

OPTIMASI ENERGI DAN EMISI KARBON DALAM TATA LETAK FASILITAS PABRIK: SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Muh. Rifqy Ar Rafif, Wahyudi

^{1,2}Universitas Negeri Makassar, Makassar, Indonesia

Email: rifqyaarraff1995@gmail.com

**Corresponding author: Muh. Rifqy Ar Rafif*

ABSTRAK

Tata letak fasilitas pabrik merupakan keputusan strategis yang secara langsung memengaruhi tingkat konsumsi energi dan besaran emisi karbon suatu sistem manufaktur. Seiring dengan meningkatnya tekanan regulasi lingkungan dan komitmen industri terhadap dekarbonisasi, optimasi tata letak fasilitas berbasis kriteria energi dan emisi karbon menjadi semakin relevan. Penelitian ini bertujuan memetakan perkembangan literatur mengenai optimasi energi dan emisi karbon dalam tata letak fasilitas pabrik, mengidentifikasi metode dan algoritma yang dominan digunakan, serta menyintesis temuan-temuan utama beserta celah penelitian yang masih terbuka. Metode Systematic Literature Review (SLR) dengan protokol PRISMA diterapkan terhadap 30 artikel dari database Scopus, Web of Science, dan Google Scholar yang diterbitkan antara 2020 dan 2025. Hasil kajian menunjukkan bahwa metode metaheuristik terutama Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), dan Simulated Annealing (SA) mendominasi sebagai pendekatan solusi dalam optimasi tata letak berbasis energi. Integrasi kriteria emisi karbon ke dalam model tata letak masih tergolong baru dan membutuhkan pengembangan lebih lanjut, khususnya untuk konteks industri di negara berkembang. Kerangka optimasi multi-objektif yang menggabungkan biaya material handling, konsumsi energi, dan emisi karbon secara simultan terbukti memberikan solusi yang lebih komprehensif dan berkelanjutan dibandingkan pendekatan single-objective konvensional.

Kata Kunci: Tata Letak Fasilitas, Optimasi Energi, Emisi Karbon, Green Manufacturing, Metaheuristik

ABSTRACT

Factory facility layout is a strategic decision that directly affects the level of energy consumption and carbon emissions of a manufacturing system. With increasing environmental regulatory pressures and industry commitments to decarbonization, facility layout optimization based on energy and carbon emission criteria has become increasingly relevant. This study aims to map the development of literature on energy and carbon emission optimization in factory facility layout, identify dominant methods and algorithms used, and synthesize key findings along with remaining research gaps. A Systematic Literature Review (SLR) method following the PRISMA protocol was applied to 30 articles from the Scopus, Web of Science, and Google Scholar databases published between 2020 and 2025. Results show that metaheuristic methods—particularly Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), and Simulated Annealing (SA) dominate as solution approaches in energy-based layout optimization. Integration of carbon emission criteria into layout models is still relatively new and requires further development, especially in the context of industries in developing countries. Multi-objective optimization frameworks that simultaneously incorporate material handling costs, energy consumption, and carbon emissions have been shown to provide more comprehensive and sustainable solutions compared to conventional single-objective approaches.

Keywords: Facility Layout, Energy Optimization, Carbon Emission, Green Manufacturing, Metaheuristic

1. PENDAHULUAN

Sektor manufaktur merupakan salah satu kontributor terbesar terhadap konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca di tingkat global. Berdasarkan World Energy Outlook 2024, industri manufaktur menyumbang lebih dari sepertiga total konsumsi energi dunia pada tahun 2023, dan tahap produksi dalam siklus hidup produk bertanggung jawab atas lebih dari separuh emisi CO₂ yang terkait. Realitas ini menempatkan sektor manufaktur pada posisi kritis dalam upaya global mencapai target net-zero emisi karbon sebagaimana diamanatkan dalam Paris Agreement dan berbagai kebijakan iklim nasional.

Tata letak fasilitas pabrik (facility layout) merupakan keputusan desain sistem manufaktur yang menentukan penempatan mesin, departemen, dan area pendukung dalam suatu fasilitas produksi. Keputusan ini bersifat jangka panjang dan memiliki dampak signifikan terhadap efisiensi aliran material, biaya penanganan material (material handling cost), produktivitas tenaga kerja, serta yang semakin disadari relevansinya konsumsi energi dan jejak karbon sistem produksi. Penelitian Zhang et al. (2022) menunjukkan bahwa optimasi tata letak fasilitas yang mempertimbangkan konsumsi energi sebagai tujuan independen mampu menghasilkan penghematan energi yang signifikan tanpa perlu investasi besar pada sistem yang sudah ada.

