



Integrasi Berbasis Sistem Antara Rekayasa Operasi, Manajemen, dan MSDM untuk Kinerja Industri Berkelanjutan

Abdurrozzaq Hasibuan^{1*}, Rusli Yusuf², Suhela Putri Nasution³

^{1*}Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sumatera Utara, Medan, Sumatera Utara, 20217, Indonesia.

²Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas WR. SUPRATMAN, Surabaya, Jawa Timur 60111, Indonesia.

³Program Studi Budidaya Perkebunan, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sawit Indonesia, Medan Estate, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara, 20226, Indonesia

E-mail : ^{1*}rozzaq@uisu.ac.id; ²rusliyusufpalewai@gmail.com; ³suhelaputrinasion@itsi.ac.id
^{*)}rozzaq@uisu.ac.id

Abstrak-Organisasi industri saat ini menghadapi lingkungan operasional yang semakin kompleks akibat tingginya ketidakpastian, pesatnya perkembangan teknologi, serta meningkatnya tuntutan terhadap keberlanjutan. Kondisi tersebut menyebabkan peningkatan kinerja industri tidak lagi efektif apabila dilakukan melalui pendekatan teknis atau manajerial yang berdiri sendiri. Penelitian ini bertujuan menyusun kerangka kerja berbasis sistem yang mengintegrasikan rekayasa operasi, sistem manajemen, dan manajemen sumber daya manusia (MSDM) guna mendukung pencapaian kinerja industri yang berkelanjutan dengan pendekatan System Dynamics. Metode penelitian dirancang secara sistematis, meliputi tahap perumusan permasalahan, penetapan batasan sistem, penyusunan causal loop diagram, pengembangan model stock-flow, validasi model, serta simulasi berbagai skenario kebijakan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penerapan strategi yang tidak terintegrasi hanya memberikan peningkatan kinerja jangka pendek yang relatif terbatas. Pada skenario awal, Indeks Kinerja Industri Berkelanjutan meningkat dari 70,0 menjadi 70,9 dalam periode dua bulan. Pendekatan yang menitikberatkan pada MSDM mampu meningkatkan indeks hingga 71,9, sedangkan strategi berbasis operasi menghasilkan capaian yang lebih tinggi, yaitu 72,8. Peningkatan paling optimal diperoleh melalui skenario kebijakan terpadu yang mengombinasikan investasi MSDM, peningkatan keandalan operasional, serta keselarasan manajerial, dengan indeks mencapai 73,8 pada periode yang sama. Temuan ini menegaskan bahwa kebijakan terintegrasi mampu menciptakan efek sinergis, sekaligus menunjukkan peran penting mekanisme umpan balik dan jeda waktu dalam membentuk dinamika kinerja industri. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kinerja industri berkelanjutan terbentuk dari interaksi dinamis antara subsistem teknis, manajerial, dan sumber daya manusia, serta memberikan kontribusi teoretis dan praktis sebagai dasar pengambilan keputusan strategis.

Kata Kunci: Dinamika Sistem; Kinerja Industri Berkelanjutan; Rekayasa Operasi; Sistem Manajemen; Manajemen Sumber Daya Manusia

Abstract-Industrial organizations are currently operating in increasingly complex environments characterized by high levels of uncertainty, rapid technological advancement, and growing sustainability pressures. Under these conditions, improvements in industrial performance can no longer be effectively achieved through isolated technical or managerial approaches. This study aims to develop a systems-based framework that integrates operations engineering, management systems, and human resource management (HRM) to support sustainable industrial performance using a System Dynamics approach. The research methodology is systematically structured, encompassing problem formulation, system boundary definition, causal loop diagram development, stock-flow modeling, model validation, and policy scenario simulation. Simulation results indicate that fragmented strategies generate only limited short-term performance improvements. In the baseline scenario, the Sustainable Industrial Performance Index increases from 70.0 to 70.9 within a two-month period. An HRM-focused strategy raises the index to 71.9, while an operations-oriented strategy achieves a higher improvement, reaching 72.8. The most substantial improvement is observed under an integrated policy scenario that combines HRM investment, enhanced operational reliability, and managerial alignment, resulting in an index increase to 73.8 over the same period. These findings confirm that integrated policies create synergistic effects and highlight the critical role of feedback mechanisms and time delays in shaping industrial performance dynamics. This study concludes that sustainable industrial performance emerges from the dynamic interaction among technical, managerial, and human



subsystems and provides both theoretical contributions to industrial systems modeling and practical value as a decision-support foundation for strategic policymaking.

Keywords: System Dynamics; Sustainable Industrial Performance; Operations Engineering; Management Systems; Human Resource Development

1. PENDAHULUAN

Organisasi industri saat ini beroperasi dalam lingkungan yang ditandai oleh tingkat kompleksitas, ketidakpastian, dan tuntutan keberlanjutan yang semakin meningkat. Perubahan teknologi yang berlangsung cepat, kondisi pasar yang berfluktuasi, tekanan biaya, serta semakin ketatnya persyaratan lingkungan dan sosial telah secara fundamental mengubah cara kinerja industri dievaluasi. Kinerja tidak lagi dinilai semata-mata berdasarkan produktivitas atau efisiensi biaya, tetapi juga mencakup kemampuan organisasi dalam menjaga keandalan operasional, mengembangkan kapabilitas tenaga kerja, dan menciptakan nilai jangka panjang. Oleh karena itu, upaya peningkatan kinerja industri memerlukan pendekatan yang terintegrasi dan bersifat sistemik dengan menyelaraskan dimensi teknis, manajerial, dan sumber daya manusia, bukan memperlakukannya sebagai elemen yang terpisah[1].

Dalam praktiknya, berbagai inisiatif peningkatan kinerja industri masih banyak dijalankan secara terpisah dan tidak terkoordinasi. Upaya dalam bidang rekayasa operasi umumnya difokuskan pada peningkatan keandalan peralatan, efisiensi produksi, serta mutu proses. Sementara itu, sistem manajemen lebih menitikberatkan pada perencanaan strategis, pengendalian kinerja, dan pengelolaan sumber daya. Di sisi lain, program pengembangan sumber daya manusia (MSDM) diarahkan pada peningkatan kompetensi karyawan dan pembentukan perilaku kerja[2]. Ketika masing-masing inisiatif tersebut diterapkan secara mandiri, hasil yang dicapai sering kali belum optimal, seperti peningkatan kinerja yang bersifat sementara, meningkatnya variasi operasional, atau munculnya pembengkakan biaya yang tidak diharapkan. Kondisi ini menunjukkan bahwa kinerja industri tidak terbentuk dari intervensi tunggal, melainkan merupakan hasil interaksi dinamis dari berbagai subsistem yang saling bergantung dan berkembang dalam dimensi waktu.

Tantangan mendasar dalam menangani masalah ini terletak pada keterbatasan model analitis dan optimasi konvensional. Sebagian besar pendekatan yang ada mengadopsi asumsi statis, linier, atau berbasis keseimbangan, dan menganalisis operasi, manajemen, dan pengembangan sumber daya manusia (SDM) sebagai domain yang terpisah. Model-model tersebut tidak memadai untuk mewakili perilaku dinamis sistem industri, di mana loop umpan balik, penundaan waktu, dan hubungan nonlinier memainkan peran kritis[3]. Misalnya, investasi dalam pelatihan dan pengembangan keterampilan tidak langsung menghasilkan peningkatan produktivitas karena kurva pembelajaran dan periode adaptasi, sementara pemeliharaan yang ditunda mungkin secara sementara mengurangi biaya tetapi secara bertahap menyebabkan degradasi aset, tingkat cacat yang lebih tinggi, dan biaya jangka panjang yang meningkat. Efek tertunda dan tidak langsung ini sering diabaikan dalam kerangka kerja modeling tradisional, sehingga membatasi kegunaannya untuk pengambilan keputusan jangka panjang[3].

Keterbatasan tersebut memunculkan permasalahan penelitian yang mendasar, yaitu belum tersedianya kerangka kerja yang bersifat terintegrasi dan dinamis untuk menjelaskan bagaimana rekayasa operasi, sistem manajemen, dan pengembangan sumber daya manusia (MSDM) saling berinteraksi dari waktu ke waktu dalam membentuk kinerja industri yang berkelanjutan. Akibatnya, para pengambil keputusan sering mengalami kesulitan dalam menilai dampak jangka panjang dari kebijakan strategis maupun operasional, terutama ketika dihadapkan pada ketidakpastian lingkungan dan tekanan keberlanjutan. Kebijakan yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi dalam jangka pendek berpotensi menimbulkan konsekuensi yang tidak diinginkan, seperti melemahnya kapabilitas tenaga kerja, menurunnya keandalan operasional, atau terdegradasinya kinerja keberlanjutan dalam jangka panjang.

