ISSN 2338-7122

ERGONOMI INDUSTRI BERPUSAT MANUSIA DI ERA AI: KERANGKA INDUSTRI 5.0 MENUJU INDONESIA EMAS 2045

Heri Setiawan[1]*
[1]Program Studi Teknik Industri, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Katolik Musi Charitas
*Email: heri_setiawan@ukmc.ac.id

Abstrak

Transformasi industri berbasis kecerdasan buatan (AI), *Internet of Things*, robot kolaboratif, *wearable sensor*, *extended reality*, dan *digital twin* memperluas kemampuan sistem produksi, tetapi sekaligus menciptakan risiko baru berupa beban kognitif, ketergantungan pada otomasi, eksklusi pengguna, serta isu privasi dan *agency* pekerja. Penelitian ini bertujuan merumuskan kerangka ergonomi industri berpusat manusia yang relevan bagi transisi *Industry* 5.0 dan agenda Indonesia Emas 2045. Metode yang digunakan adalah *structured integrative review* terhadap literatur ergonomi/ *human factors*, *human-centered design*, *inclusive design*, dan *human-centric manufacturing* periode 2021-2026, dilengkapi standar internasional serta dokumen kebijakan nasional. Sintesis tematik menunjukkan enam kapabilitas yang harus diintegrasikan dalam sistem kerja cerdas, yaitu pemahaman konteks manusia, *sensing* dan *assessment* multidimensi, adaptasi dan augmentasi, inklusi, tata kelola teknologi, serta pembelajaran berkelanjutan. Berdasarkan temuan tersebut dikembangkan kerangka HCIE-2045 yang menempatkan pekerja sebagai pusat *loop data* ke keputusan, bukan sekadar sumber data bagi algoritma. Kerangka ini menghubungkan kinerja sistem dengan keselamatan, kesejahteraan, produktivitas, inklusi, resiliensi, dan keberlanjutan. Implikasi utamanya adalah bahwa adopsi AI industri di Indonesia perlu bergeser dari *technology-first automation* menuju *human-centered augmentation* melalui partisipasi pekerja, pengukuran ergonomi fisik-kognitif-organisasional, dan *governance* yang transparan. Pendekatan tersebut menawarkan landasan bagi transformasi manufaktur yang produktif sekaligus selaras dengan peningkatan daya saing SDM dan transformasi ekonomi menuju Indonesia Emas 2045.

Kata kunci: Ergonomi industri, *human-centered design*, Indonesia Emas 2045, *Industry* 5.0, kecerdasan buatan.

Pendahuluan

Ergonomi/ *human factors* (HFE) pada dasarnya tidak hanya membahas postur atau dimensi antropometri, tetapi mempelajari interaksi manusia dengan elemen lain dalam suatu sistem untuk mengoptimalkan kesejahteraan manusia dan kinerja sistem secara keseluruhan [1]. Perspektif sistem ini menjadi semakin penting ketika sistem kerja industri berkembang dari otomasi konvensional menjadi *cyber-physical production system* yang mengintegrasikan AI, *Internet of Things* (IoT), analitik data, robotika, sensor, dan antarmuka digital. *International Labour Organization* juga menekankan bahwa sistem kerja mencakup manusia, tugas, teknologi, organisasi, dan lingkungan; karena itu intervensi ergonomi yang efektif harus bersifat *systems-oriented*, *design-driven*, serta menyeimbangkan *performance* dan *well-being* [2].

Industry 5.0 muncul sebagai koreksi terhadap kecenderungan *Industry* 4.0 yang terlalu berpusat pada efisiensi dan digitalisasi. Komisi Eropa menempatkan *human-centricity*, *sustainability*, dan *resilience* sebagai tiga prioritas inti *Industry* 5.0, dengan kesejahteraan, keterampilan, dan pemberdayaan pekerja berada di pusat sistem produksi [3]. Pergeseran ini membuat pertanyaan desain tidak lagi berhenti pada "teknologi apa yang dapat diotomasi?", tetapi berkembang menjadi "bagaimana teknologi memperluas kapabilitas manusia tanpa mengurangi keselamatan, otonomi, martabat, dan kemampuan belajar?". Kajian terbaru menunjukkan bahwa *human-centricity* dalam *Industry* 5.0 bersifat multidimensi dan mencakup *well-being*, *worker empowerment*, *meaningful work*, *human-machine collaboration*, *learning*, *inclusion*, dan *ethics* [4], [5].

ISSN 2338-7122

Perubahan tersebut memiliki konsekuensi langsung bagi Teknik Industri. Teknologi yang meningkatkan produktivitas dapat secara simultan memindahkan risiko dari domain fisik ke domain kognitif dan organisasional. Robot kolaboratif dapat mengurangi beban biomekanik tetapi meningkatkan kebutuhan *attention switching* dan *trust calibration*; *augmented reality* dapat mempercepat pembelajaran tetapi menambah *visual clutter*; *wearable sensor* dapat memberi *early warning* kelelahan tetapi memunculkan kekhawatiran *surveillance*; sedangkan AI *decision-support* dapat mempercepat keputusan tetapi menciptakan *automation bias* dan *out of the loop performance*. *Review* empiris terhadap teknologi *Industry* 4.0/ 5.0 menunjukkan bahwa bukti mengenai dampak fisik, psikologis, dan kognitif pekerja masih terbatas dan heterogen [6]. *Cognitive ergonomics* juga masih sering terabaikan pada implementasi *human-robot collaboration*, padahal faktor ini menentukan *acceptance*, *mental workload*, *situation awareness*, dan kualitas keputusan operator [7].