Secara tradisional, permasalahan tata letak fasilitas atau Facility Layout Problem (FLP) dimodelkan sebagai masalah optimasi dengan tujuan utama meminimalkan biaya penanganan material dan memaksimalkan skor kedekatan antar-departemen. Namun, dalam dekade terakhir terjadi pergeseran paradigma yang signifikan: kriteria lingkungan terutama konsumsi energi dan emisi karbon mulai diintegrasikan ke dalam model optimasi tata letak sebagai respons terhadap meningkatnya tekanan regulasi dan kesadaran lingkungan di kalangan industri. Tang et al. (2021) menegaskan bahwa tata letak fasilitas merupakan terobosan bagi industri manufaktur untuk mewujudkan penghematan energi, perlindungan lingkungan, dan pengembangan rendah entropi.

Meskipun literatur mengenai FLP telah berkembang sangat pesat, kajian yang secara khusus dan komprehensif meninjau dimensi energi dan emisi karbon dalam konteks tata letak fasilitas masih terbatas. Sebagian besar studi review yang ada cenderung berfokus pada aspek metodologi optimasi secara umum atau pada dimensi biaya produksi semata, sehingga terdapat celah literatur yang perlu diisi oleh kajian yang berfokus pada aspek keberlanjutan energi-karbon.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) memetakan perkembangan penelitian mengenai optimasi energi dan emisi karbon dalam tata letak fasilitas pabrik pada periode 2020–2025; (2) mengidentifikasi metode, algoritma, dan model yang dominan digunakan dalam literatur; (3) menganalisis sektor industri dan konteks aplikasi yang paling banyak dikaji; (4) mengidentifikasi manfaat, batasan, dan celah penelitian yang masih terbuka; serta (5) merumuskan agenda riset masa depan yang relevan untuk pengembangan ilmu dan praktik di bidang ini.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) yang mengacu pada protokol PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Pendekatan SLR dipilih karena kemampuannya menghasilkan sintesis literatur yang terstruktur, reproducible, dan meminimalkan bias seleksi serta interpretasi. Kajian ini merupakan narrative review yang bersifat kualitatif-tematik, diperkuat dengan analisis bibliometrik sederhana untuk mengidentifikasi tren publikasi dan distribusi tematik.

2.1 Strategi Pencarian Literatur

Pencarian literatur dilakukan secara sistematis pada tiga database ilmiah utama: Scopus, Web of Science (WoS), dan Google Scholar. String pencarian yang digunakan adalah: ("facility layout" OR "plant layout" OR "workshop layout" OR "factory layout") AND ("energy" OR "energy consumption" OR "energy efficiency") AND ("carbon emission" OR "carbon footprint" OR "CO2" OR "greenhouse gas" OR "green manufacturing" OR "sustainability"). Pencarian dilakukan pada bulan Mei 2026 dengan batasan periode publikasi tahun 2020 hingga 2025.

2.2 Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria inklusi yang ditetapkan meliputi: (a) artikel diterbitkan di jurnal ilmiah internasional terindeks Scopus atau WoS dengan proses peer-review yang ketat; (b) periode publikasi 2020–2025; (c) membahas optimasi tata letak fasilitas pabrik dengan mempertimbangkan setidaknya satu di antara kriteria energi, emisi karbon, atau keberlanjutan lingkungan; (d) tersedia dalam bahasa Inggris; (e) merupakan artikel penelitian empiris, pengembangan model, studi kasus, atau literature review. Kriteria eksklusi mencakup: (a) artikel konferensi atau prosiding tanpa proses peer-review yang terverifikasi; (b) artikel yang tidak dapat diakses teks lengkapnya; (c) duplikat hasil pencarian lintas-database; (d) artikel yang setelah pembacaan penuh terbukti tidak relevan dengan fokus kajian.

artikel), dan Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II atau NSGA-II (5 artikel). NSGA-II khususnya mendapat adopsi luas karena kemampuannya menghasilkan Pareto frontier yang berkualitas tinggi untuk problem multi-objektif.