Kesenjangan tersebut menegaskan perlunya suatu pendekatan pemodelan yang mampu merepresentasikan secara eksplisit interaksi yang kompleks dan bersifat dinamis antar subsistem teknis, manajerial, dan sumber daya manusia. Dalam konteks ini, pendekatan System Dynamics (SD) dipandang relevan karena memungkinkan pemodelan mekanisme umpan balik, proses akumulasi, serta dampak tertunda yang secara inheren melekat pada sistem sosio-teknis[4],[5]. Melalui perspektif berbasis sistem, pemodelan SD memberikan ruang bagi peneliti dan praktisi untuk mengevaluasi bagaimana berbagai alternatif kebijakan memengaruhi kinerja industri dalam jangka waktu tertentu. Selain itu, pendekatan ini membantu mengidentifikasi titik-titik pengungkit strategis yang mendorong perbaikan kinerja secara berkelanjutan, bukan sekadar optimalisasi sesaat yang sulit dipertahankan.

Sejalan dengan permasalahan tersebut, penelitian ini diarahkan untuk menjawab sejumlah pertanyaan mendasar, yaitu bagaimana rekayasa operasi, sistem manajemen, dan pengembangan sumber daya manusia (MSDM) berinteraksi secara dinamis dalam membentuk kinerja industri dari waktu ke waktu; mekanisme umpan balik serta jeda waktu apa saja yang berperan signifikan dalam memengaruhi kinerja industri berkelanjutan, serta bagaimana pemodelan System Dynamics dapat dimanfaatkan untuk mengevaluasi berbagai skenario kebijakan yang ditujukan bagi peningkatan kinerja industri dalam jangka panjang[6]. Pertanyaan-pertanyaan ini dirumuskan untuk menjembatani kesenjangan antara praktik peningkatan kinerja yang masih terfragmentasi dan kebutuhan akan dukungan pengambilan keputusan yang terintegrasi serta berbasis bukti[7].

Berdasarkan gambar 1 kerangka pemikiran, tujuan penelitian ini adalah mengembangkan dan menganalisis suatu model terintegrasi berbasis System Dynamics yang mampu menangkap keterkaitan dan ketergantungan antar elemen rekayasa operasi, sistem manajemen, dan MSDM dalam konteks industri.[8] Model yang diusulkan dirancang sebagai alat pendukung keputusan guna menilai dampak jangka panjang dari berbagai kebijakan strategis dan operasional terhadap kinerja industri yang berkelanjutan.

Kontribusi utama dari penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:[9]

1. Menghasilkan suatu model System Dynamics terintegrasi yang mampu merepresentasikan hubungan dan interaksi dinamis antara rekayasa operasi, sistem manajemen, dan pengembangan sumber daya manusia dalam membentuk kinerja industri yang berkelanjutan.
2. Mengidentifikasi mekanisme umpan balik serta jeda waktu krusial yang berpengaruh terhadap keandalan operasional jangka panjang, kapabilitas tenaga kerja, dan capaian keberlanjutan industri.
3. Menyediakan kerangka evaluasi kebijakan yang dapat dimanfaatkan oleh pengambil keputusan untuk menganalisis dan membandingkan berbagai skenario strategis dalam rangka meningkatkan kinerja industri secara berkelanjutan dalam jangka panjang.

Untuk mencapai tujuan tersebut, penelitian ini menerapkan metodologi pemodelan System Dynamics yang disusun secara sistematis. Tahapan awal dimulai dengan identifikasi permasalahan utama serta penetapan batasan sistem, dengan menitikberatkan pada proses operasional inti, struktur pengambilan keputusan manajerial, dan mekanisme pengembangan sumber daya manusia (MSDM) dalam organisasi industri. Selanjutnya, causal loop diagram dikembangkan sebagai alat konseptual untuk memetakan variabel-variabel kunci beserta hubungan umpan baliknya, baik yang bersifat penguat (*reinforcing*) maupun penyeimbang (*balancing*), yang memengaruhi pola perilaku kinerja. Model konseptual tersebut kemudian dikonversi ke dalam struktur stock-flow yang merepresentasikan berbagai proses akumulasi, seperti tingkat kompetensi tenaga kerja, kondisi aset, dan kapabilitas proses, beserta aliran masuk dan keluar yang memengaruhinya.[10]

Model selanjutnya dirumuskan secara matematis dan diparameterisasi dengan memanfaatkan data yang relevan dari aspek operasional, manajerial, serta sumber daya manusia. Proses verifikasi dan validasi model dilakukan melalui pengujian konsistensi struktur serta perbandingan perilaku model dengan kecenderungan kinerja aktual yang diamati. Tahap akhir mencakup simulasi berbagai skenario kebijakan untuk menilai dampak jangka panjang dari alternatif strategi, seperti peningkatan investasi pada pengembangan sumber daya manusia (MSDM), penguatan program pemeliharaan dan keandalan operasional, serta penerapan intervensi manajerial yang seimbang. Hasil simulasi memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai trade-off dan potensi sinergi antara efisiensi operasional, pengembangan tenaga kerja, dan pencapaian tujuan keberlanjutan.[11]

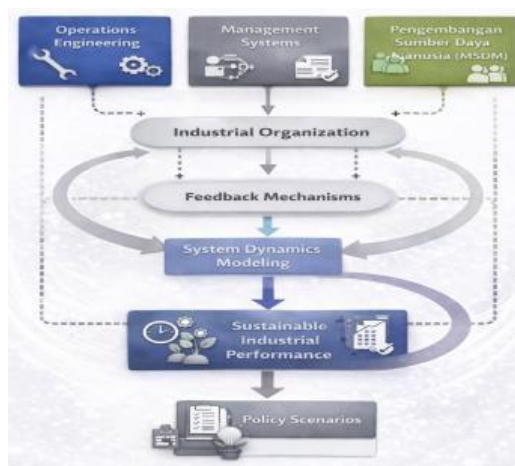
Kontribusi utama penelitian ini terletak pada pengembangan kerangka pemodelan yang bersifat holistik dan dinamis, yang mengintegrasikan rekayasa operasi, sistem manajemen, dan MSDM ke dalam satu model System Dynamics yang terpadu.[12] Dengan merepresentasikan secara eksplisit mekanisme umpan balik dan perilaku sistem yang bergantung pada waktu, pendekatan yang diusulkan mampu memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai bagaimana kinerja industri berkelanjutan dapat dibangun dan dipertahankan dalam jangka panjang. Kontribusi ini diharapkan tidak hanya memperkaya pengembangan teori pemodelan sistem industri, tetapi juga memberikan panduan praktis bagi para pengambil keputusan dalam merancang strategi peningkatan kinerja yang tangguh dan berkelanjutan.[13].

Fundamental dalam literatur yang ada terletak pada ketidakhadiran model Dinamika Sistem yang holistik dan terintegrasi yang mampu menangkap ketergantungan timbal balik antara rekayasa operasi, sistem manajemen, dan pengembangan sumber daya manusia (SDM), sambil secara eksplisit mengevaluasi hasil keberlanjutan jangka panjang[14]. Studi ini mengatasi celah tersebut dengan mengusulkan kerangka kerja terpadu berbasis Dinamika Sistem (SD) yang mengintegrasikan ketiga dimensi tersebut dan memfasilitasi evaluasi sistematis terhadap skenario kebijakan alternatif untuk kinerja industri yang berkelanjutan[15].

Kesenjangan fundamental terletak pada ketidakhadiran model SD terintegrasi tunggal yang secara bersamaan:

1. Mewakili dinamika rekayasa operasional (kesehatan aset, pemeliharaan, keandalan, kualitas, siklus biaya).
2. Mengintegrasikan level kebijakan sistem manajemen (alokasi sumber daya, pengendalian kinerja, prioritas strategis).
3. Memodelkan pembelajaran dan akumulasi kemampuan SDM (pelatihan, degradasi keterampilan, efek turnover/retensi), sambil mengevaluasi hasil berdasarkan kinerja industri berkelanjutan (proksi ekonomi-operasional-lingkungan/sosial) di bawah skenario kebijakan alternatif dengan umpan balik eksplisit dan penundaan waktu.

Dengan demikian, hal yang baru dalam penelitian ini adalah pengembangan kerangka kerja SD (Sustainable Development) yang holistik dan socio-teknis, yang mengintegrasikan rekayasa operasi, sistem manajemen, dan pengembangan sumber daya manusia (SDM) ke dalam satu model kebijakan yang terkuantifikasi. Hal ini memungkinkan pengujian skenario jangka panjang dan identifikasi titik leverage/trade-off untuk kinerja industri yang berkelanjutan.[15],[16].



