

Kerangka Konseptual Integrasi Simulasi Sistem dan Rekayasa Kualitas dalam Peningkatan Kinerja Proses Industri

Ratna Mira Yojana^{a*} 

^a Jurusan Teknik Industri, Universitas Trisakti, Jalan Kyai Tapa No. 1 Grogol
Jakarta Barat, Indonesia, 11440, ratna.mira@trisakti.ac.id

ABSTRACT

Peningkatan kinerja proses industri merupakan tantangan utama dalam sistem industri modern yang ditandai oleh kompleksitas proses, tingginya variabilitas, serta tuntutan efisiensi dan kualitas yang semakin ketat. Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk menjawab tantangan tersebut, di antaranya simulasi sistem dan rekayasa kualitas. Simulasi sistem berperan sebagai alat analisis dinamis untuk memodelkan perilaku sistem dan mengevaluasi berbagai skenario operasional, sementara rekayasa kualitas menyediakan pendekatan metodologis yang terstruktur untuk pengukuran kinerja, pengendalian variabilitas, dan perbaikan proses berkelanjutan. Namun, dalam praktik maupun kajian ilmiah, kedua pendekatan tersebut masih sering diterapkan secara terpisah sehingga potensi sinerginya belum dimanfaatkan secara optimal. Artikel ini bertujuan menyusun sebuah kerangka konseptual integratif yang menggabungkan simulasi sistem dan rekayasa kualitas dalam upaya peningkatan kinerja proses industri. Penelitian ini menggunakan pendekatan penelitian konseptual dengan metode kajian literatur ilmiah dari jurnal bereputasi dalam sepuluh tahun terakhir, yang dianalisis melalui sintesis teoretis. Hasil penelitian berupa pengembangan kerangka konseptual integratif berbasis mekanisme umpan balik iteratif, di mana simulasi sistem dan rekayasa kualitas saling mendukung melalui proses evaluasi kinerja dan perbaikan berulang sebelum implementasi pada sistem nyata. Kontribusi penelitian ini bersifat teoretis dan praktis. Secara akademik, artikel ini memperkaya literatur Teknik Industri dengan model konseptual yang menjembatani dua pendekatan utama peningkatan kinerja proses. Secara praktis, kerangka yang diusulkan dapat menjadi panduan awal bagi praktisi industri dalam merancang strategi perbaikan proses yang lebih sistematis, berbasis analisis, dan berkelanjutan.

Keywords:

simulasi sistem; rekayasa kualitas; kinerja proses; sistem industri; kerangka konseptual.

Pendahuluan

Latar Belakang

Sistem industri modern menunjukkan peningkatan kompleksitas yang cepat akibat diversifikasi produk, integrasi rantai pasok global, serta adopsi teknologi digital dan otomatisasi. Kompleksitas ini menimbulkan interaksi non-linier antar-komponen sistem dan menantang kemampuan perencanaan serta pengendalian operasional [1], [2]. Dalam konteks tersebut, peningkatan kinerja proses—meliputi efisiensi waktu siklus, utilisasi sumber daya, kualitas produk, dan pengurangan variabilitas—menjadi kebutuhan strategis untuk mempertahankan daya saing dan menekan biaya operasional [3], [4].

Berbagai studi menekankan bahwa pendekatan tradisional yang bersifat parsial kurang memadai untuk menghadapi dinamika dan ketidakpastian sistem industri saat ini. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang bersifat sistemik dan berbasis analisis kuantitatif untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih tepat dan adaptif [5], [6]. Dalam praktik dan literatur, simulasi sistem diakui sebagai alat yang *powerfull* untuk memodelkan dinamika proses, menguji skenario “what-if”, dan

mengevaluasi dampak perubahan tanpa mengganggu operasi nyata [1], [7], sedangkan rekayasa kualitas (mis. SPC, Lean Six Sigma, continuous improvement) memberikan kerangka terstruktur untuk mengidentifikasi akar permasalahan, mengukur performa, dan mengendalikan variabilitas proses [8], [9]. Integrasi teknologi Industry 4.0 semakin memperluas kapabilitas analitis dan eksekusional sehingga memungkinkan penggabungan simulasi real-time, data-driven monitoring, dan praktik kualitas digital [2], [10].

Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya mengintegrasikan simulasi sistem dan rekayasa kualitas secara parsial atau berbasis studi kasus tertentu, artikel ini menawarkan kerangka konseptual integratif yang menekankan mekanisme umpan balik iteratif antara evaluasi kinerja, analisis kualitas, dan pengujian skenario simulasi. Kerangka ini memberikan perspektif sistemik yang belum banyak dibahas secara eksplisit dalam literatur.

Permasalahan Penelitian

Walaupun simulasi sistem dan rekayasa kualitas memiliki tujuan yang serupa—yaitu peningkatan kinerja proses—implementasi keduanya di lapangan umumnya masih dilakukan secara terpisah: simulasi lebih dominan pada tahap perancangan/analisis sistem, sedangkan rekayasa kualitas lebih sering diterapkan pada tahap perbaikan dan pengendalian proses yang berjalan [7], [11]. Sejumlah studi kasus dan tinjauan menunjukkan adanya upaya integrasi (mis. hybrid simulation, DES + SPC, atau DES within DMAIC), namun sebagian besar masih bersifat parsial, ad-hoc, atau terbatas pada domain tertentu sehingga belum membentuk landasan konseptual yang sistematis dan umum diterapkan [12]–[14]. Ketiadaan kerangka integratif yang komprehensif menghambat pemanfaatan sinergi antara kapabilitas simulasi (eksperimen skenario, prediksi dinamika) dan prinsip kualitas (pengukuran variabilitas, kontrol statistik, peningkatan berkelanjutan).

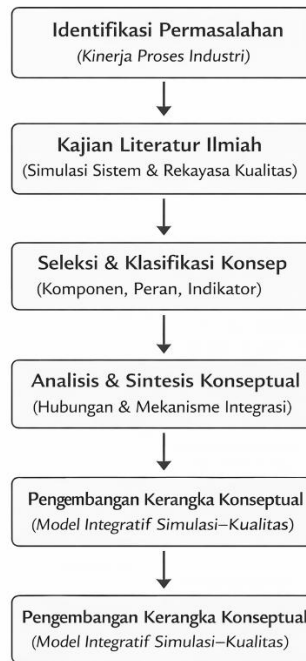
Tujuan dan Kontribusi Artikel

Berdasarkan gap di atas, artikel ini bertujuan menyusun **kerangka konseptual** yang mengintegrasikan simulasi sistem dan rekayasa kualitas untuk meningkatkan kinerja proses industri. Secara khusus, artikel mengidentifikasi komponen inti dari kedua pendekatan, menjelaskan mekanisme integrasi (bagaimana keluaran simulasi dapat mendukung langkah-langkah kualitas dan bagaimana prinsip kualitas dapat memperkaya desain eksperimen simulasi), serta memetakan implikasi akademik dan praktis. Kontribusi teoretis adalah pengayaan literatur Teknik Industri melalui model konseptual integratif; kontribusi praktis adalah panduan konseptual bagi manajer proses dan insinyur kualitas untuk merancang intervensi perbaikan proses yang lebih sistemik, terukur, dan dapat diuji sebelum diimplementasikan.

Metode

Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian konseptual (conceptual research) dengan pendekatan kualitatif-deskriptif. Penelitian konseptual dipilih karena tujuan utama artikel ini bukan untuk menguji hipotesis secara empiris, melainkan untuk mengembangkan dan mensintesis konsep teoretis menjadi sebuah kerangka konseptual integratif yang relevan dengan permasalahan peningkatan kinerja proses industri. Pendekatan ini lazim digunakan dalam pengembangan model teoretis pada bidang Teknik Industri, khususnya untuk topik sistem industri, simulasi, dan rekayasa kualitas.



Gambar 1. Diagram Metode Penelitian

Sumber dan Teknik Pengumpulan Literatur

Sumber data dalam penelitian ini berupa literatur sekunder yang terdiri dari artikel jurnal ilmiah bereputasi internasional yang diterbitkan dalam kurun waktu 10 tahun terakhir (2016–2025). Literatur dikumpulkan dari basis data ilmiah utama seperti Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Taylor & Francis, dan Emerald Insight. Kata kunci yang digunakan dalam penelusuran literatur meliputi system simulation, discrete event simulation, quality engineering, Lean Six Sigma, process performance, dan industrial systems.