Konteks Indonesia menjadikan isu tersebut strategis. RPJPN 2025-2045 menetapkan visi Indonesia Emas 2045 sebagai negara yang bersatu, berdaulat, maju, dan berkelanjutan. Salah satu sasaran utamanya adalah peningkatan daya saing sumber daya manusia, sedangkan transformasi ekonomi diarahkan pada produktivitas berbasis iptek dan inovasi, penguatan industri manufaktur, transformasi digital, dan ekonomi hijau [8]. Target jangka panjang juga menempatkan kontribusi industri pengolahan sekitar 28% terhadap PDB [8]. Pada sisi ketenagakerjaan, BPS mencatat 145,77 juta penduduk bekerja pada Februari 2025 [9], sehingga kualitas transformasi teknologi akan berdampak pada basis tenaga kerja yang sangat besar. Dengan demikian, keberhasilan digitalisasi manufaktur tidak cukup dinilai dari *output*, OEE, atau *cost reduction*, tetapi juga dari kemampuan sistem mempertahankan *workability*, keselamatan, pembelajaran, dan partisipasi manusia.

Human-Centered Design (HCD) menyediakan prinsip untuk memastikan transformasi tersebut berangkat dari pemahaman eksplisit mengenai pengguna, tugas, dan lingkungan; melibatkan pengguna selama desain; menggunakan evaluasi berbasis pengguna; serta berlangsung secara iteratif [10]. *Inclusive Design* melengkapi HCD dengan pertanyaan yang lebih luas: siapa yang mungkin tertinggal oleh suatu solusi? Dalam konteks kerja industri, kombinasi HCD, *Inclusive Design*, dan ergonomi berarti merancang sistem berdasarkan kemampuan, keterbatasan, pengalaman, serta variasi pekerja, bukan memaksa pekerja beradaptasi terhadap sistem yang sejak awal dirancang tanpa mempertimbangkan mereka. Prinsip ini konsisten dengan materi ergonomi yang menempatkan *human-system compatibility* dan keberagaman pengguna sebagai dasar *good work system*.

Meskipun literatur *Industry* 5.0 berkembang cepat, masih terdapat tiga kesenjangan. Pertama, banyak riset membahas *enabler* teknologi secara terpisah misalnya *cobot*, *digital twin*, *wearable*, atau *computer vision* tanpa mengintegrasikannya ke dalam arsitektur ergonomi yang utuh. Kedua, pengukuran masih lebih matang pada risiko fisik dibanding *cognitive*, *psychosocial*, *inclusion*, dan *governance*. Ketiga, sebagian besar *framework* dikembangkan pada konteks negara maju, sedangkan implikasi terhadap agenda transformasi manufaktur dan kualitas SDM Indonesia belum banyak dirumuskan. Penelitian ini karena itu bertujuan: (1) mensintesis pergeseran peran ergonomi pada *Industry* 5.0; (2) mengidentifikasi peluang serta risiko HFE dari teknologi utama; dan (3) mengembangkan kerangka *Human-Centered Industrial Ergonomics* 2045 (HCIE-2045) sebagai agenda desain dan riset untuk mendukung Indonesia Emas 2045.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, tiga pertanyaan penelitian dirumuskan secara eksplisit: (RQ1) Bagaimana peran ergonomi industri bergeser dari pendekatan *technology-centered automation* menuju *human-centered augmentation* dalam konteks Industry 5.0?, (RQ2) Apa peluang ergonomis dan risiko baru yang ditimbulkan oleh teknologi utama Industry 5.0 bagi pekerja dan sistem kerja?, dan (RQ3) Bagaimana temuan tersebut dapat diintegrasikan ke dalam kerangka HCIE-2045 yang relevan untuk mendukung agenda Indonesia Emas 2045?.

Metode Penelitian

ISSN 2338-7122

Penelitian menggunakan *structured integrative review* dan *conceptual framework development*. Pendekatan integratif dipilih karena isu yang dikaji melintasi ergonomi fisik, kognitif, dan organisasional sekaligus beririsan dengan AI, *smart manufacturing*, *human-robot interaction*, HCD, dan kebijakan pembangunan. Tujuan metode bukan melakukan meta-analisis efek tunggal, melainkan mengintegrasikan konsep, bukti empiris, dan implikasi desain yang tersebar pada berbagai domain teknologi.

Penelusuran literatur dilakukan pada September 2026 melalui sumber penerbit dan indeks ilmiah terbuka yang mencakup ScienceDirect, Taylor & Francis, Springer Nature, IEEE Xplore, PubMed/PMC, MDPI, serta portal institusi yang menautkan metadata Scopus. Kata kunci dikombinasikan dalam bahasa Inggris, antara lain "Industry 5.0", "human-centric manufacturing", "ergonomics", "human factors", "human-centered design", "inclusive design", "collaborative robot", "human digital twin", "wearable sensors", "computer vision ergonomic assessment", "extended reality manufacturing", dan "occupational exoskeleton". Literatur 2021-2026 diprioritaskan, sementara standar dan definisi seminal tetap dipertahankan. Dokumen kebijakan RPJPN 2025-2045 dan statistik ketenagakerjaan BPS digunakan untuk mengontekstualkan temuan pada Indonesia.

Kriteria inklusi meliputi: (a) artikel *peer-reviewed* atau *review* yang secara eksplisit menghubungkan teknologi industri dengan *human factors*/ *ergonomics, well-being*, *usability*, *cognitive workload*, *safety*, *inclusion*, atau *human-centricity*; (b) studi yang relevan dengan manufaktur, operasi, *maintenance*, atau *work system*; dan (c) sumber institusional resmi untuk definisi, standar, dan kebijakan. Artikel yang hanya membahas performa algoritma tanpa implikasi manusia, aplikasi nonkerja yang tidak dapat ditransfer ke konteks industri, serta sumber populer tanpa metodologi yang jelas dikeluarkan. Korpus akhir terdiri dari lebih dari dua puluh sumber inti yang mewakili *review* sistematis, studi eksperimen/ validasi, artikel konseptual, standar, dan dokumen kebijakan.

Secara operasional, korpus akhir terdiri dari 25 sumber, yaitu 18 artikel ilmiah *peer-reviewed/review* dan 7 sumber pendukung berupa standar, dokumen institusional, kebijakan, statistik resmi, serta materi akademik yang relevan. Penilaian kualitas dilakukan dengan matriks *appraisal* yang menilai: (1) kesesuaian sumber dengan pertanyaan penelitian; (2) kejelasan tujuan dan metode; (3) kejelasan konteks industri, teknologi, dan karakteristik manusia yang dikaji; (4) keterukuran *outcome human factors/ergonomics*; (5) transparansi hasil dan keterbatasan; serta (6) keteralihan temuan ke konteks sistem kerja industri. Untuk sumber normatif dan kebijakan, penilaian difokuskan pada otoritas penerbit, kemutakhiran, dan relevansi langsung terhadap definisi, standar, atau konteks Indonesia. *Appraisal* digunakan untuk memberi bobot interpretatif pada sintesis, bukan sebagai dasar meta-analisis atau perhitungan *effect size.*

Analisis dilakukan dalam tiga tahap. Tahap pertama mengekstraksi unit makna berupa "teknologi-mekanisme-dampak manusia-risiko-kondisi keberhasilan". Tahap kedua melakukan *coding* tematik ke dalam dimensi fisik, kognitif, organisasional, *inclusion*/ *accessibility*, dan *governance*. Tahap ketiga mengintegrasikan hasil dengan prinsip HCD ISO 9241-210 dan tiga orientasi *Industry* 5.0 untuk membangun f*ramework* HCIE-2045. Validitas konseptual dijaga melalui triangulasi antara *review* mutakhir, studi implementasi/ eksperimen, dan sumber normatif. Karena heterogenitas *outcome* dan desain studi tinggi, sintesis tidak menggabungkan *effect size* secara statistik.

Hasil dan Pembahasan

Pergeseran dari Technology-Centered Automation ke Human-Centered Augmentation

Sintesis menunjukkan bahwa posisi ergonomi berubah dari fungsi korektif menilai postur, beban, dan *layout* setelah sistem dibuat menjadi fungsi arsitektural yang seharusnya hadir sejak penentuan kebutuhan, pembagian fungsi manusia-mesin, perancangan antarmuka, sampai evaluasi pascaimplementasi. Hermawati dkk. menemukan bahwa definisi *human-centricity* pada *Industry* 5.0 tidak tunggal dan melibatkan sejumlah tema yang melampaui keselamatan dasar [4]. Trstenjak dkk. juga menegaskan bahwa *work environment* berpusat manusia harus

ISSN 2338-7122

menggabungkan *traditional ergonomics, cognitive ergonomics, workload management*, dan *well-being* [5]. Dengan demikian, *Human-Centered Industrial Ergonomics* tidak dapat direduksi menjadi digitalisasi alat ukur ergonomi; ia harus membentuk logika bagaimana teknologi dipilih dan bagaimana keputusan kerja dibagi antara manusia dan mesin.

Prinsip dasarnya adalah *augmentation*, bukan *automation maximization*. Tugas yang berulang, membutuhkan presisi tinggi, berbahaya, atau memerlukan pemrosesan data besar dapat dialokasikan kepada teknologi, sedangkan *judgment* kontekstual, kreativitas, *tacit knowledge*, improvisasi, dan *responsibility* tetap membutuhkan manusia. Literatur *human-machine interaction* menunjukkan bahwa *sensor*, *data processing*, *communication*, dan *interaction layer* perlu dirancang sebagai satu rantai yang mempertahankan peran manusia dalam *loop* [11]. Perspektif HCD memperkuat kebutuhan *co-design*: pekerja bukan hanya "objek pengukuran" tetapi aktor yang ikut mendefinisikan masalah, mengevaluasi prototipe, dan menentukan apakah otomatisasi benar-benar meningkatkan kualitas kerja [10], [12].