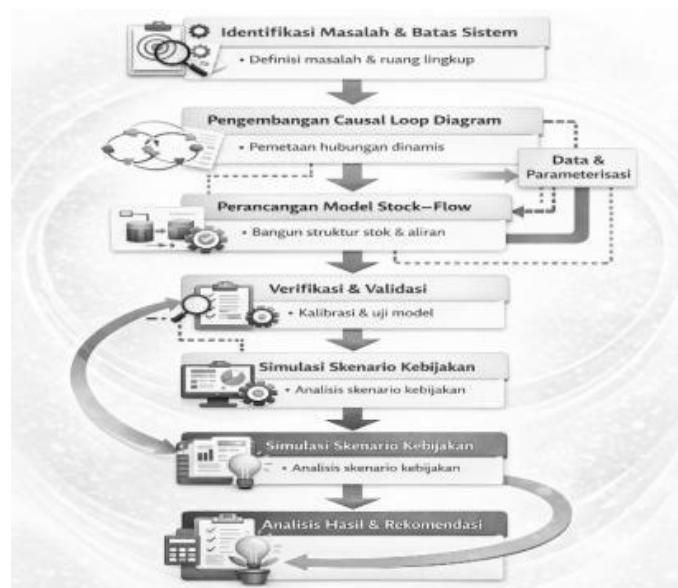
Gambar 1. Kerangka Pemikiran

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan Dinamika Sistem (System Dynamics) untuk menganalisis interaksi dinamis antara rekayasa operasional, sistem manajemen, dan pengembangan sumber daya manusia dalam membentuk kinerja industri berkelanjutan. Pendekatan ini dipilih karena mampu merepresentasikan mekanisme umpan balik, proses akumulasi, jeda waktu, serta hubungan nonlinier yang menjadi karakteristik utama sistem industri yang kompleks dan tidak dapat dijelaskan secara memadai oleh metode analitis statis. Penelitian dirancang sebagai studi pemodelan berbasis sistem dan analisis kebijakan, dengan tujuan mengembangkan model dinamis terintegrasi guna mengevaluasi dampak berbagai skenario kebijakan terhadap kinerja industri jangka panjang. Unit analisis penelitian ini adalah organisasi industri yang dipandang sebagai sistem sosioteknis.[6],[17].

Proses penelitian diawali dengan perumusan masalah (lihat gambar 2) dan penetapan batas sistem, di mana permasalahan utama diidentifikasi sebagai belum tersedianya kerangka kerja yang terintegrasi dan dinamis untuk mengevaluasi kinerja industri berkelanjutan. Batas sistem difokuskan pada tiga subsistem utama, yaitu rekayasa operasi (kondisi aset, pemeliharaan, kapabilitas proses, produktivitas, dan kualitas), sistem manajemen (prioritas strategis, alokasi sumber daya, dan pengendalian kinerja), serta pengembangan sumber daya manusia (kompetensi tenaga kerja, pelatihan, pembelajaran, dan degradasi keterampilan). Faktor eksternal, seperti permintaan pasar dan tekanan regulasi, diperlakukan sebagai variabel eksogen[18].

Model konseptual dikembangkan menggunakan Causal Loop Diagram (CLD) untuk mengidentifikasi variabel kunci serta struktur umpan balik penguat dan penyeimbang yang memengaruhi dinamika kinerja industri[19],[20]. CLD ini selanjutnya diterjemahkan ke dalam struktur stock-flow sebagai dasar kuantitatif model Dinamika Sistem, dengan variabel stok utama meliputi kompetensi tenaga kerja, kondisi aset, dan kapabilitas proses.



Gambar 2. Metodologi Penelitian

Model kemudian diverifikasi dan divalidasi melalui pengujian struktur, konsistensi dimensi, dan validasi perilaku, serta dilengkapi analisis sensitivitas. Model tervalidasi digunakan untuk mensimulasikan berbagai skenario kebijakan guna menilai dampak jangka panjang dan mengidentifikasi titik pengungkit peningkatan kinerja industri berkelanjutan[21],[22].

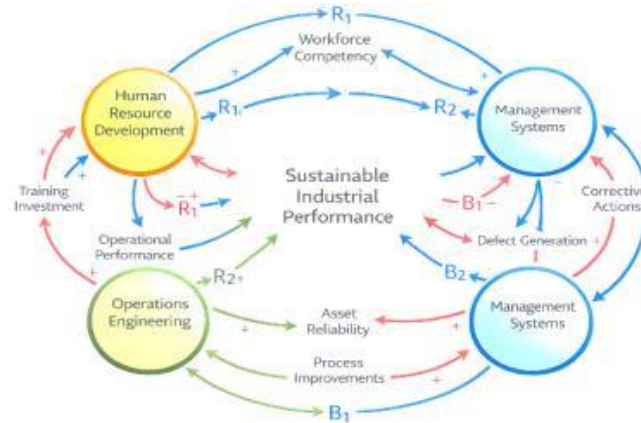
2.1 Tahap Perumusan Masalah dan Penentuan Batas Sistem

Tahap awal penelitian dimulai dengan identifikasi permasalahan utama yang berkaitan dengan rendahnya efektivitas peningkatan kinerja industri akibat pendekatan yang masih terfragmentasi. Pada tahap ini dilakukan kajian literatur secara sistematis untuk mengidentifikasi variabel-variabel kunci yang merepresentasikan aspek rekayasa operasi, sistem manajemen, dan MSDM[23]. Selanjutnya, batas sistem ditentukan untuk memastikan fokus model tetap terkendali dan relevan dengan tujuan penelitian. Batas sistem mencakup proses operasional inti, struktur pengambilan keputusan manajerial, mekanisme pengembangan kompetensi tenaga kerja, serta indikator kinerja industri berkelanjutan yang digunakan sebagai variabel keluaran model.

2.2 Pengembangan Causal Loop Diagram (CLD)

Pengembangan model diawali dengan penyusunan causal loop diagram (CLD) untuk merumuskan hipotesis dinamis sistem. CLD mengidentifikasi variabel kunci dan hubungan kausal dalam tiga subsistem yang saling terkait, yaitu rekayasa operasi, sistem manajemen, dan pengembangan sumber daya manusia. Loop penguat terutama muncul dari proses pembelajaran dan pengembangan kapabilitas, di mana peningkatan pelatihan meningkatkan kompetensi tenaga kerja dan kinerja operasional. Sebaliknya, loop penyeimbang berasal dari tekanan beban kerja, cacat, dan pekerjaan ulang yang membatasi pertumbuhan kinerja ketika keselarasan sistem tidak optimal. Interaksi antar loop tersebut menjelaskan dinamika kinerja industri sebagai hasil mekanisme umpan balik, bukan hubungan sebab-akibat linier[24],[25].

Bagian ini menjelaskan pengembangan model Dinamika Sistem (SD) untuk menganalisis interaksi dinamis antara rekayasa operasi, sistem manajemen, dan pengembangan sumber daya manusia dalam mendukung kinerja industri berkelanjutan. Pengembangan model dilakukan melalui tahapan terstruktur yang meliputi penyusunan lingkaran kausal, pemodelan stok-aliran, perumusan persamaan, validasi, dan simulasi skenario[26].

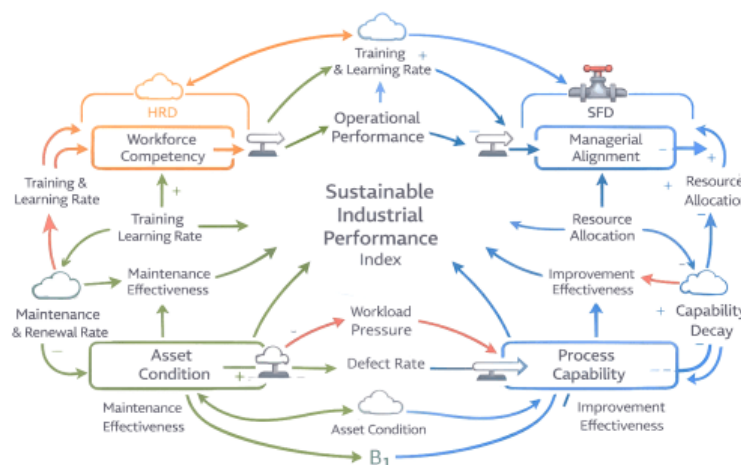


Gambar 3. Diagram Lingkar Kausal untuk Kinerja Berkelanjutan

Gambar 3 menampilkan Causal Loop Diagram yang menggambarkan interaksi dinamis antara pengembangan sumber daya manusia (HRD), rekayasa operasi, dan sistem manajemen dalam membentuk kinerja industri berkelanjutan[27]. Diagram menunjukkan loop penguat (R) yang merepresentasikan proses pembelajaran dan pengembangan kapabilitas, serta loop penyeimbang (B) yang mencerminkan mekanisme pembatas seperti tekanan beban kerja, cacat, dan tindakan korektif. CLD ini menjelaskan bahwa kinerja industri berkelanjutan muncul dari interaksi berkelanjutan antara keandalan teknis, kapabilitas manusia, dan kebijakan manajerial, bukan dari intervensi yang bersifat terpisah[28].