Kriteria inklusi literatur meliputi:

- Artikel jurnal (bukan prosiding atau laporan teknis)
- Relevan dengan simulasi sistem, rekayasa kualitas, atau kinerja proses industri,
- Dipublikasikan dalam jurnal bereputasi dan telah melalui proses peer review.
- Literatur yang tidak relevan secara langsung atau bersifat konseptual umum tanpa keterkaitan dengan sistem industri dikecualikan dari analisis.

Teknik Analisis dan Sintesis Konseptual

Analisis dilakukan melalui sintesis teoretis, yaitu dengan mengkaji, membandingkan, dan mengintegrasikan konsep-konsep utama yang ditemukan dalam literatur. Tahapan analisis meliputi:

- Identifikasi konsep inti, yaitu komponen utama simulasi sistem (misalnya pemodelan proses, analisis skenario, dan evaluasi kinerja) serta komponen rekayasa kualitas (misalnya pengukuran variabilitas, pengendalian statistik, dan perbaikan berkelanjutan).
- Analisis hubungan konseptual, yaitu pemetaan keterkaitan antara peran simulasi sistem dan tahapan rekayasa kualitas dalam konteks peningkatan kinerja proses.
- Sintesis integratif, yaitu penyusunan hubungan logis antar konsep menjadi suatu struktur konseptual yang koheren dan sistematis.

Pengembangan Kerangka Konseptual

Kerangka konseptual dikembangkan berdasarkan hasil sintesis literatur dengan menempatkan simulasi sistem sebagai alat analisis dan evaluasi skenario, serta rekayasa kualitas sebagai pendekatan sistematis untuk perbaikan dan pengendalian proses. Integrasi kedua pendekatan ini dirumuskan dalam bentuk alur konseptual yang menjelaskan bagaimana hasil simulasi dapat mendukung pengambilan keputusan dalam rekayasa kualitas, serta bagaimana prinsip-prinsip kualitas dapat memandu perancangan dan evaluasi model simulasi.

Validitas Konseptual

Validitas penelitian dijaga melalui konsistensi teoretis dan dukungan literatur dari jurnal-jurnal kredibel. Kerangka konseptual yang diusulkan dibangun dengan mengacu pada teori dan temuan ilmiah yang telah mapan, sehingga memiliki dasar akademik yang kuat dan dapat dijadikan rujukan untuk penelitian empiris lanjutan.

Results and Discussion

Hasil utama penelitian ini adalah pengembangan kerangka konseptual integratif sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, yang menjelaskan mekanisme hubungan iteratif antara simulasi sistem dan rekayasa kualitas dalam peningkatan kinerja proses industri.

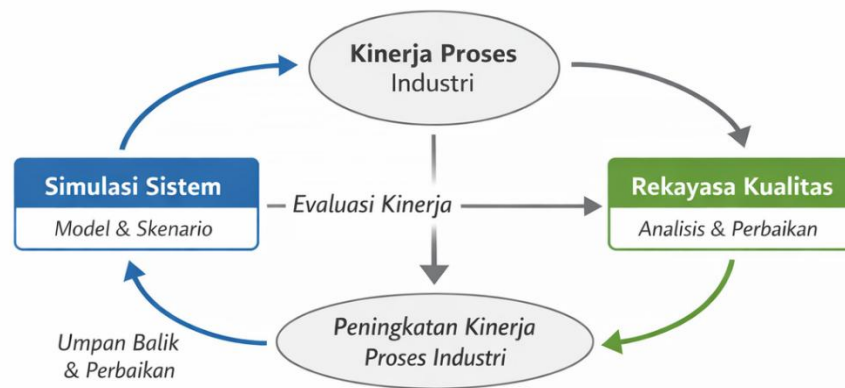
Hasil Sintesis: Komponen dan Peran Utama

Hasil sintesis literatur mengidentifikasi tiga domain konseptual yang saling terkait dalam upaya peningkatan kinerja proses industri: (1) **kapabilitas simulasi sistem** (pemodelan proses, analisis skenario, prediksi dinamika operasi), (2) **praktik rekayasa kualitas** (pengukuran kinerja, analisis variabilitas, pengendalian statistik, dan siklus perbaikan seperti DMAIC), serta (3) **indikator kinerja proses** (efisiensi, kualitas produk/layanan, stabilitas/variabilitas proses). Temuan ini konsisten dengan hasil tinjauan dan studi aplikatif yang menekankan peran simulasi dalam evaluasi desain dan operasi serta peran metodologi kualitas dalam pengendalian variabilitas dan perbaikan berkelanjutan [1]–[4], [9], [11], [13].

