INER

Industrial Engineering Research Journal

Volume 2 No. 1 Maret 2026 (1-8 hal) – Journal homepage: ejournal.digitechuniversity.ac.id/index.php/iner/

Model Digital Twin Human-Centric untuk Optimasi Produktivitas, Energi, dan Ergonomi UKM Manufaktur

Human-Centric Digital Twin Model for Productivity, Energy, and Ergonomics Optimization in Manufacturing SMEs

Faikar Mujahid Akbar Soekiswo[1]
[1]Universitas Teknologi Digital, Bandung, Indonesia
*Corresponding author: faikar@digitechuniversity.ac.id

Info Artikel

Riwayat Artikel:
Diajukan: 09/01/2026
Diterima: 15/01/2026
Diterbitkan: 31/03/2026

Kata Kunci:
Digital Twin; Industry 5.0; Lean Six Sigma; ergonomi; manufaktur berkelanjutan

A B S T R A K

Transformasi digital pada usaha kecil dan menengah (UKM) manufaktur umumnya berorientasi pada peningkatan produktivitas mesin, sementara konsumsi energi dan beban ergonomi operator belum dipertimbangkan secara terpadu. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model Human-Centric Digital Twin–Lean Six Sigma (HCDT-LSS) yang mengintegrasikan pemantauan kondisi mesin, predictive maintenance, perbaikan proses, efisiensi energi, dan risiko ergonomi operator dalam mekanisme pengambilan keputusan. Penelitian menggunakan pendekatan design science research dan simulasi kejadian diskrit stokastik pada sistem produksi tiga stasiun selama satu shift delapan jam. Empat skenario dibandingkan melalui 60 replikasi: kondisi dasar, Lean, Digital Twin–Predictive Maintenance, dan HCDT-LSS. Hasil menunjukkan HCDT-LSS meningkatkan keluaran produk baik 27,04%, OEE dari 72,41% menjadi 92,00%, serta menurunkan konsumsi energi spesifik 13,95% dan indeks risiko ergonomi 24,77% dibandingkan kondisi dasar. Temuan menunjukkan produktivitas meningkat tanpa mengorbankan efisiensi energi dan kesejahteraan operator. Model berpotensi menjadi kerangka digital bertahap terjangkau; validasi industri nyata diperlukan.

Keywords:
Digital Twin; Industry 5.0; Lean Six Sigma; ergonomics; sustainable manufacturing

A B S T R A C T

Digital transformation in small and medium-sized manufacturing enterprises (SMEs) often focuses on improving machine productivity, while energy consumption and operator ergonomic risks are not considered holistically. This study aims to develop a Human-Centric Digital Twin–Lean Six Sigma (HCDT-LSS) model integrating machine condition monitoring, predictive maintenance, process improvement, energy efficiency, and operator ergonomic risk into a unified decision-making mechanism. The study employs a design science research approach and stochastic discrete-event simulation of a three-station production system during an eight-hour shift. Four scenarios were compared through 60 replications: baseline, Lean, Digital Twin–Predictive Maintenance, and HCDT-LSS. Results show that HCDT-LSS increases good output by 27.04%, improves OEE from 72.41% to 92.00%, and reduces specific energy consumption by 13.95% and ergonomic risk index by 24.77% compared with baseline. The findings demonstrate that productivity improvements need not compromise energy efficiency or operator well-being.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

https://doi.org/12.3456/cyberlaw

e – ISSN: XXXX-XXXX
p – ISSN: XXXX-XXXX

©2026 INER, All rights reserved.

Silakan kutip artikel ini sebagai: Soekiswo, AMF., Model Digital Twin Human-Centric untuk Optimasi Produktivitas, Energi, dan Ergonomi UKM Manufaktur, https://doi.org/12.3456 /iner

1. Pendahuluan

Industri manufaktur menghadapi tekanan simultan untuk meningkatkan produktivitas, fleksibilitas, efisiensi energi, kualitas, dan kesejahteraan pekerja. Perubahan tersebut mendorong perkembangan paradigma Industry 5.0 yang tidak hanya menempatkan teknologi sebagai instrumen peningkatan efisiensi, tetapi juga menekankan tiga prinsip utama, yaitu *human-centricity*, keberlanjutan, dan resiliensi. Paradigma ini melengkapi Industry 4.0 dengan menempatkan pekerja sebagai bagian sentral sistem produksi, bukan sekadar sumber daya yang harus dimaksimalkan utilisasinya.