Teknologi Kunci, Nilai Ergonomis, dan Risiko Baru

Enam kelompok teknologi paling konsisten muncul dalam literatur: AI/ *computer vision*, *wearable/ physiological sensing*, *collaborative robots*, *Human Digital Twin, extended reality*, dan *occupational exoskeleton*. Setiap teknologi menawarkan manfaat ergonomis, tetapi juga menimbulkan failure mode baru. Ringkasan sintesis ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sintesis teknologi Industry 5.0 dari perspektif ergonomi industri

Enabler teknologi	Nilai ergonomis utama	Risiko/gap dominan	Implikasi desain
AI & *computer vision*	*Monitoring* postur kontinu; otomasi RULA/ REBA/ OCRA; *early detection*.	*Occlusion*, *bias data, false alarm*, validitas lapangan.	AI sebagai *decision support*; validasi lintas konteks; *human oversight*.
Wearable & *physiological sensor*	Deteksi gerak, *fatigue*, beban fisiologis dan *cognitive state* secara *real-time*.	Kenyamanan, data *privacy*, *acceptance, surveillance*.	*Minimal-intrusive*; *data minimization; consent* dan *feedback* yang bermakna.
Collaborative robot (cobot)	Mengurangi beban repetitif/ berat; mendukung kualitas dan fleksibilitas.	*Mental workload, unpredictability, trust, loss of skill.*	*Task allocation berbasis capability; predictable motion; training dan co-design.*
Human Digital Twin	Simulasi individual; prediksi *fatigue*/ risiko; personalisasi *workstation*.	*Model validity*, identitas *digital*, *privacy, over-personalization*.	*Human-controlled data; model uncertainty; use case yang proporsional.*
Extended Reality (AR/VR/MR)	*Guidance, learning, remote support, error reduction*.	*Visual clutter, simulator sickness, overload, usability gap*.	*Information pacing; context-aware display*; evaluasi *cognitive workload*.
Occupational exoskeleton	Mengurangi tuntutan biomekanik pada tugas tertentu.	*Discomfort, redistribution of load, task-dependence*.	*Fit individual*; evaluasi lapangan; hindari substitusi terhadap *redesign* kerja.

Computer vision memperlihatkan contoh jelas bagaimana teknologi dapat mengubah *assessment* ergonomi dari *snapshot* menjadi *continuous monitoring*. Agostinelli dkk. memvalidasi pendekatan 2D RGB *motion capture* pada lingkungan manufaktur riil dan menunjukkan potensi sistem non-intrusif untuk *screening* risiko, tetapi akurasi dipengaruhi *layout*, pencahayaan, *mobility*, dan *occlusion* sehingga belum dapat menggantikan *judgment ergonomist* untuk sertifikasi risiko [13]. Temuan ini penting: otomatisasi *assessment* harus memperluas kemampuan *ergonomist*, bukan menciptakan ilusi kepastian algoritmik.

Wearable sensing mengisi aspek yang tidak dapat ditangkap kamera, seperti *heart rate*, EMG, *inertial movement*, atau *physiological response*. *Review* Naranjo dkk. menunjukkan integrasi AI sangat dominan dalam aplikasi *wearable ergonomics*, namun tantangan *scalability*, kenyamanan, interoperabilitas, dan *data governance* tetap besar [14]. *Review worker well-being* juga menemukan bahwa *physical monitoring* lebih matang dibanding *cognitive monitoring* dan

ISSN 2338-7122

mendorong pengembangan *multimodal systems* yang menggabungkan *physical* serta *cognitive state* pada kondisi kerja riil [15]. Karena itu, indikator digital perlu ditafsirkan bersama konteks tugas dan pengalaman subjektif pekerja.

Pada *human-robot collaboration*, manfaat utama berasal dari *complementarity*: robot menangani kekuatan, presisi, atau repetisi, sementara manusia mempertahankan *adaptive judgment*. Eksperimen *assembly* menunjukkan cobot berpotensi memberi dukungan kognitif sekaligus fisik, tetapi efeknya harus dinilai melalui *performance error* dan *physiological response*, bukan hanya *cycle time* [16]. Gualtieri dkk. menegaskan bahwa *cognitive ergonomics* sering kurang diperhatikan dan mengembangkan *design guidelines* untuk HRC yang *human-centred* [7]. Artinya, *safety separation distance* saja tidak cukup; gerak robot harus dapat diprediksi, tingkat otonomi dapat dipahami, dan operator mengetahui kapan serta bagaimana mengambil alih kontrol.

Human Digital Twin (HDT) memperluas personalisasi dengan membangun representasi dinamis manusia untuk simulasi, *assessment*, dan *adaptive support*. Wang dkk. mengusulkan HDT tiga dimensi yang menghubungkan *human entity*, *virtual entity*, dan *interactive system* [17], sedangkan Gaffinet dkk. membedakan *Human Digital Model*, *Shadow*, dan *Twin* untuk mengurangi ambiguitas konsep [18]. Nilai ergonomis HDT terletak pada kemampuan memodelkan variasi individu, tetapi semakin rinci representasi manusia, semakin tinggi pula kebutuhan *governance* terhadap validitas *model*, *consent*, *purpose limitation*, dan risiko *profiling*.

XR dan *exoskeleton* menunjukkan bahwa "teknologi ergonomi" juga dapat menjadi sumber beban. *Review* XR untuk *industrial assembly* menekankan potensi *adaptive guidance*, *learning*, dan *intelligent decision support*, sekaligus *gap cognitive factors* dan *usability* [19]. *Exoskeleton* dapat menurunkan tuntutan otot pada tugas tertentu, tetapi *review* sistematis masih menemukan masalah *comfort*, *task dependency*, dan keterbatasan evaluasi dunia nyata [20]. Karena itu, prinsip *hierarchy of controls* tetap relevan: teknologi *wearable* atau *assistive* tidak boleh menjadi alasan untuk mempertahankan desain kerja yang secara intrinsik buruk jika risiko dapat dihilangkan melalui *redesign* tugas, *layout*, atau metode kerja.