Secara teoretis, simulasi menyediakan kemampuan eksperimen *in silico* untuk menilai dampak perubahan struktur dan kebijakan operasi, sedangkan rekayasa kualitas menyediakan kerangka metodologis yang terukur untuk mendefinisikan masalah, mengukur kinerja, dan mengendalikan proses. Kedua domain tersebut memiliki titik temu pada kebutuhan data dan metrik kinerja yang dapat diukur serta pada tujuan akhir menurunkan variabilitas dan meningkatkan efisiensi [5], [8], [12].

Mekanisme Integrasi: Alur Iteratif Simulasi–Kualitas

Berdasarkan hasil sintesis literatur, dikembangkan sebuah kerangka konseptual integratif yang menghubungkan simulasi sistem dan rekayasa kualitas dalam peningkatan kinerja proses industri, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kerangka Konseptual Integratif Simulasi Sistem dan Rekayasa Kualitas dalam Peningkatan Kinerja Proses Industri

Gambar 2 menunjukkan kerangka konseptual integratif yang menghubungkan simulasi sistem dan rekayasa kualitas dalam suatu siklus evaluasi dan perbaikan berkelanjutan. Simulasi sistem digunakan untuk memodelkan dan menguji skenario perbaikan, sedangkan rekayasa kualitas berperan dalam analisis dan pengendalian variabilitas proses. Integrasi kedua pendekatan ini memungkinkan peningkatan kinerja proses industri secara sistematis dan berkelanjutan. Kerangka ini tidak hanya menunjukkan hubungan kausal antar pendekatan, tetapi juga menjelaskan urutan logis dan siklus pengambilan keputusan yang dapat direplikasi pada berbagai konteks industri.

Dari sintesis literatur muncul suatu mekanisme integrasi berulang (iterative loop) antara simulasi dan rekayasa kualitas, yang secara konseptual dapat dirumuskan dalam empat langkah utama: (i) **Define & Measure** — penggunaan data proses dan metrik kualitas untuk mendefinisikan masalah dan mengukur baseline kinerja; (ii) **Model & Analyze** — pembangunan model simulasi (DES atau hybrid) yang merepresentasikan proses dan variabilitas; (iii) **Design & Improve** — pengembangan alternatif perbaikan berdasarkan analisis kualitas (mis. root cause analysis, pareto, SPC) dan pengujian alternatif tersebut melalui simulasi; (iv) **Control & Monitor** — penerapan solusi terpilih dan monitoring via SPC / dashboard real-time yang kembali memberi data ke tahap Define [7], [10], [12], [14]. Model iteratif ini merepresentasikan hubungan sinergis: simulasi menambah kapabilitas eksperimentasi berisiko rendah, sementara rekayasa kualitas memastikan eksperimen tersebut terfokus pada perbaikan metrik yang relevan.

Literatur yang mengeksplorasi penerapan DES dalam konteks Lean Six Sigma, digital factory, dan Industry 4.0 mendukung alur ini, menunjukkan bahwa integrasi memungkinkan optimasi simultan aspek throughput, lead time, dan kualitas produk lewat skenario berulang dan analisis sensitivitas [6], [9], [11].

Nilai Tambah Integrasi bagi Peningkatan Kinerja Proses

Integrasi yang dirumuskan memberikan beberapa keuntungan praktis dan teoretis. Secara praktis, pengujian skenario perbaikan di lingkungan simulasi mengurangi risiko implementasi yang mahal dan mengganggu operasi; hal ini krusial ketika perubahan melibatkan investasi sumber daya atau re-layout lini produksi [4], [12]. Selain itu, penggabungan hasil simulasi dengan teknik statistik kualitas (mis. SPC, capability analysis) meningkatkan keandalan keputusan perbaikan dan memungkinkan validasi kuantitatif terhadap pengaruh solusi terhadap variabilitas proses [8], [15].