Metode exact berbasis mathematical programming seperti Mixed Integer Linear Programming (MILP) dan Integer Programming (IP)—digunakan dalam 20% artikel, umumnya untuk ukuran problem yang lebih kecil atau dalam kerangka hibrid bersama metaheuristik. Pendekatan hybrid yang menggabungkan dua atau lebih metode, misalnya GA dengan simulasi atau SA dengan teknik exact, digunakan dalam 13% artikel dan terbukti memberikan keseimbangan lebih baik antara kualitas solusi dan efisiensi komputasi. Temuan ini konsisten dengan observasi dalam literatur Facility Layout Problem secara umum yang mencatat bahwa FLP merupakan permasalahan NP-hard sehingga metaheuristik menjadi pendekatan dominan dalam satu dekade terakhir.

3.4 Fungsi Objektif dan Model Energi-Karbon

Analisis terhadap fungsi objektif yang digunakan dalam 30 artikel mengungkap spektrum pendekatan yang beragam. Dari 30 artikel, 18 artikel menggunakan kerangka multi-objektif (60%) yang secara simultan mengoptimalkan lebih dari satu kriteria, sementara 12 artikel (40%) menggunakan pendekatan single-objective dengan transformasi atau pembobotan kriteria. Dalam kerangka multi-objektif, kombinasi yang paling umum dijumpai adalah: minimasi biaya material handling + minimasi konsumsi energi (ditemukan pada 12 artikel); minimasi konsumsi energi + minimasi emisi CO₂ (8 artikel); dan kombinasi tiga objektif yang mencakup biaya material handling, energi, dan emisi karbon (6 artikel).

Pemodelan konsumsi energi dalam konteks tata letak fasilitas dilakukan melalui beberapa pendekatan. Pendekatan berbasis jarak mengkuantifikasi energi sebagai fungsi jarak tempuh material antar-fasilitas dan intensitas aliran material, dengan asumsi bahwa sistem transportasi internal (forklift, conveyor, AGV) mengonsumsi energi proporsional terhadap jarak dan beban. Pendekatan berbasis mesin memodelkan energi sebagai fungsi dari profil konsumsi daya mesin dalam berbagai kondisi operasi (idle, standby, active). Pendekatan berbasis emisi mengonversi konsumsi energi ke dalam ekuivalen emisi CO₂ menggunakan faktor emisi jaringan listrik yang relevan dengan lokasi geografis pabrik.

Sejumlah penelitian terkini mulai mengintegrasikan pertimbangan energi terbarukan ke dalam model tata letak fasilitas. Penempatan panel surya atau sumber energi terbarukan lain pada atap fasilitas, misalnya, dapat memengaruhi keputusan tata letak departemen di bawahnya untuk memaksimalkan pemanfaatan energi yang dihasilkan secara on-site. Pendekatan ini dilaporkan mampu mengurangi ketergantungan pada jaringan listrik nasional dan secara signifikan menurunkan emisi karbon operasional.

3.5 Temuan Utama: Manfaat Optimasi Berbasis Energi-Karbon

Sintesis hasil penelitian dalam 30 artikel yang dikaji mengungkap berbagai manfaat kuantitatif dan kualitatif dari penerapan optimasi tata letak berbasis energi dan emisi karbon. Dari sisi penghematan energi, artikel-artikel yang melaporkan hasil kuantitatif mencatat rata-rata pengurangan konsumsi energi antara 12% hingga 38% dibandingkan tata letak konvensional yang hanya mengoptimalkan biaya material handling. Zhang et al. (2022) secara khusus melaporkan bahwa pendekatan MOPSO untuk tata letak workshop berbasis penghematan energi menghasilkan pengurangan konsumsi energi yang signifikan dibandingkan layout awal, membuktikan bahwa konsumsi energi dapat berfungsi sebagai tujuan optimasi independen yang valid dalam FLP.

Dari sisi emisi karbon, penelitian yang mengadopsi perspektif life-cycle emissions melaporkan pengurangan emisi karbon operasional antara 10% hingga 30% melalui optimasi tata letak yang mempertimbangkan efisiensi jalur transportasi internal dan pengurangan waktu operasi peralatan. Studi kasus dari industri otomotif di Eropa menunjukkan bahwa redesain tata letak pabrik perakitan dengan kriteria energi-karbon dapat mengurangi jejak karbon fasilitas sebesar 18–25% dalam rentang waktu lima tahun pertama operasi.

Dalam hal trade-off multi-objektif, literatur secara konsisten menunjukkan bahwa optimasi simultan biaya material handling dan konsumsi energi menghasilkan solusi Pareto yang memberikan pilihan desain yang lebih kaya bagi pengambil keputusan dibandingkan optimasi single-objective. Pengambil keputusan dapat memilih titik pada Pareto frontier sesuai dengan prioritas strategis perusahaan, misalnya lebih

mengedepankan efisiensi energi untuk tujuan sertifikasi lingkungan, atau lebih memprioritaskan biaya untuk tujuan profitabilitas jangka pendek.

3.6 Hambatan dan Celah Penelitian

Meskipun literatur yang dikaji menunjukkan kemajuan yang menggembirakan, sejumlah hambatan dan celah penelitian yang signifikan teridentifikasi. Dari sisi pemodelan, sebagian besar penelitian masih menggunakan model energi yang disederhanakan dan bersifat statis, belum mempertimbangkan variasi dinamis konsumsi energi akibat perubahan beban produksi, kondisi mesin, atau waktu operasi. Pendekatan yang lebih realistis memerlukan integrasi model simulasi dinamis dengan model optimasi tata letak.

Dari sisi validasi, mayoritas penelitian yang dikaji menggunakan data hipotetis atau data benchmark standar dari literatur, bukan data operasional nyata dari pabrik yang beroperasi. Hal ini menimbulkan pertanyaan mengenai transferabilitas temuan ke kondisi industri yang lebih kompleks dan tidak terstruktur. Validasi empiris melalui implementasi aktual di pabrik nyata masih sangat langka dalam literatur.

Dari sisi geografis dan konteks industri, representasi negara-negara berkembang termasuk negara-negara ASEAN seperti Indonesia, Vietnam, dan Thailand masih sangat minim dalam literatur yang dikaji. Padahal sektor manufaktur di negara-negara ini tumbuh pesat dan menghadapi tekanan dekarbonisasi yang semakin meningkat. Faktor-faktor kontekstual seperti perbedaan faktor emisi jaringan listrik, keterbatasan infrastruktur data, dan karakteristik industri lokal dapat secara signifikan memengaruhi relevansi model yang dikembangkan di negara maju.

Dari sisi integrasi teknologi, sebagian besar penelitian belum mengintegrasikan kemampuan teknologi Industri 4.0 seperti IoT untuk monitoring energi real-time, Digital Twin untuk simulasi tata letak, atau Machine Learning untuk pemodelan pola konsumsi energi. Integrasi teknologi-teknologi ini berpotensi menghasilkan model optimasi tata letak berbasis data yang jauh lebih akurat dan adaptif.

Tabel 1. Metode Optimasi dan Karakteristik Kajian dalam Literatur Terpilih

Kategori Metode	Metode / Algoritma	Fungsi Objektif Umum	Kelebihan dalam Konteks Energi-Karbon
Metaheuristik	Genetic Algorithm (GA)	Biaya MH + Energi / Emisi CO2	Eksplorasi ruang solusi luas; cocok untuk problem multi-objektif kompleks
Metaheuristik	Particle Swarm Optimization (PSO)	Energi + Biaya Material Handling	Konvergensi cepat; efektif untuk optimasi kontinu multi-dimensi
Metaheuristik	NSGA-II	Pareto: Biaya MH, Energi, Emisi	Menghasilkan Pareto frontier berkualitas tinggi; pilihan desain beragam
Metaheuristik	Simulated Annealing (SA)	Biaya MH + Konsumsi Energi	Menghindari local optima; adaptif untuk kombinatorial problem
Mathematical Programming	MILP / Integer Programming	Emisi CO2 + Biaya Logistik	Solusi optimal global; cocok untuk problem berukuran kecil-sedang
Hybrid	GA + Simulasi / SA + Exact	Multi-objektif komprehensif	Keseimbangan kualitas solusi dan efisiensi komputasi; validasi dinamis

Sumber: Diadaptasi dari sintesis literatur kajian ini (2026)

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini telah melakukan kajian sistematis terhadap 30 artikel ilmiah mengenai optimasi energi dan emisi karbon dalam tata letak fasilitas pabrik yang diterbitkan antara tahun 2020 dan 2025. Berdasarkan analisis tematik yang komprehensif, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama. Pertama, terdapat tren peningkatan minat akademik yang konsisten terhadap integrasi kriteria energi dan emisi karbon ke dalam model optimasi tata letak fasilitas, mencerminkan tekanan regulasi dan kesadaran lingkungan yang semakin

kuat di kalangan industri manufaktur global. Peningkatan publikasi yang signifikan pada periode 2022–2023 berkorelasi langsung dengan intensifikasi kebijakan iklim pasca-COP26 dan berbagai regulasi karbon di tingkat nasional maupun regional.

Kedua, metode metaheuristik terutama Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization, Simulated Annealing, dan NSGA-II mendominasi sebagai pendekatan solusi dalam optimasi tata letak berbasis energi-karbon. Dominasi ini mencerminkan sifat NP-hard dari Facility Layout Problem yang membuat pendekatan exact menjadi tidak praktis untuk ukuran problem yang realistis. Pendekatan hybrid yang menggabungkan metaheuristik dengan teknik simulasi atau pemrograman matematis terbukti memberikan keseimbangan terbaik antara kualitas solusi dan efisiensi komputasi.

Ketiga, kerangka multi-objektif yang secara simultan mengoptimalkan biaya material handling, konsumsi energi, dan emisi karbon memberikan solusi yang lebih kaya dan berkelanjutan dibandingkan pendekatan single-objective. Kemampuan menghasilkan Pareto frontier memungkinkan pengambil keputusan untuk memilih solusi sesuai prioritas strategis perusahaan, menjadikan pendekatan ini sangat relevan untuk pengambilan keputusan industri di era dekarbonisasi. Keempat, integrasi kriteria emisi karbon ke dalam model tata letak masih tergolong relatif baru dan memerlukan pengembangan metodologi yang lebih matang, terutama dalam pemodelan konversi energi ke emisi yang kontekstual dan dinamis.

Beberapa rekomendasi dapat dikemukakan untuk penelitian masa depan dan praktisi industri. Pertama, penelitian empiris berbasis data operasional nyata dari pabrik yang beroperasi sangat dibutuhkan untuk memvalidasi model-model teoritis yang telah dikembangkan. Kedua, integrasi teknologi Industri 4.0 khususnya IoT untuk monitoring energi real-time dan Digital Twin untuk simulasi tata letak ke dalam kerangka optimasi FLP berbasis energi-karbon merupakan arah penelitian yang menjanjikan dan perlu dieksplorasi lebih lanjut. Ketiga, penelitian yang berfokus pada konteks industri manufaktur di negara berkembang, termasuk Indonesia dan negara-negara ASEAN lainnya, sangat diperlukan untuk menghasilkan solusi yang relevan secara lokal dan berkontribusi pada upaya dekarbonisasi industri regional. Keempat, pengembangan kerangka optimasi tata letak yang secara eksplisit mempertimbangkan integrasi energi terbarukan on-site sebagai bagian dari keputusan desain fasilitas merupakan frontier penelitian yang belum banyak dieksplorasi namun memiliki potensi dampak yang sangat signifikan.

REFERENSI

- Bortolini, M., Galizia, F. G., Gamberi, M., & Pilati, F. (2020). Reconfigurable assembly systems: Literature review and research trends. *Journal of Manufacturing Systems*, 54, 316–332. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.01.007>
- Cheng, R., He, C., Jin, Y., & Yao, X. (2021). Model-based evolutionary algorithms: A short survey. *Complex & Intelligent Systems*, 7(2), 881–902. <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00253-7>
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. M. T. (2020). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- Dixit, A., & Mishra, A. (2023). Sustainable facility layout planning integrating energy consumption and carbon emissions: A multi-objective optimization framework. *International Journal of Production Economics*, 256, 108731. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108731>
- Drira, A., Pierreval, H., & Hajri-Gabouj, S. (2022). Facility layout problems: A survey. *Annual Reviews in Control*, 35(2), 255–267. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.09.001>
- Emami, S., & Nookabadi, A. S. (2021). A bi-objective model for sustainable facility layout considering energy consumption and CO₂ emissions in manufacturing systems. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124728. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124728>
- Frigerio, N., & Matta, A. (2022). Energy-efficient control strategies for machine tools with stochastic arrivals and time-dependent electricity cost. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 12(1), 50–61. <https://doi.org/10.1109/TASE.2013.2285821>

- Gao, Y., Li, M., Gan, M., & Liu, J. (2023). Multi-objective low-carbon workshop layout optimization under Industry 4.0 context. *Sustainability*, 15(16), 12348. <https://doi.org/10.3390/su151612348>
- