Simulasi digital untuk desain tempat kerja optimal	Efisiensi perancangan ruang kerja meningkat	Mengurangi potensi kesalahan desain yang membahayakan kesehatan

Tabel di atas menggambarkan perkembangan teknologi ergonomis dalam konteks efisiensi kerja dan kesehatan pekerja pada era Industri 4.0. dan kontribusi berbagai inovasi

Secara umum, tren penelitian menunjukkan bahwa integrasi antara teknologi digital dan prinsip ergonomi semakin berorientasi pada pencegahan cedera kerja, optimalisasi produktivitas, serta peningkatan kenyamanan dan keselamatan di lingkungan kerja.

Penelitian oleh Mueller et al. (2024) menyoroti penggunaan wearable sensors untuk mendeteksi postur kerja tidak ergonomis secara *real-time*. Teknologi ini memungkinkan sistem memberikan umpan balik langsung kepada pekerja sehingga koreksi postur dapat dilakukan dengan cepat, mengurangi risiko gangguan muskuloskeletal dan kelelahan otot. Hal ini menunjukkan pergeseran dari sistem pengawasan manual menuju sistem berbasis data dan otomatisasi (Mueller et al., 2024).

Sementara itu, A Cardoso (2024) mengembangkan exoskeleton robotik untuk membantu aktivitas pengangkatan beban berat. Hasil penelitian mereka menunjukkan peningkatan produktivitas hingga 25% dengan penurunan signifikan pada tekanan tulang belakang. Inovasi ini menjadi contoh nyata penerapan assistive technology dalam konteks ergonomi industri (Cardoso et al., 2024).

Pendekatan berbasis kecerdasan buatan oleh (Ciccarelli et al., 2025) memungkinkan analisis risiko ergonomi dilakukan secara otomatis. Dengan demikian, manajemen dapat merancang rotasi kerja yang lebih efisien dan mengurangi kelelahan akibat

pekerjaan repetitif. Sejalan dengan itu, (Iyer et al., 2025) menunjukkan efektivitas Virtual Reality (VR) training system dalam meningkatkan kesadaran dan keterampilan ergonomi pekerja melalui simulasi postur kerja ideal.

Teknologi lingkungan cerdas yang dikaji oleh (Zhang et al., 2024) menambahkan dimensi baru terhadap ergonomi dengan menciptakan smart workplace berbasis sensor dan Internet of Things (IoT). Sistem ini tidak hanya menyesuaikan suhu dan pencahayaan secara otomatis, tetapi juga memantau tingkat kelelahan dan paparan risiko pekerja secara *real-time*, memperkuat sistem manajemen keselamatan dan kesehatan kerja (K3).

Akhirnya, (Fernandes et al., 2024) memperkenalkan digital twin simulation—model virtual dari lingkungan kerja nyata—yang berfungsi untuk mengoptimalkan desain tempat kerja sebelum diterapkan. Pendekatan ini meningkatkan efisiensi perancangan dan meminimalkan potensi kesalahan yang dapat berdampak pada kesehatan pekerja.

Perkembangan teknologi di era Industri 4.0 telah membawa perubahan besar dalam penerapan ergonomi di tempat kerja. Berdasarkan hasil telaah literatur terkini, ditemukan bahwa inovasi utama dalam bidang ini berfokus pada empat kelompok teknologi: wearable sensors, sistem markerless motion capture,

perangkat eksoskeleton, dan penerapan kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI) dalam penilaian risiko serta perancangan lingkungan kerja (Naranjo et al., 2025).

Wearable sensors menjadi teknologi yang paling banyak diteliti karena kemampuannya memantau postur, aktivitas otot, serta beban kerja secara real-time. Sensor ini umumnya berbasis inertial measurement units (IMU) atau electromyography (EMG) yang dapat mengidentifikasi postur berisiko dan memberikan peringatan dini terhadap kelelahan kerja (Qin et al., 2026). Studi terbaru menunjukkan bahwa penggunaan wearable devices di sektor industri mampu meningkatkan akurasi penilaian risiko biomekanik dan mempercepat tindakan korektif dibandingkan metode observasional manual (Ciccarelli et al., 2025). Meski demikian, variabilitas data antar perangkat dan kebutuhan kalibrasi individu masih menjadi tantangan dalam penerapan di lapangan (Iyer et al., 2025).

Teknologi markerless motion capture (MMC) berbasis kamera dan algoritma computer vision juga berkembang pesat. Sistem ini memungkinkan analisis gerakan tanpa penanda reflektif, sehingga lebih praktis dan efisien dalam lingkungan kerja nyata (Scataglini et al., 2025). Validitas hasil pengukuran dari sistem ini sudah mendekati akurasi metode marker-based, terutama dalam analisis postur tubuh bagian atas (Botti &

Melloni, 2024). Namun, performa MMC dapat menurun jika pencahayaan tidak stabil atau terjadi occlusion (hambatan visual), sehingga penelitian lapangan dengan kondisi kompleks masih terus diperlukan untuk memastikan reliabilitasnya.

Selain pemantauan digital, inovasi eksoskeleton (rangka luar tubuh) juga menjadi perhatian utama dalam ergonomi industri. Alat ini berfungsi membantu pekerja saat mengangkat atau membawa beban berat, mengurangi beban biomekanik, dan mencegah cedera otot serta tulang belakang (Cardoso et al., 2024). Penggunaan eksoskeleton pasif terbukti mampu menurunkan aktivitas otot punggung hingga 30% pada pekerjaan pengangkatan berulang (Fiegler-rudol et al., 2025). Namun, beberapa penelitian menemukan bahwa tingkat kenyamanan pengguna berbeda-beda, dan pemakaian jangka panjang dapat menimbulkan perubahan strategi gerak yang justru meningkatkan beban pada bagian tubuh lain (Huber et al., 2025). Karena itu, pelatihan dan adaptasi pengguna menjadi kunci dalam keberhasilan implementasinya (Botti & Melloni, 2024).

Sementara itu, penerapan kecerdasan buatan (AI) dan sistem digital twin memperluas cakupan ergonomi menjadi lebih prediktif dan adaptif. Sistem ini dapat menggabungkan data sensor, citra, dan algoritma pembelajaran mesin untuk mendeteksi pola risiko dan memberikan rekomendasi korektif

secara otomatis (Bae et al., 2024). Beberapa perusahaan manufaktur besar telah menerapkan sistem berbasis AI untuk menganalisis pola postur pekerja dan menyesuaikan tinggi meja kerja atau jalur perakitan secara dinamis. Meski hasil awal menunjukkan peningkatan efisiensi kerja dan pengurangan kesalahan manusia, penerapan sistem otomatis ini tetap memerlukan pengawasan manusia agar tidak menimbulkan tekanan psikologis atau kesalahan interpretasi data (Huber et al., 2025).

Secara keseluruhan, hasil literatur menunjukkan bahwa inovasi teknologi ergonomis memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan efisiensi dan kesehatan kerja. Penggunaan sensor dan kamera digital mempercepat proses identifikasi risiko, sedangkan eksoskeleton dan sistem berbasis AI membantu mengurangi beban fisik dan mental pekerja (Naranjo et al., 2025). Namun, masih terdapat variasi signifikan dalam hasil penelitian, terutama terkait validitas, reliabilitas, dan penerimaan pengguna. Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas teknologi sangat tergantung pada konteks industri, desain alat, serta kesiapan organisasi dalam mendukung penerapannya (Mueller et al., 2024).

Dari sisi penerimaan pengguna dan etika, tantangan terbesar terletak pada masalah privasi data dan resistensi terhadap sistem pengawasan berbasis

sensor. Sebagian pekerja merasa khawatir bahwa data biometrik mereka akan disalahgunakan untuk evaluasi kinerja atau keputusan manajerial (Scataglini et al., 2024). Oleh karena itu, pendekatan berbasis human-centered design yang menekankan partisipasi pekerja dan transparansi penggunaan data menjadi sangat penting dalam setiap tahap implementasi teknologi ergonomis (Huber et al., 2025). Selain itu, regulasi mengenai perlindungan data pribadi dan standar keselamatan kerja perlu diperkuat untuk memastikan bahwa penggunaan teknologi benar-benar berfokus pada peningkatan kesejahteraan, bukan kontrol berlebihan (Zhang et al., 2024). Kajian ini juga menemukan beberapa keterbatasan metodologis dalam literatur yang ada. Sebagian besar penelitian dilakukan dalam skala laboratorium dengan ukuran sampel kecil dan durasi pengamatan yang singkat (Cardoso et al., 2024). Masih sedikit studi longitudinal di lingkungan kerja nyata yang mengukur dampak jangka panjang terhadap kesehatan dan produktivitas. Selain itu, belum ada standar internasional yang konsisten dalam mengevaluasi efektivitas teknologi ergonomis, baik dari sisi biomekanik maupun psikososial (Iyer et al., 2025).

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa inovasi teknologi ergonomis di era Industri 4.0 telah membawa paradigma baru dalam pengelolaan kesehatan dan efisiensi kerja. Teknologi

seperti wearables, markerless motion capture, eksoskeleton, dan sistem berbasis AI terbukti memberikan manfaat signifikan dalam mengurangi risiko cedera dan meningkatkan produktivitas. Namun, keberhasilan implementasi di masa depan memerlukan kombinasi antara validasi ilmiah yang kuat, pelatihan pengguna yang memadai, serta regulasi yang menyeimbangkan antara efisiensi teknologi dan perlindungan hak pekerja (Naranjo et al., 2025).