Secara teoretis, kerangka integratif menjembatani gap konseptual antara studi simulasi yang cenderung fokus pada dinamika sistem dan studi kualitas yang fokus pada pengurangan varians. Dengan hadirnya kerangka ini, penelitian dapat mengembangkan model kuantitatif yang menghubungkan parameter model simulasi (mis. distribusi waktu proses, reliabilitas mesin) dengan metrik kualitas (mis. Cp, Cpk, PPM), sehingga memfasilitasi analisis trade-off dan optimasi multi-objektif [1], [5], [14].

Tantangan Implementasi dan Pertimbangan Praktis

Meskipun manfaatnya jelas, sejumlah tantangan praktis muncul dari kajian literatur. Pertama, **ketersediaan dan kualitas data** menjadi pembatas utama dalam pembangunan model simulasi yang valid dan pengukuran kualitas yang akurat; integrasi membutuhkan data historis dan real-time berkualitas untuk kalibrasi dan validasi model [2], [10]. Kedua, **kompleksitas model**: model simulasi yang terlalu rinci dapat mempersulit interpretabilitas dan memperpanjang waktu komputasi; sebaliknya model yang terlalu sederhana mungkin mengabaikan variabilitas penting—oleh karena itu diperlukan keseimbangan (model parsimoni) dan pendekatan hybrid bila perlu [11], [13]. Ketiga, **kesiapan organisasi** (capability, kultur, dan sumber daya) untuk mengadopsi praktik terpadu, yang melibatkan kolaborasi antara tim engineering, kualitas, dan operasi, serta dukungan IT untuk integrasi data dan alat analitik [6], [9].

Arahan Penelitian Lanjutan

Berdasarkan gap empiris yang diidentifikasi pada literatur (lebih banyak studi kasus parsial daripada studi komprehensif), beberapa agenda riset disarankan: (1) **studi kasus komparatif** yang menguji efektifitas kerangka integratif pada berbagai sektor industri untuk mengukur dampak kuantitatif terhadap efisiensi dan kualitas; (2) **pengembangan metrik penghubung** antara variabel simulasi dan indikator kualitas (mis. formulasi fungsi biaya-kualitas) untuk optimasi multi-kriteria; (3) **penelitian tentang mekanisme kalibrasi otomatis** model simulasi berbasis data real-time (digital twin) dan interoperabilitas dengan sistem SPC; (4) **penelitian adopsi organisasi** yang mengeksplorasi faktor-faktor keberhasilan implementasi integrasi (kultur, kompetensi, infrastruktur TI) [3], [6], [10], [15].

Conclusion

Penelitian ini mengembangkan sebuah kerangka konseptual integratif yang menghubungkan simulasi sistem dan rekayasa kualitas sebagai pendekatan terpadu dalam peningkatan kinerja proses industri. Berdasarkan hasil sintesis literatur, penelitian ini menunjukkan bahwa simulasi sistem dan rekayasa kualitas memiliki peran yang saling melengkapi, namun dalam praktik dan kajian ilmiah sering diterapkan secara terpisah. Kerangka konseptual yang diusulkan menempatkan simulasi sistem sebagai alat analisis dinamis untuk pemodelan dan pengujian skenario perbaikan, sementara rekayasa kualitas berfungsi sebagai pendekatan sistematis untuk pengukuran, analisis variabilitas, serta perancangan dan pengendalian perbaikan proses.

Hasil utama penelitian ini adalah terbentuknya suatu mekanisme integratif berbasis siklus evaluasi dan umpan balik yang memungkinkan pengujian dan penyempurnaan perbaikan proses secara berulang sebelum implementasi pada sistem nyata. Integrasi ini mendukung pengambilan keputusan yang lebih akurat, mengurangi risiko implementasi, serta mendorong peningkatan kinerja proses yang berkelanjutan.

Secara akademik, penelitian ini memberikan kontribusi berupa pengayaan literatur Teknik Industri melalui pengembangan model konseptual yang menjembatani pendekatan simulasi sistem dan

rekayasa kualitas. Secara praktis, kerangka konseptual yang diusulkan dapat dijadikan panduan awal bagi praktisi industri dalam merancang strategi perbaikan proses yang lebih komprehensif dan berbasis analisis.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk menguji kerangka konseptual ini secara empiris melalui studi kasus atau eksperimen simulasi berbasis data aktual, serta mengembangkan indikator kinerja yang lebih spesifik untuk mengevaluasi efektivitas integrasi simulasi sistem dan rekayasa kualitas dalam berbagai konteks industri..