Dari Ergonomi Fisik ke Ergonomi Multidimensi

Literatur memperlihatkan *asymmetry* antara kematangan *physical ergonomics* dan dimensi lain. *Posture*, *force*, *repetition*, dan *movement* relatif mudah diinstrumentasi; sebaliknya *cognitive workload*, *trust*, *autonomy*, *stress*, *learning*, *fairness*, dan *sense of control* lebih sulit diamati tanpa menggabungkan indikator fisiologis, *behavioural*, dan *self-report*. *Review effects of Industry* 4.0/ 5.0 menegaskan bahwa jumlah studi empiris yang dapat digeneralisasi masih terbatas [6]. Tantangan ini membuat evaluasi teknologi berisiko bias: sistem dapat dinilai "ergonomis" karena menurunkan skor RULA, padahal pada saat yang sama meningkatkan *attentional demand* atau mengurangi *decision latitude*.

Tension tersebut juga terlihat pada level organisasi. Pacheco dan Iwaszczenko mengidentifikasi ketegangan *human-centric* pada dimensi *learning*, *organizing, belonging*, dan *performing*, termasuk konflik antara *automation* dan *employment quality*, *standardization* dan *autonomy*, serta *productivity* dan *well-being* [21]. Sementara itu, Bolis dkk. menunjukkan bahwa *Industry* 5.0 membutuhkan integrasi antara *digital technologies*, *sustainability*, dan *work*, sehingga pekerjaan tidak boleh diperlakukan sebagai *residual variable* setelah teknologi ditetapkan [22]. Bagi Teknik Industri, implikasinya adalah *performance engineering* perlu menggunakan *dual objective*: memperbaiki *flow* dan *productivity* sekaligus meningkatkan *quality of working life*.

Konsep *Safe Operator* 5.0 memberi ilustrasi arsitektur *real-time* yang menghubungkan *positioning*, *proximity*, *physiological sensor*, *machine learning*, dan *feedback* untuk menjaga *well-being* serta efisiensi [23]. Arah 2026 bergerak lebih jauh menuju pola *perception-assessment-enhancement*: sistem mengindra *state operator*, menilai risiko fisik/ psikologis/ kognitif, kemudian memberikan intervensi berupa *ergonomic redesign*, XR *assistance*, *exoskeleton*, atau

ISSN 2338-7122

safety control [24]. Namun *closed-loop* seperti ini hanya *human-centered* jika pekerja memiliki visibilitas atas data dan logika keputusan, mampu menolak atau mengoreksi rekomendasi, dan tidak mengalami penalti otomatis dari model yang tidak transparan.

Kerangka HCIE-2045

Berdasarkan sintesis, penelitian ini mengusulkan *Human-Centered Industrial Ergonomics* 2045 (HCIE-2045), yaitu *framework* enam kapabilitas yang menempatkan pekerja di pusat *loop data-assessment-intervention*. Kerangka ini sengaja tidak dimulai dari pemilihan teknologi. Titik awalnya adalah pemahaman manusia dan konteks kerja, karena sistem yang salah mendefinisikan kebutuhan sejak awal hanya akan mengotomasi ketidaksesuaian yang sudah ada.

Kapabilitas pertama adalah memahami konteks melalui HCD: karakteristik pekerja, tujuan tugas, variasi kondisi, *pain point*, dan *voice of worker*. Kapabilitas kedua adalah *sense and assess*, yaitu mengkombinasikan observasi ergonomi, sensor, *computer vision*, *physiological measures*, *self-report*, dan *production data* untuk membangun *assessment* multidimensi. Kapabilitas ketiga adalah *adapt and augment*: hasil *assessment* harus mengarah pada perubahan nyata seperti *dynamic task allocation*, *workstation adjustment*, *cobot assistance*, *decision support*, atau *training*. Kapabilitas keempat adalah *include*, memastikan desain mengakomodasi variasi usia, kemampuan fisik/ sensorik/ kognitif, tingkat keterampilan, bahasa, *gender*, dan disabilitas. Kapabilitas kelima adalah *govern*, yang mencakup transparansi AI, *privacy*, *cybersecurity*, *fairness*, *human override*, dan batas pemanfaatan data. Kapabilitas keenam adalah *learn and improve*: sistem harus terus mengevaluasi *outcomes* dan memperbaiki desain bersama pekerja.

Gambar 1. Kerangka *Human-Centered Industrial Ergonomics* 2045 (HCIE-2045)

Secara teoretis, HCIE-2045 memperluas definisi ergonomi sebagai optimasi serentak *well-being* dan *system performance* [1] dengan dua tambahan penting. Pertama, data mengenai manusia diposisikan sebagai *input* untuk *redesign* sistem, bukan sekadar *surveillance*. Kedua, *inclusive design* dan *governance* diperlakukan sebagai bagian dari *engineering requirement*, bukan isu tambahan setelah implementasi. Dengan demikian, keberhasilan AI industri tidak diukur dari tingkat otonomi tertinggi, melainkan dari kecocokan alokasi fungsi, kualitas interaksi, kemampuan adaptasi, dan *outcome* manusia-sistem yang berkelanjutan.

Relevansi terhadap Indonesia Emas 2045

HCIE-2045 memiliki relevansi langsung terhadap dua agenda RPJPN: peningkatan daya saing SDM dan transformasi ekonomi berbasis produktivitas, inovasi, manufaktur, digitalisasi, serta ekonomi hijau [8]. Hubungan tersebut penting karena target manufaktur 2045 tidak hanya membutuhkan investasi mesin dan *digital infrastructure,* tetapi juga *workforce capability* yang

ISSN 2338-7122

mampu berkolaborasi dengan sistem cerdas. *Human-centricity* karena itu harus diposisikan sebagai *productive capability*: sistem yang lebih aman, mudah dipelajari, adaptif, dan inklusif dapat menurunkan *loss* akibat *error*, *fatigue*, *injury*, *turnover*, serta *skill mismatch* sekaligus memperbaiki kualitas dan fleksibilitas.

Bagi Indonesia, isu *inclusion* juga strategis. Basis tenaga kerja besar dan heterogen membuat pendekatan "*average worker*" tidak memadai. *Digital work instruction*, AI *assistant*, atau *cobot interface* yang efektif bagi *engineer* muda belum tentu sesuai untuk operator senior, pekerja dengan literasi digital berbeda, atau pekerja dengan keterbatasan sensorik. HCD dan *Inclusive Design* mendorong evaluasi langsung bersama kelompok pengguna yang berbeda sebelum teknologi diskalakan. Pendekatan ini memperkuat kesempatan kerja yang setara sekaligus mengurangi risiko bahwa digitalisasi menciptakan kelompok pekerja yang tertinggal (Tabel 2).

Tabel 2. Pemetaan HCIE-2045 terhadap agenda Indonesia Emas 2045

Agenda/target	Risiko jika *technology-first*	Kontribusi HCIE-2045	Indikator yang disarankan
Daya saing SDM	*Deskilling, overload, skill mismatch*.	*Participatory design, adaptive training, augmentation*.	*Skill acquisition, autonomy, trust, learning time*.
Produktivitas manufaktur	*Local optimization; human variability* diabaikan.	*Dual optimization: performance + well-being*.	OEE/ *quality + fatigue, error, recovery time.*
Transformasi digital	*Surveillance, automation bias,* rendahnya *acceptance*.	*Transparent* AI, *human override, worker data governance.*	*Acceptance, explainability, override success, privacy incidents*.
Inklusivitas	Teknologi cocok hanya untuk "*average user*".	*Inclusive design* dan *accessibility* sejak awal.	*Task accessibility, accommodation rate, usability* lintas kelompok.
Green & resilient industry	Efisiensi energi tetapi sistem kerja rapuh.	*Sustainability + human resilience + adaptive capacity*.	*Absence/injury, cross-skill coverage, recovery time, resource intensity*.

Agenda Riset dan Implementasi Teknik Industri

Terdapat lima agenda riset prioritas. Pertama, *pengembangan metrik total system performance* yang menggabungkan *productivity/ quality* dengan *physical load*, *mental workload*, *trust, autonomy*, *usability*, *inclusion*, dan *well-being*. Kedua, validasi teknologi *sensing* dan AI pada lingkungan manufaktur Indonesia yang memiliki variasi pencahayaan, *layout*, proses manual-semiotomatis, serta heterogenitas pekerja. Ketiga, desain *human*-AI *function allocation* yang mempertimbangkan *task criticality*, *uncertainty*, *operator competence*, dan kebutuhan *human override*. Keempat, *governance data* pekerja yang mengatur *purpose limitation*, *akses*, *retensi*, *fairness*, serta penggunaan data untuk *improvement* dan bukan *punishment*. Kelima, model implementasi pada industri kecil dan menengah, karena sebagian besar *framework Industry* 5.0 saat ini diasumsikan berada pada perusahaan dengan *digital maturity* tinggi.

Dari perspektif praktik, implementasi dapat dimulai dengan pilot berisiko rendah. Perusahaan memilih satu proses dengan masalah ergonomi atau *cognitive load* yang jelas, memetakan *user journey* dan *work as done*, menetapkan *baseline* ergonomi serta kinerja, lalu melakukan *co-design* solusi bersama operator. Teknologi baru hanya diadopsi jika memberi *improvement* yang terukur pada kedua sisi: *performance* dan *human outcome*. Setelah *pilot*, evaluasi harus mencakup *usability*, *trust*, *learning curve*, *unintended consequences*, dan distribusi manfaat antar kelompok pekerja. Siklus ini konsisten dengan prinsip HCD yang iteratif [10] dan mencegah organisasi mengunci investasi pada solusi yang secara teknis canggih tetapi tidak *usable* atau tidak diterima pengguna.

Secara proposisional, penelitian lanjutan dapat menguji bahwa dampak positif AI terhadap produktivitas akan lebih kuat ketika pekerja dilibatkan dalam desain; bahwa hubungan

ISSN 2338-7122

automation level dengan *well-being* dimediasi oleh *perceived control* dan *task-technology fit*; bahwa *inclusive design* memoderasi manfaat teknologi pada *workforce* yang heterogen; dan bahwa *continuous ergonomic sensing* hanya meningkatkan keselamatan jika *feedback* dapat ditindaklanjuti, dipercaya, dan dikelola dengan *governance* yang memadai. Pengujian empiris dapat menggunakan *longitudinal field study*, *quasi-experiment*, atau *mixed methods* dengan menggabungkan data produksi, *physiological/ biomechanical measures*, NASA-TLX atau *instrumen workload* lain, *usability*, *trust*, dan wawancara mendalam.

Dengan agenda tersebut, peran Teknik Industri menuju 2045 bukan sekadar mengoptimalkan mesin atau algoritma, tetapi merancang *socio-technical system* yang mampu belajar dan beradaptasi bersama manusia. Ini menjadikan ergonomi penghubung antara transformasi digital dan transformasi SDM: teknologi yang lebih cerdas digunakan untuk membuat sistem kerja lebih sesuai dengan manusia, sementara manusia memperoleh kapasitas baru untuk menghasilkan nilai pada sistem yang lebih kompleks.

Keterbatasan Penelitian

Kerangka HCIE-2045 pada penelitian ini masih merupakan hasil sintesis konseptual dan belum divalidasi secara empiris pada perusahaan atau lingkungan manufaktur di Indonesia. Selain itu, korpus *review* bersifat heterogen dalam desain, teknologi, populasi, dan *outcome* sehingga perbandingan kuantitatif langsung tidak dilakukan. Karena itu, efektivitas, keandalan indikator, dan generalisasi kerangka perlu diuji melalui studi lapangan lintas sektor, *pilot implementation*, *quasi-experiment*, atau *longitudinal study* dengan menggabungkan indikator kinerja sistem dan *outcome* manusia.

Kesimpulan dan Saran

Sintesis menunjukkan bahwa *Industry* 5.0 memperluas domain ergonomi industri dari pengendalian beban fisik menuju desain sistem kerja cerdas yang sekaligus mempertimbangkan dimensi fisik, kognitif, organisasional, inklusi, dan *governance*. AI, *computer vision*, *wearable*, *cobot*, *Human Digital Twin*, XR, dan *exoskeleton* menawarkan peluang untuk melakukan *assessment* kontinyu, personalisasi, dan augmentasi kapabilitas pekerja, tetapi manfaat tersebut tidak otomatis muncul dari tingkat digitalisasi yang lebih tinggi. Teknologi yang tidak dirancang secara *human-centered* dapat memindahkan risiko menjadi *cognitive overload*, *automation bias*, *deskilling*, *exclusion*, atau *surveillance*. Kerangka HCIE-2045 yang diusulkan menempatkan pekerja pada pusat enam kapabilitas memahami konteks, *sense and assess*, *adapt and augment*, *include*, *govern*, serta *learn and improve* dan menghubungkan *outcome* teknologi dengan keselamatan, kesejahteraan, produktivitas, inklusi, resiliensi, serta keberlanjutan. Dalam konteks Indonesia Emas 2045, pendekatan ini relevan untuk menjembatani target transformasi manufaktur dan digital dengan peningkatan daya saing SDM. Penelitian selanjutnya perlu memvalidasi HCIE-2045 melalui studi lapangan lintas sektor manufaktur Indonesia, menguji hubungan antara partisipasi pekerja, tingkat otomasi, *trust*, *workload*, dan *productivity*, serta mengembangkan indikator *human-centered performance* yang dapat diintegrasikan ke sistem manajemen operasi. Pada tingkat implementasi, organisasi disarankan memulai dari *problem* kerja yang nyata, melakukan *co-design* dengan pekerja, membangun *baseline human-system performance*, dan hanya menskalakan teknologi setelah manfaat serta risiko bagi manusia tervalidasi. Perlu ditegaskan bahwa HCIE-2045 yang diusulkan belum merupakan model yang telah tervalidasi secara empiris; pada tahap ini kerangka tersebut berfungsi sebagai proposisi desain dan agenda pengujian untuk konteks manufaktur Indonesia.

Referensi

[1] International Ergonomics Association, “What Is Ergonomics (HFE)? Definition and Applications,” IEA, 2026. Available: https://iea.cc/about/what-is-ergonomics/.

[2] International Labour Organization, “Human Factors and Ergonomics (HFE),” ILO, 2024. Available: https://www.ilo.org/ergonomics.

[3] European Commission, Industry 5.0: Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021. doi: 10.2777/308407.

[4] S. Hermawati, R. Correa, M. Mohan, G. Lawson, and R. Houghton, "Defining human-centricity in Industry 5.0 and assessing the readiness of ergonomics/human factors communities in UK," Ergonomics, vol. 68, no. 6, pp. 857–876, 2025. doi: 10.1080/00140139.2024.2343947.

[5] M. Trstenjak, A. Benešova, T. Opetuk, and H. Cajner, "Human Factors and Ergonomics in Industry 5.0 A Systematic Literature Review," Applied Sciences, vol. 15, no. 4, art. 2123, 2025. doi: 10.3390/app15042123.

[6] E. Yahia, F. Magnani, L. Joblot, M. Passalacqua, and R. Pellerin, "Exploring the Effects of Industry 4.0/5.0 on Human Factors: A Preliminary Systematic Literature Review," IFAC-PapersOnLine, vol. 58, no. 19, pp. 539-544, 2024. doi: 10.1016/j.ifacol.2024.09.268.

[7] L. Gualtieri, F. Fraboni, H. Brendel, L. Pietrantoni, R. Vidoni, and P. Dallasega, "Updating design guidelines for cognitive ergonomics in human-centred collaborative robotics applications: An expert survey," Applied Ergonomics, vol. 117, art. 104246, 2024. doi: 10.1016/j.apergo.2024.104246.

[8] Kementerian PPN/Bappenas, "Indonesia Emas 2045: Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional 2025-2045," berdasarkan Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 59 Tahun 2024, 2024. Available: https://www.indonesia2045.go.id/.

[9] Badan Pusat Statistik, "Keadaan Ketenagakerjaan Indonesia Februari 2025," Berita Resmi Statistik, 5 Mei 2025. Available: https://www.bps.go.id/.

[10] ISO, ISO 9241-210:2019 Ergonomics of Human-System Interaction Part 210: Human-Centred Design for Interactive Systems. Geneva: International Organization for Standardization, 2019.

[11] J. Yang, Y. Liu, and P. L. Morgan, "Human-machine interaction towards Industry 5.0: Human-centric smart manufacturing," Digital Engineering, vol. 2, art. 100013, 2024. doi: 10.1016/j.dte.2024.100013.

[12] N. Hasani, A. Hosseini, Y. Ashjazadeh, V. Diederichs, S. Ghotb, M. Riggio, E. Hansen, and V. Nasir, "Outlook on human-centred design in Industry 5.0: towards mass customisation, personalisation, co-creation, and co-production," International Journal of Sustainable Engineering, vol. 18, no. 1, art. 2486343, 2025. doi: 10.1080/19397038.2025.2486343.

[13] T. Agostinelli, A. Generosi, S. Ceccacci, et al., "Validation of computer vision-based ergonomic risk assessment tools for real manufacturing environments," Scientific Reports, vol. 14, art. 27785, 2024. doi: 10.1038/s41598-024-79373-4.

[14] J. E. Naranjo, C. A. Mora, D. F. Bustamante Villagómez, M. G. Mancheno Falconi, and M. V. Garcia, "Wearable Sensors in Industrial Ergonomics: Enhancing Safety and Productivity in Industry 4.0," Sensors, vol. 25, no. 5, art. 1526, 2025. doi: 10.3390/s25051526.

[15] F. G. Antonaci, E. C. Olivetti, F. Marcolin, and I. A. Castiblanco Jimenez, "Workplace Well-Being in Industry 5.0: A Worker-Centered Systematic Review," Sensors, vol. 24, no. 17, art. 5473, 2024. doi: 10.3390/s24175473.

[16] R. Gervasi, M. Capponi, D. Antonelli, L. Mastrogiacomo, and F. Franceschini, "A human-centered perspective in repetitive assembly processes: preliminary investigation of cognitive support of collaborative robots," Procedia Computer Science, vol. 232, pp. 2249-2258, 2024. doi: 10.1016/j.procs.2024.02.044.

[17] B. Wang, H. Zhou, X. Li, G. Yang, P. Zheng, C. Song, Y. Yuan, T. Wuest, H. Yang, and L. Wang, "Human Digital Twin in the context of Industry 5.0," Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 85, art. 102626, 2024. doi: 10.1016/j.rcim.2023.102626.

[18] B. Gaffinet, J. Al Haj Ali, Y. Naudet, and H. Panetto, "Human Digital Twins: A systematic literature review and concept disambiguation for Industry 5.0," Computers in Industry, vol. 166, art. 104230, 2025. doi: 10.1016/j.compind.2024.104230.

[19] M. Eswaran, P. J. C. Samuel, S. K. Karthika, B. A. G. Yuvaraju, A. Inkulu, and M. V. A. R. Bahubalendruni, "Extended reality (XR) for industrial assembly: A state-of-the-art review toward human-centric Industry 5.0," Expert Systems with Applications, vol. 307, art. 130877, 2026. doi: 10.1016/j.eswa.2025.130877.

[20] J. Ahmad, V. Fanti, D. G. Caldwell, and C. Di Natali, "Framework for the adoption, evaluation and impact of occupational exoskeletons at different technology readiness levels: A systematic review," Robotics and Autonomous Systems, vol. 179, art. 104743, 2024. doi: 10.1016/j.robot.2024.104743.

[21] D. A. D. J. Pacheco and B. Iwaszczenko, "Unravelling human-centric tensions towards Industry 5.0: Literature review, resolution strategies and research agenda," Digital Business, vol. 4, no. 2, art. 100090, 2024. doi: 10.1016/j.digbus.2024.100090.

[22] I. Bolis, J. N. Marques, E. Cagno, and S. N. Morioka, "Digital technologies, sustainability, and work: How can these themes be brought together to promote a human-centered future in Industry 5.0 implementation?," Applied Ergonomics, vol. 125, art. 104475, 2025. doi: 10.1016/j.apergo.2025.104475.

[23] A. Sbaragli, F. Tomelleri, F. Picariello, E. Picariello, and F. Pilati, "Safe Operator 5.0 digital architecture: towards resilient human-centric manufacturing systems," IFAC-PapersOnLine, vol. 58, no. 19, pp. 265-270, 2024. doi: 10.1016/j.ifacol.2024.09.187.

[24] Q. Bao, J. Niu, P. Zheng, H. Guo, and A. Zhang, "Perception, assessment and enhancement for operators in human-centric manufacturing cells: An ergonomics-oriented systematic review," Journal of Manufacturing Systems, vol. 88, pp. 52-87, 2026. doi: 10.1016/j.jmsy.2026.05.018.

[25] S. W. Soebroto, "Perancangan Ergonomi: Human-Centered Design & Inclusive Design," materi ajar Laboratorium Ergonomi dan Perancangan Sistem Kerja, Departemen Teknik Sistem dan Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2026.