Salah satu teknologi yang relevan dalam transformasi tersebut adalah *Digital Twin (DT),* yaitu representasi digital dinamis dari sistem fisik yang diperbarui menggunakan data sehingga mampu mendukung pemantauan, simulasi, prediksi, dan optimasi. Perkembangan DT tidak lagi terbatas pada mesin dan aset produksi. Konsep *Human Digital Twin* mulai memasukkan karakteristik fisik, ergonomi, perilaku, dan interaksi manusia ke dalam sistem virtual. Literatur mutakhir menunjukkan bahwa DT dipandang sebagai salah satu teknologi penting dalam implementasi Industry 5.0 karena memungkinkan integrasi antara sistem fisik, informasi digital, dan manusia.

Dalam pemeliharaan fasilitas manufaktur, integrasi DT dengan predictive maintenance memungkinkan kondisi mesin dipantau dan kegagalan diperkirakan sebelum menyebabkan penghentian produksi. Pendekatan DT berbasis model fisik telah digunakan untuk memprediksi *remaining useful life,* sedangkan penelitian yang lebih baru menunjukkan berkembangnya penggunaan machine learning untuk meningkatkan kemampuan prediktif DT. Namun, integrasi keputusan produksi dan pemeliharaan masih menjadi area yang relatif terbuka untuk dikembangkan.

Aspek energi menjadi persoalan lain yang penting. Peningkatan produksi tidak otomatis identik dengan peningkatan keberlanjutan apabila konsumsi energi per unit produk tetap tinggi. DT memungkinkan konsumsi energi dimodelkan berdasarkan status operasi mesin dan digunakan sebagai dasar optimasi. Studi terdahulu memperlihatkan bahwa integrasi DT, *big data,* dan manajemen energi dapat meningkatkan transparansi konsumsi energi serta mendukung pengurangan konsumsi energi spesifik.

Pada saat yang sama, sistem manufaktur khususnya UKM masih banyak bergantung pada aktivitas manual operator. Optimasi siklus produksi yang hanya berorientasi pada *throughput* berpotensi meningkatkan kelelahan, postur tidak ergonomis, dan beban kerja. Penelitian tentang Human Digital Twin menunjukkan bahwa informasi postur, beban kerja, dan kondisi operator dapat digunakan dalam penjadwalan ulang aktivitas. DT juga telah digunakan untuk pemantauan ergonomi dan identifikasi kelelahan biomekanik pada pekerjaan manufaktur.

Pendekatan *Lean dan Lean Six Sigma (LSS)* sebenarnya menawarkan mekanisme sistematis untuk menghilangkan aktivitas tidak bernilai tambah, mengurangi variasi proses, dan meningkatkan kualitas. Penelitian mengenai hubungan antara *Lean,* LSS, dan Industry 4.0 menunjukkan adanya karakteristik yang saling melengkapi. Teknologi digital menyediakan data beresolusi tinggi, sedangkan *Lean Six Sigma* menyediakan disiplin pemecahan masalah dan kerangka pengendalian proses.

Meskipun demikian, sebagian besar kajian masih membahas produktivitas mesin, pemeliharaan, energi, atau faktor manusia secara terpisah. Tantangan utamanya adalah bagaimana menggabungkan indikator ekonomi-operasional, lingkungan, dan manusia dalam satu mekanisme keputusan yang cukup sederhana dan ekonomis untuk diterapkan oleh UKM manufaktur. Pada sistem labor-intensif, pengembangan DT bahkan menjadi lebih kompleks karena perilaku operator menciptakan variabilitas tambahan yang tidak muncul pada sistem otomatis penuh.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini mengusulkan *Human-Centric Digital Twin–Lean Six Sigma (HCDT-LSS)*. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi empat lapisan keputusan secara simultan: (1) perbaikan aliran proses berbasis Lean; (2) kondisi mesin dan predictive maintenance; (3) konsumsi energi per unit produk; dan (4) beban ergonomi operator. Berbeda dari DT konvensional yang mengoptimalkan mesin sebagai pusat sistem, model HCDT-LSS menempatkan produktivitas, energi, dan manusia sebagai tujuan optimasi yang setara.

Tujuan penelitian adalah mengembangkan arsitektur HCDT-LSS dan mengevaluasi secara numerik pengaruhnya terhadap OEE, throughput, konsumsi energi spesifik, dan risiko ergonomi dalam lingkungan UKM manufaktur. Penelitian juga menguji apakah perbaikan produktivitas dapat dicapai tanpa meningkatkan konsumsi energi per unit produk dan tanpa memperbesar risiko ergonomi pekerja..

2. Metode Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan design science research yang dikombinasikan dengan simulasi kejadian diskrit stokastik. Pendekatan tersebut dipilih karena tujuan utama penelitian bukan mengklaim pengamatan pada perusahaan tertentu, melainkan merancang dan menguji kelayakan awal artefak sistem keputusan HCDT-LSS. Model numerik merepresentasikan sel produksi UKM yang terdiri atas tiga stasiun proses serial dengan buffer terbatas dan keterlibatan operator pada masing-masing stasiun.

Sistem disimulasikan selama satu shift produksi sepanjang 480 menit. Waktu siklus nominal tiga stasiun masing-masing adalah 4,2; 5,0; dan 3,8 menit per unit. Stasiun kedua menjadi bottleneck dengan waktu siklus ideal 5 menit. Setiap mesin memiliki kemungkinan kegagalan stokastik yang direpresentasikan melalui mean time between failures (MTBF), sedangkan lama perbaikan direpresentasikan menggunakan mean time to repair (MTTR). Variasi waktu proses dimodelkan menggunakan distribusi lognormal untuk merepresentasikan variabilitas aktual yang lazim ditemukan dalam lingkungan produksi semi-manual.

Energi listrik dihitung berdasarkan status mesin. Mesin mempunyai status aktif, menganggur, dan mengalami gangguan, dengan daya yang berbeda untuk masing-masing status. Konsumsi energi spesifik dihitung menggunakan Persamaan (1):

$$SEC = \frac{E_{total}}{Q_{good}}$$

dengan (SEC) adalah specific energy consumption (kWh/unit), \(E_{total}) merupakan total energi selama shift, dan (Q_{good}) adalah jumlah unit baik.

Efektivitas produksi dihitung menggunakan pendekatan ekuivalen OEE pada level lini:

$$OEE = \frac{Q_{good} \times CT_{ideal}}{T_{planned}} \times 100\%$$

dengan (CT*ideal*) merupakan waktu siklus ideal bottleneck dan ($T_{planned}$) adalah waktu produksi yang direncanakan.

Risiko ergonomi direpresentasikan menggunakan *Ergonomic Risk Index (ERI)* berskala 1–7 yang mengadopsi prinsip interpretasi skala RULA. ERI dalam penelitian simulasi ini bukan hasil pengukuran RULA terhadap pekerja nyata, melainkan indikator proksi untuk mengevaluasi kemampuan mekanisme HCDT menurunkan paparan ergonomi. Nilai risiko stasiun dikombinasikan dengan waktu paparan operator dan faktor kelelahan. Untuk penelitian lapangan berikutnya, indikator tersebut harus digantikan dengan skor RULA/REBA aktual atau data motion capture.

Empat skenario eksperimen dikembangkan. S0 merupakan kondisi dasar tanpa intervensi digital. S1 menerapkan Lean melalui pengurangan waktu persiapan, variasi proses, dan cacat. S2 menerapkan DT-PdM melalui peningkatan MTBF, pengurangan MTTR, dan pengurangan konsumsi energi pada kondisi idle. S3 merupakan model HCDT-LSS yang mengombinasikan Lean, PdM, optimasi energi, pengendalian variasi, dan kebijakan beban kerja adaptif berdasarkan indeks ergonomi.

Tabel 1. Parameter utama skenario simulasi

Parameter	S0 Baseline	S1 Lean	S2 DT-PdM	S3 HCDT-LSS
Setup awal (menit)	20	12	18	10
Faktor waktu siklus	1	0,96	0,99	0,94
Koefisien variasi proses	0,18	0,14	0,15	0,11
MTBF (rentang menit)	135–165	135–165	200–230	225–255
MTTR (rentang menit)	15–20	15–20	10–12	8–10
Probabilitas produk baik	0,965	0,978	0,982	0,989
Faktor energi idle	1	0,95	0,88	0,8
Faktor risiko ergonomi	1	0,96	0,98	0,78

Setiap skenario dijalankan sebanyak 60 replikasi dengan kondisi acak independen. Jumlah replikasi tersebut digunakan untuk mengurangi kemungkinan kesimpulan yang hanya berasal dari satu realisasi kejadian kerusakan atau variasi proses. Nilai rata-rata dan simpangan baku dihitung untuk setiap indikator. Perbandingan S0 dan S3 juga diuji menggunakan *Welch independent-samples t-test* karena varians antarskenario tidak diasumsikan identik. Taraf signifikansi ditetapkan sebesar 5%.

Arsitektur HCDT-LSS dibangun berdasarkan siklus *Sense–Twin–Analyze–Improve–Control*. Lapisan sense mengumpulkan data mesin, energi, kualitas, dan operator. Lapisan twin memperbarui status virtual sistem. Lapisan analyze memperkirakan risiko kerusakan, konsumsi energi, kemacetan proses, dan beban ergonomi. Lapisan improve mengevaluasi alternatif keputusan, sedangkan lapisan control mengirimkan rekomendasi jadwal produksi, pemeliharaan, kecepatan proses, atau rotasi kerja. Konsep ini sejalan dengan perkembangan DT yang semakin mengintegrasikan kondisi manusia, mesin, dan pengambilan keputusan produksi.

Gambar 1. Arsitektur konseptual HCDT-LSS

Mesin + Operator + Energi + Kualitas
↓
IoT / Sensor / Input Operator
↓
Human-Centric Digital Twin
↓
Analitik: PdM – OEE – SEC – ERI – Bottleneck
↓
Lean Six Sigma / Optimasi Keputusan
↓
Produksi – Maintenance – Rotasi Kerja – Energy Control
↓
Umpan Balik ke Sistem Fisik

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kinerja Sistem Produksi

Hasil 60 replikasi menunjukkan pola peningkatan yang konsisten dari skenario dasar menuju model terintegrasi. Ringkasan hasil disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil simulasi empat skenario

Indikator	S0 Baseline	S1 Lean	S2 DT-PdM	S3 HCDT-LSS
Produk baik/shift	69,52 ± 7,96	73,50 ± 7,62	78,87 ± 5,29	88,32 ± 4,44
OEE (%)	72,41 ± 8,30	76,56 ± 7,94	82,15 ± 5,51	92,00 ± 4,62
SEC (kWh/unit)	1,18 ± 0,05	1,11 ± 0,04	1,11 ± 0,03	1,02 ± 0,02
ERI	5,92 ± 0,03	5,62 ± 0,03	5,73 ± 0,01	4,45 ± 0,00
Energi total (kWh/shift)	81,80 ± 6,96	81,16 ± 6,09	87,25 ± 4,37	89,73 ± 3,45
WIP akhir (unit)	8,77 ± 1,90	9,18 ± 2,43	9,60 ± 1,14	9,33 ± 1,20

Skenario Lean meningkatkan rata-rata produk baik dari 69,52 menjadi 73,50 unit/shift. Perbaikan tersebut terutama dihasilkan oleh pengurangan waktu setup, penurunan variasi waktu proses, dan peningkatan yield. Namun, peningkatannya masih terbatas karena kegagalan mesin belum ditangani secara prediktif.

DT-PdM meningkatkan produk baik menjadi 78,87 unit/shift dan OEE menjadi 82,15%. Hal tersebut menunjukkan bahwa pengurangan gangguan tidak terencana mampu menghasilkan peningkatan performa yang lebih besar dibandingkan perbaikan proses konvensional saja. Temuan ini konsisten dengan literatur yang menunjukkan kemampuan DT-PdM dalam mendukung pemantauan kondisi, memperkirakan kegagalan, dan menurunkan downtime.

Kinerja tertinggi diperoleh pada S3 HCDT-LSS dengan rata-rata 88,32 produk baik per shift. Dibandingkan baseline, peningkatan throughput mencapai 27,04%, sedangkan OEE meningkat sebesar 19,59 poin persentase, dari 72,41% menjadi 92,00%.

Uji statistik antara S0 dan S3 menunjukkan perbedaan OEE yang signifikan ($p<0,001$). Hasil tersebut memperkuat argumen bahwa manfaat integrasi tidak semata berasal dari parameter tunggal, tetapi berasal dari interaksi pengurangan variasi proses, peningkatan reliabilitas, kualitas yang lebih tinggi, dan pengaturan beban kerja.

3.2. Dampak terhadap Efisiensi Energi

Hasil penting penelitian terlihat pada perbedaan antara energi total dan energi spesifik. Energi total S3 sebesar 89,73 kWh/shift, atau sekitar 9,69% lebih tinggi dibandingkan baseline. Apabila hanya energi total yang digunakan sebagai indikator, kondisi tersebut dapat keliru diinterpretasikan sebagai penurunan keberlanjutan.

Namun, kenaikan energi total terjadi karena jumlah produk baik bertambah 27,04%. Setelah konsumsi energi dinormalisasi terhadap unit produk baik, SEC justru turun dari 1,18 menjadi 1,02 kWh/unit, setara dengan penurunan sekitar 13,95%.

Hasil ini menunjukkan pentingnya menggunakan indikator intensitas energi dalam mengevaluasi transformasi digital. DT memungkinkan status mesin, pola idle, produksi aktual, dan konsumsi energi dianalisis sebagai suatu sistem, bukan sebagai variabel terpisah. Pendekatan tersebut sesuai dengan penelitian tentang energy digital twin yang menunjukkan potensi DT dalam pemantauan dan optimasi energi industri.

Secara praktis, implikasinya bagi UKM cukup penting. Target "mengurangi listrik bulanan" belum tentu tepat apabila volume produksi meningkat. Indikator yang lebih relevan adalah kWh per produk baik, energi per nilai tambah, atau biaya energi per produk yang memenuhi spesifikasi.

3.3. Dampak Human-Centric terhadap Ergonomi

Skenario DT-PdM meningkatkan performa mesin tetapi hanya menghasilkan perbaikan ERI dari 5,92 menjadi 5,73. Dengan kata lain, digitalisasi mesin saja tidak otomatis menghasilkan sistem kerja yang lebih ergonomis.

Hasil berbeda terlihat pada HCDT-LSS. ERI menurun menjadi 4,45, setara dengan pengurangan 24,77% dibandingkan baseline. Penurunan tersebut diperoleh melalui pengurangan faktor kelelahan dan penyeimbangan beban kerja dalam logika pengambilan keputusan.

Hasil tersebut mendukung prinsip Industry 5.0 bahwa transformasi teknologi harus meningkatkan kemampuan serta kesejahteraan manusia, bukan semata-mata meningkatkan utilisasi aset. Konsep HDT memungkinkan karakteristik operator dihubungkan secara langsung dengan model sistem sehingga kondisi kerja dapat menjadi variabel keputusan.

Greco et al. menunjukkan penggunaan DT untuk pemantauan ergonomi dalam proses manufaktur, sedangkan Sharotry et al. mengembangkan pendekatan DT untuk mendeteksi perubahan biomekanik yang berkaitan dengan kelelahan operator. Studi yang lebih baru juga menunjukkan perkembangan DT dengan pemodelan manusia berfidelitas tinggi dan integrasi ergonomi pada sel kerja kolaboratif.

Kontribusi penelitian ini terletak pada penempatan indikator manusia sebagai constraint sekaligus objective, bukan sebagai evaluasi yang dilakukan setelah sistem produksi dioptimasi. Dalam implementasi nyata, misalnya, jadwal dengan produktivitas tertinggi dapat ditolak apabila menyebabkan skor ergonomi melewati batas yang diperbolehkan. Pendekatan semacam ini mengubah filosofi optimasi dari machine-centered optimization menuju socio-technical optimization.

3.4. Sinergi Lean Six Sigma dan Digital Twin

Lean dan DT mempunyai karakteristik yang berbeda tetapi saling melengkapi. Lean berfokus pada eliminasi pemborosan, aliran proses, standard work, kualitas, dan perbaikan berkelanjutan. Digital Twin menyediakan visibilitas kondisi sistem secara dinamis. Tanpa Lean, perusahaan berpotensi mendigitalisasi proses yang sebenarnya masih penuh pemborosan. Sebaliknya, Lean tanpa dukungan data real-time menghadapi keterbatasan ketika proses mempunyai variabilitas dan kompleksitas tinggi.

Literatur menunjukkan adanya hubungan sinergis antara Lean/LSS dan teknologi Industry 4.0. Sordan et al. mengidentifikasi berbagai titik kontak antara praktik Lean Six Sigma dan teknologi Industry 4.0, sedangkan

Skalli et al. menunjukkan bahwa teknologi digital dapat menjadi penggerak LSS melalui peningkatan ketersediaan data dan analitik.

Dalam HCDT-LSS, siklus DMAIC dapat diterjemahkan ke lingkungan digital. Tahap Define menentukan CTQ berupa OEE, SEC, kualitas, dan ergonomi. Tahap Measure memanfaatkan sensor mesin, energi, kualitas, serta data operator. Tahap Analyze menggunakan digital twin untuk mengidentifikasi bottleneck, pola gangguan, dan risiko. Tahap Improve mensimulasikan alternatif keputusan sebelum diterapkan pada sistem fisik. Tahap Control memanfaatkan pembaruan data digital twin sebagai pengendalian berkelanjutan.

Dengan mekanisme tersebut, eksperimen yang mahal atau berisiko dapat diuji terlebih dahulu secara virtual. Hal ini penting bagi UKM yang mempunyai sumber daya terbatas dan tidak mudah menghentikan produksi hanya untuk melakukan eksperimen perbaikan.

3.5. Kebaruan Model

Kebaruan model HCDT-LSS dibandingkan pendekatan konvensional dapat diringkas melalui empat karakteristik.

Pertama, model menggunakan multi-performance perspective. Produktivitas tidak dinilai secara independen, melainkan bersama energi dan ergonomi.

Kedua, model mengintegrasikan machine twin dan human-oriented information. Hal tersebut penting karena banyak UKM belum sepenuhnya otomatis sehingga operator tetap berperan sebagai sumber fleksibilitas produksi.

Ketiga, HCDT-LSS menggabungkan analitik prediktif dan perbaikan proses. Prediksi kegagalan tidak hanya menghasilkan alarm pemeliharaan, tetapi menjadi masukan untuk penjadwalan dan pengendalian aliran produksi.

Keempat, model dirancang dengan prinsip incremental digitalization. UKM tidak harus langsung mengimplementasikan full-scale digital twin. Implementasi dapat diawali dengan data mesin dan energi yang paling kritis, kemudian diperluas dengan kualitas, pemeliharaan, dan data ergonomi.

Pendekatan bertahap menjadi relevan karena implementasi DT mempunyai tantangan berupa integrasi data, standardisasi, biaya, kualitas model, keamanan, dan kebutuhan kompetensi. Literatur terbaru mengenai DT dan predictive maintenance juga masih mengidentifikasi isu generalisasi, skalabilitas, dan explainability.

3.6. Implikasi Praktis bagi UKM Manufaktur

Untuk implementasi minimum, UKM dapat membangun sistem HCDT-LSS menggunakan sensor arus listrik, pencatat waktu siklus, data downtime, data reject, dan lembar penilaian ergonomi. Digital twin pada tahap awal tidak harus berupa visualisasi tiga dimensi yang kompleks. Model proses sederhana yang dapat memperbarui status mesin dan memprediksi indikator operasional sudah dapat memberikan nilai keputusan.

Tahap implementasi dapat dimulai dari satu bottleneck. Data waktu siklus, kerusakan, energi, dan kualitas dikumpulkan untuk membangun baseline. Setelah model tervalidasi, perusahaan dapat menguji skenario perubahan kecepatan, preventive/predictive maintenance, ukuran batch, jadwal operator, atau waktu istirahat sebelum keputusan diterapkan.

Pendekatan tersebut juga mempunyai manfaat bagi publik yang lebih luas. Efisiensi energi dapat membantu mengurangi intensitas sumber daya industri; ergonomi yang lebih baik mendukung kesehatan kerja; sedangkan peningkatan produktivitas UKM dapat memperkuat daya saing dan keberlanjutan usaha. Oleh karena itu, digitalisasi yang berorientasi pada manusia berpotensi menghasilkan manfaat ekonomi, lingkungan, dan sosial secara bersamaan.

3.7. Keterbatasan Penelitian

Penelitian mempunyai beberapa keterbatasan yang perlu dinyatakan secara eksplisit. Pertama, hasil berasal dari model simulasi proof-of-concept, bukan data operasional perusahaan. Oleh karena itu, besarnya peningkatan 27,04% tidak dapat digeneralisasikan sebagai peningkatan yang pasti diperoleh semua UKM.

Kedua, indikator ergonomi menggunakan ERI proksi berbasis skala 1–7 dan belum menggunakan pengukuran postur pekerja secara aktual. Penelitian berikutnya perlu mengintegrasikan RULA, REBA, motion capture, wearable sensor, denyut jantung, atau indikator kelelahan lain dengan tetap memperhatikan privasi pekerja.

Ketiga, model belum memasukkan biaya investasi sensor, perangkat lunak, pelatihan, keamanan siber, dan biaya perubahan organisasi. Analisis selanjutnya dapat menggunakan techno-economic analysis untuk menentukan payback period dan tingkat kesiapan digital minimum yang diperlukan.

Keempat, penelitian belum mempertimbangkan aspek etika penggunaan data manusia. HDT dapat mengandung data sensitif mengenai pekerja sehingga implementasinya harus mengedepankan transparansi, persetujuan pekerja, minimisasi data, keamanan, serta memastikan teknologi digunakan untuk meningkatkan kondisi kerja dan bukan sebagai instrumen pengawasan berlebihan. Tantangan privasi, consent, dan keamanan juga menjadi perhatian utama dalam literatur HDT.

4. Simpulan

Penelitian ini mengembangkan model Human-Centric Digital Twin–Lean Six Sigma (HCDT-LSS) untuk mengintegrasikan produktivitas, pemeliharaan, konsumsi energi, kualitas, dan ergonomi dalam satu mekanisme pengambilan keputusan pada UKM manufaktur. Berdasarkan eksperimen simulasi 60 replikasi, model terintegrasi menghasilkan rata-rata 88,32 produk baik per shift dibandingkan 69,52 produk pada kondisi dasar atau meningkat sebesar 27,04%. OEE meningkat dari 72,41% menjadi 92,00%, sedangkan konsumsi energi spesifik turun dari 1,18 menjadi 1,02 kWh/unit atau menurun 13,95%. Indeks risiko ergonomi turun sekitar 24,77%. Hasil juga menunjukkan bahwa energi total dapat meningkat ketika volume produksi naik, sehingga evaluasi keberlanjutan sebaiknya menggunakan konsumsi energi per unit produk dan bukan hanya konsumsi absolut. Temuan utama penelitian adalah bahwa optimasi produktivitas, efisiensi energi, dan kesejahteraan operator dapat dirancang sebagai tujuan yang saling melengkapi melalui integrasi Lean Six Sigma dan Human-Centric Digital Twin. Model ini berpotensi menjadi kerangka transformasi digital bertahap bagi UKM manufaktur. Namun, sebelum kesimpulan kausal diterapkan pada industri, model perlu divalidasi menggunakan data longitudinal pada perusahaan nyata serta dilengkapi analisis investasi, keamanan data, dan pengukuran ergonomi langsung.

5. Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada institusi dan seluruh pihak yang mendukung pengembangan kajian ini. Penelitian lanjutan diharapkan dapat melibatkan UKM manufaktur sebagai mitra validasi sehingga model yang dikembangkan dapat diuji menggunakan data produksi, energi, pemeliharaan, kualitas, dan ergonomi aktual.

6. Referensi

Aivaliotis, P., Georgoulias, K., & Chryssolouris, G. (2019). The use of Digital Twin for predictive maintenance in manufacturing. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 32(11), 1067–1080. doi:10.1080/0951192X.2019.1686173.

Barata, J., & Kayser, I. (2024). How will the digital twin shape the future of Industry 5.0? Technovation, 134, 103025. doi:10.1016/j.technovation.2024.103025.

Berti, N., Finco, S., Guidolin, M., & Battini, D. (2023). Towards Human Digital Twins to enhance workers' safety and production system resilience. IFAC-PapersOnLine, 56(2), 11062–11067. doi:10.1016/j.ifacol.2023.10.809.

Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021). Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation.

Chen, C., Fu, H., Zheng, Y., Tao, F., & Liu, Y. (2023). The advance of digital twin for predictive maintenance: The role and function of machine learning. Journal of Manufacturing Systems, 71, 581–594. doi:10.1016/j.jmsy.2023.10.010.

Greco, A., Caterino, M., Fera, M., & Gerbino, S. (2020). Digital twin for monitoring ergonomics during manufacturing production. Applied Sciences, 10(21), 7758. doi:10.3390/app10217758.

Kamble, S. S., Gunasekaran, A., Parekh, H., Mani, V., Belhadi, A., & Sharma, R. (2022). Digital twin for sustainable manufacturing supply chains: Current trends, future perspectives, and an implementation framework. Technological Forecasting and Social Change, 176, 121448. doi:10.1016/j.techfore.2021.121448.

Lu, Y., Zheng, H., Chand, S., Xia, W., Liu, Z., Xu, X., Wang, L., Qin, Z., & Bao, J. (2022). Outlook on human-centric manufacturing towards Industry 5.0. Journal of Manufacturing Systems, 62, 612–627. doi:10.1016/j.jmsy.2022.02.001.

Ma, S., Ding, W., Liu, Y., Ren, S., & Yang, H. (2022). Digital twin and big data-driven sustainable smart manufacturing based on information management systems for energy-intensive industries. Applied Energy, 326, 119986. doi:10.1016/j.apenergy.2022.119986.

Ma, S., Flanigan, K. A., & Bergés, M. (2024). State-of-the-art review and synthesis: A requirement-based roadmap for standardized predictive maintenance automation using digital twin technologies. Advanced Engineering Informatics, 62, 102800. doi:10.1016/j.aei.2024.102800.

Sharotry, A., Jimenez, J. A., Mendez Mediavilla, F. A., Wierschem, D., Koldenhoven, R. M., & Valles, D. (2022). Manufacturing operator ergonomics: A conceptual digital twin approach to detect biomechanical fatigue. IEEE Access, 10, 12774–12791. doi:10.1109/ACCESS.2022.3145984.

Skalli, D., Charkaoui, A., Cherrafi, A., Garza-Reyes, J. A., Antony, J., & Shokri, A. (2023). Industry 4.0 and Lean Six Sigma integration in manufacturing: A literature review, an integrated framework and proposed research perspectives. Quality Management Journal, 30(1), 16–40. doi:10.1080/10686967.2022.2144784.

Sordan, J. E., Oprime, P. C., Pimenta, M. L., Da Silva, S. L., & González, M. O. A. (2022). Contact points between Lean Six Sigma and Industry 4.0: A systematic review and conceptual framework. International Journal of Quality & Reliability Management, 39(9), 2155–2183. doi:10.1108/IJQRM-12-2020-0396.

Wang, B., Zhou, H., Li, X., Yang, G., Zheng, P., Song, C., Yuan, Y., Wuest, T., Yang, H., & Wang, L. (2024). Human Digital Twin in the context of Industry 5.0. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 85, 102626.

Wang, T., Liu, Z., Wang, L., Li, M., & Wang, X. V. (2025). A design framework for high-fidelity human-centric digital twin of collaborative work cell in Industry 5.0. Journal of Manufacturing Systems, 80, 140–156. doi:10.1016/j.jmsy.2025.02.018.

Yu, W., Patros, P., Young, B. R., Klinac, E., & Walmsley, T. G. (2022). Energy digital twin technology for industrial energy management: Classification, challenges and future. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 161, 112407. doi:10.1016/j.rser.2022.112407.