Reference

- [1] D. Mourtzis, "Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 58, no. 7, pp. 1927–1949, 2020. doi:10.1080/00207543.2019.1636321. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1636321>
- [2] W. de Paula Ferreira, F. Armellini, dan L. A. de Santa-Eulalia, "Simulation in Industry 4.0: A state-of-the-art review," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 150, p. 106892, 2020. doi:10.1016/j.cie.2020.106892. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106892>
- [3] S. S. Kamble, A. Gunasekaran, dan S. A. Gawankar, "Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 117, pp. 408–425, 2018. doi:10.1016/j.psep.2018.05.009. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009>
- [4] G. Guizzi, D. Falcone, dan F. De Felice, "An integrated and parametric simulation model to improve production and maintenance processes: Towards a digital factory performance," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 137, p. 106052, 2019. doi:10.1016/j.cie.2019.106052. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106052>
- [5] G. Oliveira, F. J. G. Silva, dan R. D. S. G. Campilho, "Lean manufacturing and simulation: a literature review and future directions," *J. Manuf. Syst.*, vol. 50, pp. 1–12, 2019. doi:10.1016/j.jmsy.2018.09.010. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.09.010>
- [6] M. H. M. Z. Zamri, M. H. A. Wahab, dan N. A. M. Nawati, "Applications of discrete event simulation in manufacturing: recent advances and future directions," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 52, pp. 1–15, 2020. doi:10.1016/j.jmapro.2020.04.006. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.006>
- [7] E. R. Zúñiga, N. Yasue, dan J. P. M. Silva, "An integrated discrete-event simulation with functional resonance analysis method and work domain analysis for manufacturing systems enhancement," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 176, p. 109246, 2023. doi:10.1016/j.cie.2023.109246. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109246>
- [8] S. Sony, J. Kumar, dan R. S. Antony, "Impact of quality management practices on production performance: evidence from manufacturing firms," *Total Quality Management & Business Excellence*, vol. 31, no. 5–6, pp. 1–22, 2020. doi:10.1080/14783363.2019.1670085. <https://doi.org/10.1080/14783363.2019.1670085>
- [9] G. L. Tortorella, F. S. Fogliatto, dan R. Giglio, "Industry 4.0 adoption as a driver for lean and agile manufacturing performance," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 60, no. 11, pp. 1–22, 2022. doi:10.1080/00207543.2021.1898732. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1898732>
- [10] J. S. Law, "Advances in simulation methodology for manufacturing systems," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 96, pp. 1–17, 2019. doi:10.1016/j.simpat.2019.03.010. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.03.010>

- [11] F. De Felice, D. Falcone, dan G. Guizzi, "Digital factory and integrated simulation for production optimization: literature and practice," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 154, p. 107047, 2021. doi:10.1016/j.cie.2020.107047. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107047>
- [12] S. S. Kamble, A. Gunasekaran, dan S. A. Gawankar, "Achieving sustainable performance in a data-driven agriculture supply chain: A review for research and applications," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 219, pp. 179–194, 2020. doi:10.1016/j.ijpe.2019.05.022. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.05.022>
- [13] A. H. A. Al-Mashari dan L. H. Khan, "Integrating simulation, optimization, and quality tools for shop-floor decision support," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 140, p. 106212, 2020. doi:10.1016/j.cie.2019.106212. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106212>
- [14] S. V. Buer, J. O. Strandhagen, dan F. T. S. Chan, "The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 56, no. 8, pp. 2924–2940, 2018. doi:10.1080/00207543.2018.1442945. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1442945>
- [15] S. Amaran, N. V. Sahinidis, B. Sharda, dan S. Bury, "Simulation optimization: A review of algorithms and applications," *Annals of Operations Research*, vol. 240, no. 1, pp. 351–380, 2016. doi:10.1007/s10479-014-1683-3. <https://doi.org/10.1007/s10479-014-1683-3>