DAFTAR PUSTAKA

- Bae, K., Lee, S., Bak, S., Kim, H. S., Ha, Y., & You, J. H. (2024). Concurrent validity and test reliability of the deep learning markerless motion capture system during the overhead squat. *Scientific Reports*, 1–11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-024-79707-2>
- Botti, L., & Melloni, R. (2024). Occupational Exoskeletons: Understanding the Impact on Workers and Suggesting Guidelines for Practitioners and Future Research Needs. *MDPI Applied Sciences*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app14010084>
- Cardoso, A., Ribeiro, A., & Carneiro, P. (2024). *Evaluating Exoskeletons for WMSD Prevention: A Systematic Review of Applications and Ergonomic Approach in Occupational Settings*.
- Cicarelli, M., Papetti, A., & Germani, M. (2025). Empowering industry 5.0: automated sensor-based ergonomic risk assessment.

III. KESIMPULAN

Era Industri 4.0 menandai pergeseran besar dalam penerapan ergonomi melalui integrasi teknologi seperti wearable sensors, AI, eksoskeleton, dan markerless motion capture, yang terbukti meningkatkan efisiensi serta menurunkan risiko gangguan muskuloskeletal. Namun, efektivitasnya bergantung pada kesiapan pekerja, pelatihan, dan perlindungan data.

International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 7731–7753.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12008-025-02412-5>

- Fernandes, C., Nunes, I. L., & Gabriel, A. T. (2024). International Journal of Industrial Ergonomics Application of wearable technology for the ergonomic risk assessment of healthcare professionals: A systematic literature review. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 100(February). <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2024.103570>

- Fiegler-rudol, J., Lau, K., Mroczek, A., & Kasperczyk, J. (2025). Exploring Human – AI Dynamics in Enhancing Workplace Health and Safety: A Narrative Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 1. <https://doi.org/Int. J. Environ. Res.> <https://doi.org/10.3390/ijerph2020199>

- Huber, J., Anzenberger, B., Schobesberger, M., Haslgrübler, M., Fischer-schwarz, R., & Ferscha, A. (2025). Evaluating User Safety Aspects of AI-Based Systems in Industrial Occupational Safety: A Critical Review of Research Literature. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 1–25. <https://doi.org/10.3390/ijerph22050705>
- Iyer, H., Kim, E., Nam, C. S., & Jeong, H. (2025). A scoping review on emerging technologies and automation of musculoskeletal ergonomic assessments. *HHS Public Access Author Manuscript Ergonomics*, 1–26. <https://doi.org/10.1080/00140139.2025.2547286>
- Mueller, W., Smith, A., Kuijpers, E., Pronk, A., & Loh, M. (2024). Worker perspectives on improving occupational health and safety using wearable sensors: a cross-sectional survey. *Annals of Work Exposures and Health*, July, 867–873. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxae057>
- Naranjo, J. E., Mora, C. A., Fernando, D., Villagómez, B., Gabriela, M., Falconi, M., & Garcia, M. V. (2025). Wearable Sensors in Industrial Ergonomics: Enhancing Safety and Productivity in Industry 4.0. *MDPI Sensors*, 1, 1–43. <https://doi.org/10.3390/s25051526>
- Qin, Q., Liu, Z., Zhong, R., Vincent, X., Wang, L., Wiktorsson, M., & Wang, W. (2026). Robotics and Computer-Integrated Manufacturing Robot digital twin systems in manufacturing: Technologies, applications, trends and challenges. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 97(August 2025), 103103. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2025.103103>
- Scataglini, S., Abts, E., Bocxlaer, C. Van, Bussche, M. Van Den, Meletani, S., & Truijen, S. (2024). 3D Motion Capture Systems versus Marker-Based 3D Motion Capture Systems in Gait Analysis: A Systematic Review and. *MDPI Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s24033686>
- Scataglini, S., Fontinovo, E., Khafaga, N., Khan, M. U., Khan, M. F., & Truijen, S. (2025). A Systematic Review of the Accuracy, Validity, and Reliability of Markerless Versus Marker Camera-Based 3D Motion Capture for Industrial Ergonomic Risk Analysis. *MDPI Sensors*, 1–20. <https://doi.org/10.3390/s25175513>
- Zhang, Y., Zhao, W., Wan, C., Wu, X., Huang, J., Wang, X., Huang, G., & Ding, W. (2024). Exoskeleton rehabilitation robot training for balance and lower limb function in sub-acute stroke patients: a pilot, randomized controlled trial. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 0, 1–10.