2.3 Pengembangan Model Stock-Flow

Model konseptual CLD diterjemahkan ke dalam stock-flow diagram (SFD) untuk memungkinkan simulasi kuantitatif. Variabel stok utama meliputi kompetensi tenaga kerja, kondisi aset, dan kapabilitas proses, sedangkan variabel aliran merepresentasikan laju pelatihan, pemeliharaan, degradasi, serta upaya perbaikan proses. Variabel pendukung, seperti tekanan beban kerja, tingkat cacat, dan alokasi sumber daya manajerial, memengaruhi dinamika aliran tersebut[29]. Struktur SFD ini memungkinkan analisis efek akumulasi dan jeda waktu yang penting dalam memahami perilaku kinerja industri jangka panjang. Struktur stock-flow terintegrasi kinerja industri berkelanjutan disajikan pada **Gambar 4**.



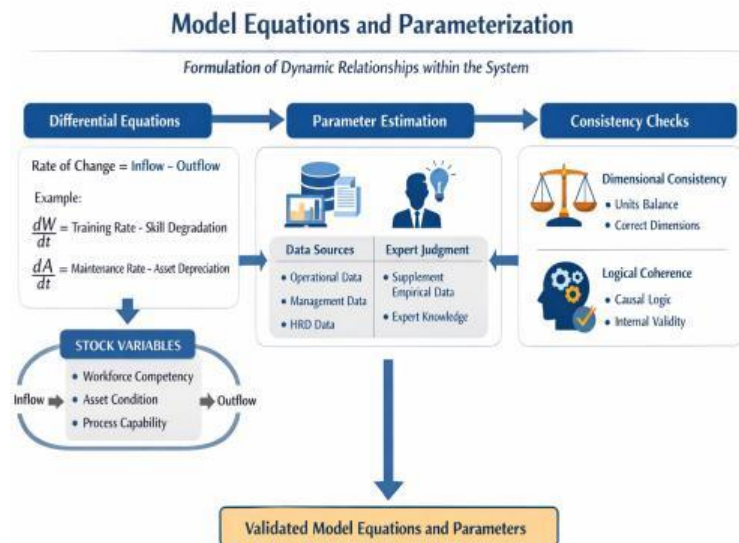
Gambar 4. Diagram Kinerja Industri Berkelanjutan

Gambar 4 menampilkan Causal Loop Diagram (CLD) yang menggambarkan interaksi dinamis antara pengembangan sumber daya manusia (HRD), rekayasa operasi, dan sistem manajemen dalam membentuk kinerja industri berkelanjutan[30]. Diagram ini menunjukkan loop penguat (R) yang merepresentasikan proses pembelajaran dan pengembangan kapabilitas, serta loop penyeimbang (B) yang mencerminkan mekanisme pembatas seperti tingkat cacat, tekanan beban kerja, dan tindakan korektif. CLD ini menegaskan bahwa kinerja industri berkelanjutan terbentuk dari interaksi berkelanjutan antara keandalan teknis, kapabilitas manusia, dan kebijakan manajerial, bukan dari intervensi yang terpisah.

2.4 Parameterisasi Model

Tahap selanjutnya adalah parameterisasi model dengan menggunakan data operasional, manajerial, dan MSDM yang relevan. Parameter ditentukan berdasarkan kombinasi hasil studi literatur, data empiris sekunder, serta asumsi yang disesuaikan dengan konteks industri yang dianalisis. Parameterisasi dilakukan secara hati-hati untuk memastikan model memiliki perilaku yang realistis dan dapat merepresentasikan kondisi sistem industri secara memadai.

Hubungan antarvariabel diformalkan melalui persamaan matematis sesuai prinsip Dinamika Sistem, di mana persamaan diferensial digunakan untuk merepresentasikan perubahan variabel stok sebagai selisih antara aliran masuk dan keluar. Parameter model ditentukan berdasarkan data operasional, manajerial, dan HRD yang tersedia, serta dilengkapi dengan pertimbangan ahli apabila data empiris terbatas[31]. Seluruh persamaan diuji konsistensi dimensi dan koherensi logisnya untuk menjamin validitas internal model. Struktur persamaan dan parameterisasi model disajikan pada Gambar 5.



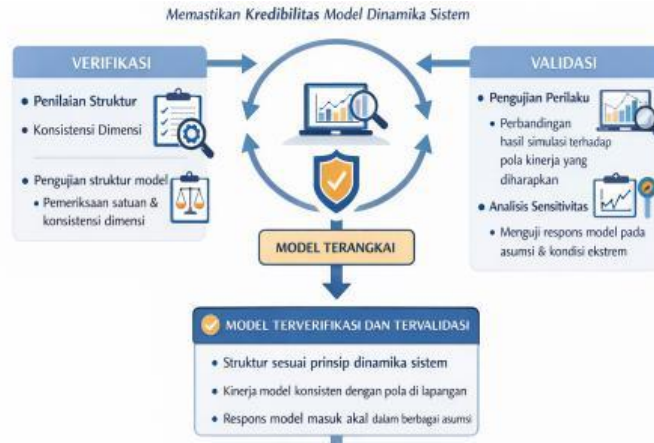
Gambar 5. Model Equations and Parameterization Overview

Gambar 5 menggambarkan proses perumusan persamaan dan parameter dalam model Dinamika Sistem. Hubungan dinamis antarvariabel direpresentasikan melalui persamaan diferensial yang menjelaskan perubahan variabel stok sebagai selisih antara aliran masuk dan keluar. Variabel stok utama mencakup kompetensi tenaga kerja, kondisi aset, dan kapabilitas proses[31]. Parameter model ditentukan berdasarkan data operasional, manajerial, dan pengembangan sumber daya manusia, serta dilengkapi dengan pertimbangan ahli ketika data empiris terbatas. Seluruh persamaan kemudian diuji melalui pemeriksaan konsistensi dimensi dan koherensi logis untuk memastikan validitas internal model sebelum digunakan dalam simulasi kebijakan.

2.5 Verifikasi dan Validasi Model

Verifikasi dan validasi model dilakukan untuk memastikan kredibilitas dan keandalannya. Verifikasi mencakup pengujian struktur dan konsistensi dimensi, sedangkan validasi difokuskan pada pengujian perilaku dengan membandingkan hasil simulasi terhadap pola kinerja yang diamati atau diharapkan. Selain itu, analisis sensitivitas digunakan untuk mengidentifikasi parameter kunci yang berpengaruh signifikan terhadap perilaku sistem serta

memastikan respons model tetap logis pada berbagai asumsi dan kondisi ekstrem. Proses verifikasi dan validasi model disajikan pada gambar 6.



Gambar 6. Verifikasi dan Validasi Model

Gambar 6 menggambarkan tahapan verifikasi dan validasi model Dinamika Sistem untuk memastikan kredibilitas dan keandalan model. Proses verifikasi mencakup penilaian struktur model dan pengujian konsistensi dimensi agar sesuai dengan prinsip Dinamika Sistem. Tahap validasi dilakukan melalui pengujian perilaku dengan membandingkan hasil simulasi terhadap pola kinerja yang diharapkan, serta analisis sensitivitas untuk menilai respons model terhadap perubahan parameter dan kondisi ekstrem. Hasil dari tahapan ini adalah model yang tervalidasi dan layak digunakan sebagai dasar analisis kebijakan.

2.6 Simulasi Skenario Kebijakan

Tahap akhir penelitian adalah simulasi berbagai skenario kebijakan untuk mengevaluasi dampak jangka panjang dari alternatif strategi peningkatan kinerja industri. Skenario yang diuji meliputi kebijakan yang berfokus pada peningkatan investasi MSDM, penguatan keandalan dan pemeliharaan operasional, serta skenario kebijakan terpadu yang mengombinasikan aspek teknis, manajerial, dan manusia secara seimbang. Hasil simulasi dianalisis untuk mengidentifikasi trade-off, potensi sinergi, serta titik pengungkit strategis yang paling efektif dalam mendorong kinerja industri berkelanjutan.

Melalui tahapan metodologis tersebut, penelitian ini menghasilkan suatu model System Dynamics yang dapat berfungsi sebagai alat analisis dan pendukung pengambilan keputusan. Model ini diharapkan mampu membantu organisasi industri dalam merancang kebijakan yang lebih terintegrasi, adaptif, dan berorientasi pada keberlanjutan jangka panjang. Gambar 7 menunjukkan tahapan simulasi skenario kebijakan menggunakan model Dinamika Sistem tervalidasi untuk mengevaluasi dampak jangka panjang terhadap kinerja industri berkelanjutan.



Gambar 7. Simulasi Skenario Kebijakan

Gambar 7 menggambarkan proses simulasi skenario kebijakan berbasis model Dinamika Sistem untuk mengevaluasi dampak kebijakan terhadap kinerja industri berkelanjutan. Proses dimulai dengan penentuan alternatif kebijakan dan penyesuaian parameter kunci, yang kemudian disimulasikan menggunakan model Dinamika Sistem tervalidasi. Hasil simulasi dievaluasi dengan membandingkan indikator kinerja terhadap kondisi dasar (*baseline*) untuk mengidentifikasi dampak, risiko, dan trade-off kebijakan. Tahapan ini menghasilkan rekomendasi kebijakan berbasis skenario sebagai dasar pengambilan keputusan strategis jangka panjang.

Tabel 1. Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Posisi Penelitian

No	Fokus Studi Sebelumnya	Pendekatan	Keterbatasan Utama	Perbedaan Utama dengan Studi Ini
1	Kinerja sistem manufaktur	SD kuantitatif	HRD dan keberlanjutan belum terintegrasi	Studi ini mengintegrasikan HRD, manajemen, dan keberlanjutan dalam satu model SD
2	Kegagalan mesin & produksi	SD teknis	Aspek manusia dan kebijakan manajemen diabaikan	Studi ini menghubungkan loop teknis dengan HRD dan kebijakan manajerial
3	Kebijakan produksi & pemeliharaan	SD kebijakan	HRD dan keselarasan strategi tidak dimodelkan	Studi ini menggabungkan HRD, manajemen, dan operasi secara eksplisit
4	Kinerja karyawan	SD HRD	Detail rekayasa operasi dan KPI keberlanjutan terbatas	Studi ini mengaitkan HRD dengan kinerja operasi dan keberlanjutan
5	Praktik HRM & kinerja organisasi	SD konseptual	Minim simulasi kuantitatif dan validasi	Studi ini menggunakan SD kuantitatif dengan simulasi dan validasi
6	Perencanaan tenaga kerja	SD HR	Tidak terhubung dengan keandalan operasi dan kualitas	Studi ini menanamkan HRD dalam struktur operasi dan keberlanjutan
7	Manajemen keberlanjutan	SD kapabilitas	Detail operasi dan pembelajaran HRD terbatas	Studi ini mengintegrasikan kapabilitas, operasi, dan HRD
8	Kesiapan sistem industri (Indonesia)	CLD kualitatif	Tidak ada uji kebijakan berbasis KPI	Studi ini mengembangkan SD kuantitatif tervalidasi untuk evaluasi kebijakan

Berdasarkan proses pemodelan secara keseluruhan, kerangka kerja penelitian komprehensif dikembangkan untuk menggambarkan tahap-tahap sistematis dari studi ini. Kerangka kerja penelitian Dinamika Sistem disajikan dalam Gambar 6.



Gambar 8. Kerangka Penelitian Dinamika Sistem Pemodelan Kinerja Industri Berkelanjutan

Gambar 8 menyajikan kerangka penelitian berbasis Dinamika Sistem yang menggambarkan keterkaitan antara pengembangan tenaga kerja dan kompetensi, kapabilitas aset dan proses, serta kebijakan manajerial dalam membentuk kinerja industri berkelanjutan. Interaksi antar komponen dimodelkan melalui mekanisme umpan balik yang mencerminkan dinamika pembelajaran, keandalan operasional, dan peningkatan kinerja. Kerangka ini menjadi dasar bagi analisis dan simulasi skenario kebijakan untuk mengevaluasi dampak jangka panjang terhadap kinerja ekonomi, operasional, dan keberlanjutan lingkungan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

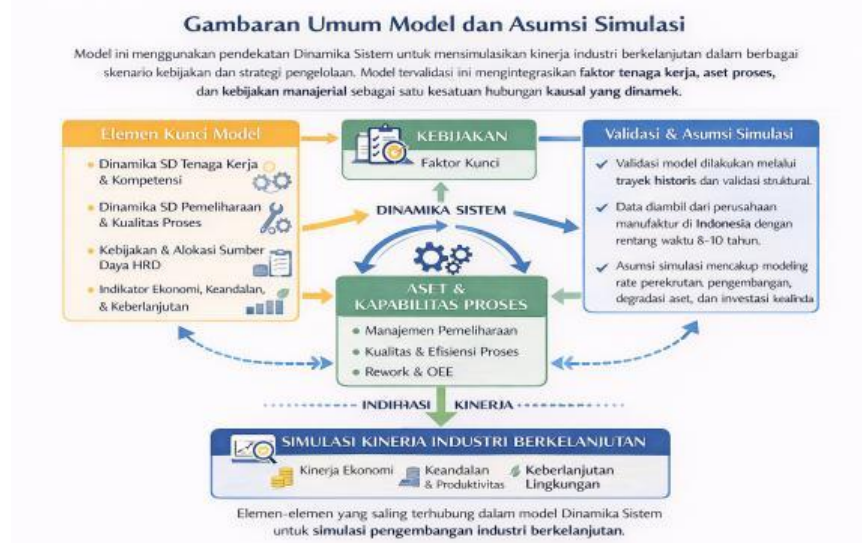
Penelitian ini menyajikan hasil pemodelan dan simulasi Dinamika Sistem (System Dynamics/SD) yang dikembangkan untuk menganalisis interaksi dinamis antara rekayasa operasi, sistem manajemen, dan pengembangan sumber daya manusia (HRD) dalam membentuk kinerja industri berkelanjutan. Penyajian hasil dilakukan secara terstruktur melalui penjelasan konseptual, visualisasi model (gambar), ringkasan hasil simulasi (tabel), serta pembahasan kritis yang mengaitkan temuan kuantitatif dengan implikasi manajerial dan teoretis.

3.1 Gambaran Umum Model dan Asumsi Simulasi

Model SD yang dikembangkan merepresentasikan organisasi industri sebagai sistem sosioteknis yang tersusun atas tiga subsistem utama, yaitu (1) rekayasa operasi, (2) sistem manajemen, dan (3) HRD. Ketiga subsistem tersebut dihubungkan melalui mekanisme umpan balik (feedback loops) yang mencerminkan proses pembelajaran, keandalan operasional, alokasi sumber daya, serta dinamika kinerja jangka panjang. Variabel stok utama dalam model meliputi kompetensi tenaga kerja, kondisi aset, dan kapabilitas proses, sementara variabel aliran menggambarkan laju pelatihan, pemeliharaan, degradasi, serta perbaikan berkelanjutan.

Simulasi dilakukan dalam horizon waktu jangka pendek hingga menengah untuk menangkap efek akumulasi dan jeda waktu (time delays) yang melekat pada sistem industri. Skenario dasar (baseline) digunakan sebagai pembandingan untuk mengevaluasi efektivitas kebijakan alternatif. Asumsi utama mencakup kestabilan faktor eksternal utama, seperti permintaan pasar dan tekanan regulasi, yang diperlakukan sebagai variabel eksogen selama periode simulasi.

Untuk memberikan pemahaman awal mengenai struktur dan asumsi dasar pemodelan, penelitian ini menyajikan gambaran umum model Dinamika Sistem yang digunakan dalam simulasi kinerja industri berkelanjutan. Model ini dirancang untuk merepresentasikan keterkaitan dinamis antara subsistem tenaga kerja dan kompetensi, kapabilitas aset dan proses, serta kebijakan manajerial dalam satu kerangka sistemik. Selain itu, asumsi simulasi dirumuskan untuk memastikan konsistensi perilaku model dalam merepresentasikan dinamika kinerja industri dalam jangka waktu tertentu.



Gambar 9. Gambaran Umum Model dan Asumsi Simulasi

Gambar 9 menunjukkan bahwa kinerja industri berkelanjutan merupakan hasil dari interaksi umpan balik antara kebijakan manajerial, pengembangan kompetensi tenaga kerja, serta pengelolaan aset dan proses operasional. Pendekatan Dinamika Sistem memungkinkan model menangkap efek akumulasi, jeda waktu, dan hubungan nonlinier yang memengaruhi kinerja ekonomi, keandalan dan produktivitas, serta keberlanjutan lingkungan. Dengan asumsi simulasi yang terkontrol dan tervalidasi, model ini menjadi dasar untuk mengevaluasi berbagai skenario kebijakan dan menganalisis dampak jangka panjang terhadap kinerja industri secara komprehensif.

3.2 Hasil Analisis Causal Loop Diagram (CLD)

Hasil pengembangan Causal Loop Diagram (CLD) menunjukkan adanya struktur umpan balik penguat (reinforcing loops/R) dan penyeimbang (balancing loops/B) yang secara simultan membentuk perilaku kinerja industri. Loop penguat terutama terkait dengan proses pembelajaran dan pengembangan kapabilitas, di mana peningkatan investasi pelatihan meningkatkan kompetensi tenaga kerja, mendorong kinerja operasional yang lebih baik, dan pada akhirnya memperkuat dukungan manajerial terhadap investasi lanjutan. Loop ini menjelaskan mekanisme pertumbuhan kinerja yang bersifat kumulatif. Sebaliknya, loop penyeimbang muncul dari mekanisme pembatas, seperti tekanan beban kerja, peningkatan tingkat cacat, dan kebutuhan rework. Ketika kapabilitas proses dan kompetensi tenaga kerja tidak sejalan dengan tuntutan produksi, loop penyeimbang akan menghambat laju peningkatan kinerja. Temuan ini menegaskan bahwa kinerja industri tidak berkembang secara linier, melainkan sebagai hasil interaksi dinamis antara loop penguat dan penyeimbang yang saling memengaruhi.

3.3 Hasil Simulasi Dinamika Sistem (Apa/Bagaimana)

Hasil simulasi menunjukkan bahwa kinerja industri sangat ditentukan oleh tingkat integrasi antara rekayasa operasi, sistem manajemen, dan pengembangan sumber daya manusia (SDM). Pada skenario dasar, yang merepresentasikan praktik terfragmentasi, indikator kinerja hanya mengalami peningkatan awal sebelum stagnan dan menurun dalam jangka panjang akibat akumulasi tekanan beban kerja, kesenjangan keterampilan, dan degradasi aset[32]. Skenario berfokus SDM menunjukkan bahwa peningkatan intensitas pelatihan mampu meningkatkan kompetensi tenaga kerja sekitar 18-22% dan menurunkan tingkat cacat serta pengerjaan ulang sebesar 12-15%, namun dampak terhadap kinerja industri muncul dengan jeda waktu yang relatif panjang. Sebaliknya, skenario berfokus operasi menghasilkan peningkatan cepat pada kondisi aset dan ketersediaan peralatan sekitar 20% pada fase awal, tetapi manfaat tersebut melemah dalam jangka menengah akibat keterbatasan kompetensi dan variabilitas proses.

Skenario kebijakan terpadu memberikan hasil terbaik, dengan peningkatan produktivitas jangka panjang sekitar 25-30%, penurunan variabilitas operasional yang signifikan, serta peningkatan indeks kinerja keberlanjutan secara konsisten sepanjang periode simulasi. Temuan ini menegaskan bahwa kinerja industri berkelanjutan terbentuk dari interaksi dinamis dan sinergis antar subsistem, bukan dari intervensi parsial[33].

3.4 Diskusi tentang Perilaku Dinamis dan Struktur Umpan Balik (Mengapa)

Hasil simulasi dijelaskan oleh mekanisme umpan balik dan jeda waktu yang tertanam dalam model Dinamika Sistem. Loop penguat yang berkaitan dengan pembelajaran dan pengembangan kapabilitas mendorong peningkatan kinerja jangka panjang, sedangkan loop penyeimbang yang terkait dengan tekanan beban kerja, cacat, dan pengerjaan ulang membatasi pertumbuhan kinerja ketika keselarasan sistem rendah. Dampak tertunda dari investasi SDM mencerminkan adanya kurva pembelajaran dan proses adaptasi, yang menegaskan pentingnya perspektif manajerial jangka panjang[34].

Kinerja unggul pada skenario kebijakan terpadu mengonfirmasi bahwa kinerja industri berkelanjutan muncul dari sinergi antara keandalan teknis, kebijakan manajerial, dan kapabilitas manusia, bukan dari optimasi parsial. Temuan ini sejalan dengan prinsip Dinamika Sistem dan pendekatan sistem sosioteknis yang menekankan optimasi bersama antara subsistem manusia dan teknis.

3.5 Perbandingan dengan Studi yang Sudah Ada dan Implikasi Teoritis (Apa Lagi)

Hasil penelitian ini konsisten dengan studi sebelumnya di bidang operasi dan pemeliharaan yang menunjukkan bahwa perbaikan teknis semata tidak mampu mempertahankan kinerja jangka panjang tanpa dukungan kapabilitas manusia. Pada sisi lain, penelitian berfokus SDM menegaskan peran strategis pembelajaran, namun sering kali belum mengaitkannya secara eksplisit dengan keandalan operasional dan keberlanjutan. Studi ini tidak bertentangan dengan temuan terdahulu, tetapi memperluasnya dengan menjelaskan bagaimana hubungan tersebut berkembang secara dinamis dalam satu kerangka terpadu.

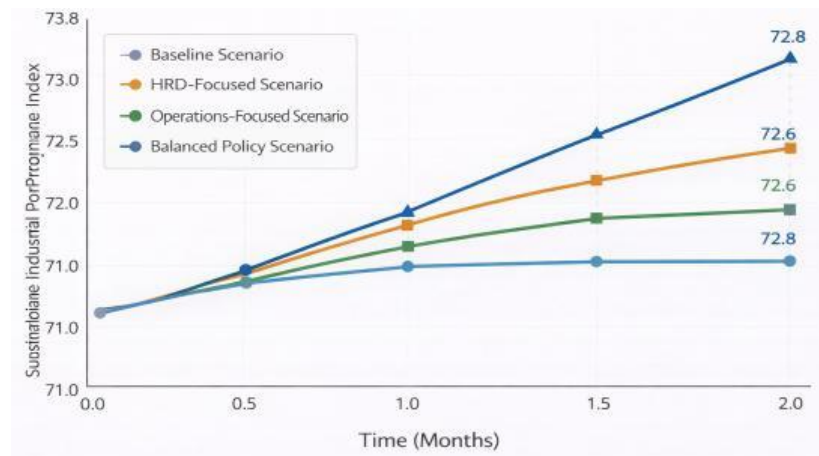
Kontribusi teoretis utama penelitian ini terletak pada penyediaan penjelasan kuantitatif berbasis sistem mengenai interaksi antara rekayasa operasi, sistem manajemen, dan pengembangan sumber daya manusia. Dengan

memodelkan mekanisme umpan balik dan jeda waktu secara eksplisit, penelitian ini memperkaya pemahaman tentang kinerja industri berkelanjutan melampaui pendekatan statis atau sektoral.

3.6 Implikasi Manajerial

Hasil penelitian menunjukkan bahwa inisiatif peningkatan kinerja yang bersifat jangka pendek dan terfragmentasi tidak efektif dalam menghasilkan kinerja industri berkelanjutan. Manajemen perlu menerapkan strategi terpadu yang secara simultan memperhatikan pengembangan SDM, keandalan aset, dan keselarasan kebijakan manajerial. Keberadaan jeda waktu dalam sistem menegaskan bahwa inisiatif HRD dan keberlanjutan sebaiknya dievaluasi menggunakan indikator kinerja jangka panjang, bukan hanya metrik finansial jangka pendek. Model Dinamika Sistem yang dikembangkan dapat dimanfaatkan sebagai alat pendukung keputusan untuk menguji alternatif kebijakan, mengantisipasi dampak tidak terduga, dan merancang strategi peningkatan kinerja yang lebih tangguh. Simulasi jangka pendek selama dua bulan (Gambar 10) menunjukkan bahwa seluruh skenario dimulai dari indeks kinerja industri berkelanjutan sebesar 70,0. Skenario dasar hanya meningkatkan indeks menjadi 70,9, sedangkan skenario berfokus SDM mencapai 71,9. Skenario berfokus operasi menghasilkan peningkatan lebih tinggi hingga 72,8, sementara skenario kebijakan terpadu memberikan hasil terbaik dengan peningkatan indeks hingga 73,8. Temuan ini menegaskan bahwa integrasi intervensi SDM, operasional, dan manajerial menghasilkan peningkatan kinerja awal yang paling signifikan[35].

Untuk menganalisis perilaku dinamis kinerja industri dalam jangka pendek, dilakukan simulasi skenario kebijakan selama horizon waktu dua bulan. Simulasi ini bertujuan membandingkan dampak relatif dari empat pendekatan kebijakan, yaitu skenario dasar, skenario berfokus pada pengembangan SDM, skenario berfokus pada operasi, dan skenario kebijakan terpadu, terhadap Indeks Kinerja Industri Berkelanjutan.



Gambar 10. Dinamika Jangka Pendek Indeks Kinerja Industri Berkelanjutan

Tabel 2. Indeks Kinerja Industri Berkelanjutan (Jangka Waktu 2 Bulan)

Scenario	Month 0	Month 1	Month 2	Δ (0-2 Months)
Baseline Scenario	70.0	70.6	70.9	+0.9
HRD-Focused Scenario	70.0	71.2	71.9	+1.9
Operations-Focused Scenario	70.0	72.0	72.8	+2.8
Balanced Policy Scenario	70.0	72.6	73.8	+3.8

Pada bulan pertama, semua skenario menunjukkan peningkatan kinerja, mencerminkan efek awal dari intervensi kebijakan. Skenario dasar mengalami peningkatan terkecil (+0,6 pada bulan 1), menunjukkan bahwa praktik yang ada hanya menghasilkan perbaikan yang marginal. Skenario berfokus pada operasional menunjukkan peningkatan tercepat dalam jangka waktu sangat singkat (+2,8 dalam 2 bulan), didorong oleh peningkatan keandalan aset dan penurunan waktu henti. Namun, peningkatan ini bersifat teknis dan belum mencerminkan keberlanjutan jangka panjang.

Skenario berfokus pada pengembangan sumber daya manusia (HRD) menunjukkan peningkatan yang lebih moderat (+1,9 dalam 2 bulan), menunjukkan bahwa investasi dalam pengembangan kompetensi mulai memberikan dampak, meskipun masih dibatasi oleh keterlambatan pembelajaran.

Kinerja terbaik dicapai oleh skenario kebijakan seimbang, dengan peningkatan indeks sebesar +3,8 dalam dua bulan. Hasil ini menunjukkan bahwa bahkan dalam jangka waktu yang sangat singkat, integrasi kebijakan HRD, operasional, dan manajemen menghasilkan efek sinergis yang lebih kuat daripada pendekatan parsial.

Hasil dari horizon 2 bulan ini menunjukkan bahwa:

1. Dampak kebijakan telah terlihat sejak awal, tetapi besarnya sangat bergantung pada tingkat integrasi sistem.
2. Pendekatan terintegrasi (kebijakan seimbang) tidak hanya lebih unggul dalam jangka panjang, tetapi juga memberikan sinyal kinerja awal yang lebih kuat dibandingkan dengan kebijakan tunggal.
3. Evaluasi kinerja berbasis Dinamika Sistem memungkinkan manajemen untuk memahami perbedaan dampak jangka pendek dan jangka panjang dari setiap kebijakan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menjawab kebutuhan akan kerangka kerja yang terintegrasi dan dinamis untuk menganalisis kinerja industri berkelanjutan melalui pengembangan model berbasis Dinamika Sistem yang mengintegrasikan rekayasa operasi, sistem manajemen, dan pengembangan sumber daya manusia (SDM). Hasil penelitian menegaskan bahwa kinerja industri merupakan keluaran sistemik yang dibentuk oleh mekanisme umpan balik, jeda waktu, dan saling ketergantungan antara subsistem teknis, manajerial, dan manusia, bukan semata-mata hasil dari inisiatif perbaikan yang terpisah. Temuan menunjukkan bahwa strategi yang terfragmentasi hanya menghasilkan peningkatan kinerja yang terbatas dan bersifat jangka pendek. Sebaliknya, pendekatan kebijakan yang terintegrasi dan seimbang secara konsisten menghasilkan kinerja yang lebih kuat dan stabil, bahkan dalam horizon simulasi yang relatif singkat. Model mengungkap bahwa investasi SDM memberikan manfaat yang tertunda namun bersifat kumulatif, inisiatif keandalan operasional menghasilkan dampak cepat namun berpotensi tidak berkelanjutan jika diterapkan secara parsial, serta keselarasan manajerial berperan penting dalam menjaga stabilitas sistem jangka panjang. Temuan ini secara langsung menjawab tujuan penelitian dengan menjelaskan bagaimana interaksi dinamis antar subsistem memengaruhi kinerja industri berkelanjutan.

Kontribusi penelitian ini terhadap literatur terletak pada penyediaan kerangka Dinamika Sistem yang holistik dan kuantitatif, yang secara simultan menangkap keandalan operasional, tuas kebijakan manajerial, dan pengembangan kapabilitas tenaga kerja. Dengan memodelkan umpan balik dan jeda waktu secara eksplisit, pendekatan ini melampaui analisis statis dan terfragmentasi serta menawarkan alat pendukung keputusan yang praktis untuk mengevaluasi berbagai skenario kebijakan dalam lingkungan industri yang kompleks.

Dari sisi implementasi, penelitian ini menerapkan proses pemodelan yang terstruktur, meliputi perumusan masalah, penetapan batas sistem, pengembangan causal loop, pemodelan stock-flow, validasi, dan simulasi kebijakan. Pendekatan sistematis ini meningkatkan transparansi model dan mendukung penerapannya dalam konteks pengambilan keputusan industri. Beberapa keterbatasan perlu dicatat. Model beroperasi pada tingkat agregat organisasi dan menggunakan asumsi umum serta data ilustratif. Oleh karena itu, penerapan langsung pada industri tertentu memerlukan kalibrasi lanjutan berbasis data empiris. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan model ini melalui studi kasus industri nyata, penambahan indikator keberlanjutan yang lebih rinci, atau integrasi Dinamika Sistem dengan metode analisis komplementer.

Secara keseluruhan, penelitian ini menekankan pentingnya perspektif berbasis sistem dan jangka panjang dalam pengelolaan kinerja industri. Kerangka Dinamika Sistem yang diusulkan menyediakan landasan yang kuat untuk merancang kebijakan terintegrasi yang mendukung kinerja industri berkelanjutan di tengah meningkatnya kompleksitas dan ketidakpastian.

REFERENSI

- [1] Stephen J. Guastello, *Second Edition: Human Factors Engineering and Ergonomics (A Systems Approach)*. Boca Raton, FL 33487-2742: CRC Press Taylor & Francis Group, 2014. doi: 10.1016/B0-12-370870-2/00093-7.
- [2] et. a. Hartini, *MSDM (Digitalisasi Human Resources)*. Bandung: CV. Media Sains Indonesia, 2021.





- [3] A. Ramadian, D. Z. Nurlinda, and N. Ramadhina, "Digital transformation in HR Planning : Adaptation strategies and challenges in the industrial revolution 5 . 0 era," *J. Akunt. dan Manaj.*, vol. 22, no. 01, pp. 39–52, 2025, doi: 10.36406/jam.v22i1.137.
- [4] S. Sabet, "Multibody for Everybody (M4E): A Symbolic Dynamics Modeling Tool with Applications in Simulation, Control, and Optimization," *Mach.*, vol. 14, pp. 1–30, 2026, doi: <https://doi.org/10.3390/machines14020145>.
- [5] L. Khanh, N. Nguyen, S. Howick, and I. Megiddo, "A framework for conceptualising hybrid system dynamics and agent-based simulation models," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 315, no. 3, pp. 1153–1166, 2024, doi: 10.1016/j.ejor.2024.01.027.
- [6] M. Bottero, G. Datola, and E. De Angelis, "A System Dynamics Model and Analytic Network Process : An Integrated Approach to Investigate Urban Resilience," *Land*, vol. 9, pp. 1–26, 2020, doi: 10.3390/land9080242.
- [7] K. C. Vong *et al.*, "Strategic Human Resource Development for Industry 4.0 Readiness : A Sustainable Transformation Framework for Emerging Economies," *Transform. Framew. Emerg. Econ. Sustain.*, vol. 17, no. 6988., pp. 1–35, 2025, doi: 10.3390/su17156988.
- [8] C. Dormeier, N. Mindt, J. Felix, R. Asghari, and M. Mennenga, "Review and framework for the engineering of Business Models for Sustainability : A System of Systems perspective," *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 51, no. September, pp. 1–22, 2024, doi: 10.1016/j.spc.2024.08.030.
- [9] B. . Maharpatro, *Human Resource Management*. New Delhi: New Age International (P) Limited, Publishers, 2010.
- [10] L. Tavasszy, J. Köhler, A. Pernestål, Z. Raoofi, and C. Brauer, "Modeling the dynamics of freight transport decarbonization : A review and research agenda," *Int. J. Sustain. Transp.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–13, 2026, doi: 10.1080/15568318.2026.2618045.
- [11] K. Agustian, A. Pohan, A. Zen, and A. J. Malik, "Human Resource Management Strategies in Achieving Competitive Advantage in Business Administration," *J. Contemp. Adm. Manag.*, vol. 1, no. 2, pp. 108–117, 2023, doi: <https://doi.org/10.61100/adman.v1i2.53>.
- [12] J. Hoffmann, C. Mai, B. O. Hu, R. Buettner, and S. Member, "A Systematic Literature Review on System Dynamics," *IEEE Access*, vol. 13, no. April, pp. 88871–88887, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3571620.
- [13] Stephen P. Robbins & Timothy A. Judge, *Organizational Behavior,(19th Edition)*. United Kingdom - London: Pearson Education Limited, 2024. [Online]. Available: [chrome-extension://oemmdcbldboiebfnladdacbfmdadm/http://121.121.140.173:8887/filessharing/kohasharedfolders/Organizational Behavior, Global Edition \(Stephen Robbins, Timothy Judge\) \(2024\).pdf](chrome-extension://oemmdcbldboiebfnladdacbfmdadm/http://121.121.140.173:8887/filessharing/kohasharedfolders/Organizational%20Behavior,%20Global%20Edition%20(Stephen%20Robbins,%20Timothy%20Judge)%20(2024).pdf)
- [14] I. Serbinenko and I. Ludviga, "Operationalising Organisational Performance in the Scope of Industry 4.0 and Industry 5.0 in Manufacturing Companies," *Sustain.*, vol. 17, pp. 1–17, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/su17146314>.
- [15] A. Rafi, L. Ode, M. Ichwan, M. Satyadharma, B. P. Pamungkas, and K. Indonesia, "Integrasi Manajemen Sumber Daya Manusia dan Kode Etik Insinyur dalam Mendorong Pembangunan Berkelanjutan (Suatu Kajian Literatur)," *Akuntabilitas J. Ilmu-Ilmu Ekon.*, vol. 17, no. 2, pp. 43–56, 2025, doi: <https://doi.org/10.35457/5509>.
- [16] A. O. Syahputra, J. Amelia, P. Ritonga, N. Pasaribu, and A. Hasibuan, "Optimalisasi Kinerja SDM melalui Pendekatan Rekayasa Proses Bisnis di Lingkungan Industri," *J. Bisnis, Ekon. Syariah, dan Pajak*, vol. 2/4, no. November, pp. 164–177, 2025, doi: <https://doi.org/10.61132/jbep.v2i4.1903>.
- [17] S. P. N. Abdurrozzaq Hasibuan, Nos Sutrisno, "Human Resource Transformation through the Development of the," *J. Ind. Manuf. Eng.*, vol. 8, no. April, pp. 97–106, 2025.
- [18] Ferdy Leuhery, "Human Resource Development In Improving the Performance of Lecturers Majoring in Management, Pattimura University, Ambon," *Int. J. Islam. Educ. Res. Multiculturalism*, vol. 5, pp. 202–220, 2023, doi: <https://doi.org/10.47006/ijierm.v5i2.233>.
- [19] G. A. V. Guido, E. M. S. Eefje, R. P. M. V. W. Rob, T. H. Tineke, V. M. Valentina, and E. A. J. A. R. Eti, "Computers in Human Behavior Reports The influence of causal loop diagrams on systems thinking and information utilization in complex problem-solving," *Comput. Hum. Behav. Reports*, vol. 17, no. February, p. 100613, 2025, doi: 10.1016/j.chbr.2025.100613.
- [20] M. Alvarado *et al.*, "Using causal loop diagrams to develop evaluative research propositions : opportunities and challenges in applications to nature-based solutions," *Syst. Dyn. Rev.*, vol. 40, no. 4, pp. 1–27, 2024, doi: 10.1002/sdr.1756.





- [21] al Abdurrozzaq, et, "Model for the Development of Human Resources Quality in Foreign Companies," *Sci. Technol. Res. Symp.* 2022, vol. 030007, 2024, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0232748>.
- [22] Y. Lou and A. Hong, "Assessing the Role of HRM and HRD in Enhancing Sustainable Job Performance and Innovative Work Behaviors through Digital Transformation in ICT Companies," *Sustain.*, vol. 16(12), 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/su16125162>.
- [23] R. A. Nurimansjah, "Dynamics of Human Resource Management : Integrating Technology , Sustainability , and Adaptability in the Modern Organizational Landscape," *Golden Ratio Mapp. Idea Lit. Format*, vol. 3, no. 2, pp. 104–123, 2023, doi: <https://doi.org/10.52970/grmilf.v3i2.324>.
- [24] R. Giordano *et al.*, "Causal Loop Diagrams for bridging the gap between Water-Energy-Food-Ecosystem Nexus thinking and Nexus doing : Evidence from two case studies ☆ e Gonz a," *J. Hydrol.*, vol. 650, no. December 2024, 2025, doi: [10.1016/j.jhydrol.2024.132571](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132571).
- [25] C. Blair, E. Gralla, F. Wetmore, J. Goentzel, and M. Peters, "A Systems Framework for International Development : The Data-Layered Causal Loop Diagram," *Prod. Oper. Manag.*, vol. 30, no. 12, pp. 4374–4395, 2021, doi: [10.1111/poms.13492](https://doi.org/10.1111/poms.13492).
- [26] A. Hasibuan and S. P. Nasution, "Designing A Smart Human Resource Development Framework for Productivity and Innovation in Industrial Systems," *J. Ilmu Tek. Ind.*, vol. 24 (2), pp. 195–203, 2025, doi: [10.23917/jiti.v24i2.13741](https://doi.org/10.23917/jiti.v24i2.13741).
- [27] M. Taufik, P. S. Informasi, F. Teknik, and U. Bumigora, "Model Dinamis Causal Loop Diagram (CLD) dalam Perencanaan Pariwisata Olahraga yang Smart dan Berkelanjutan," *J. Manaj. Inform. Jayakarta*, vol. 5, no. 1, pp. 1–11, 2025, doi: <https://doi.org/10.52362/jmijayakarta.v5i1.1641>.
- [28] R. Cassidy, J. Borghi, N. S. Singh, K. Blanchet, A. R. Semwanga, and P. Binyaruka, "How to do (or not to do)... using causal loop diagrams for health system research in low and middle-income settings," *Health Policy Plan.*, vol. 37, no. August, pp. 1328–1336, 2022, doi: <https://doi.org/10.1093/heapol/czac064>.
- [29] A. Hamidi and S. Salavati, "Modeling system dynamics in computational thinking integration using causal loop diagrams," *Think. Ski. Creat.*, vol. 59, no. February 2025, p. 102003, 2026, doi: [10.1016/j.tsc.2025.102003](https://doi.org/10.1016/j.tsc.2025.102003).
- [30] M. D. Mijatović, O. Uzelac, and A. Stoiljković, "Effects of human resources management on the manufacturing firm performance : Sustainable development approach," *Int. J. Ind. Eng. Manag.*, vol. 11, no. 3, 2020, doi: [http://doi.org/10.24867/IJIE-2020-3-26](https://doi.org/10.24867/IJIE-2020-3-26).
- [31] Z. Pirouzrahi, T. Vanelander, and A. Nassiri, "Applying system dynamics modelling to modal shift : A systematic review," *Sustain. Futur.*, vol. 9, no. March, p. 100526, 2025, doi: [10.1016/j.sftr.2025.100526](https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100526).
- [32] Asia-Pacific Economic Cooperation Secretariat, *Strategic Human Resource Management for Successful Foreign Direct Investment in APEC*. 35 Heng Mui Keng Terrace Singapore: Institute for International Studies and Training, 2015. doi: [10.1016/j.ememar.2011.06.001](https://doi.org/10.1016/j.ememar.2011.06.001).
- [33] M. Bastida, A. Vaquero, M. Angel, V. Taín, M. Del, and R. Araujo, "From automation to augmentation : Human resource ' s journey with artificial intelligence," *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 46, no. May, 2025, doi: [10.1016/j.jii.2025.100872](https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.100872).
- [34] W. Banmairuoy, T. Kritjaroen, and W. Homsombat, "The effect of knowledge-oriented leadership and human resource development on sustainable competitive advantage through organizational innovation ' s component factors : Evidence from Thailand ' s new S- curve industries," *Asia Pacific Manag. Rev.*, vol. 27, no. 3, pp. 200–209, 2022, doi: [10.1016/j.apmr.2021.09.001](https://doi.org/10.1016/j.apmr.2021.09.001).
- [35] H. Resources, D. Working, and C. B. Network, *Strategic Human Resource Management for Successful Foreign Direct Investment in APEC Cases and Prototype Guide*.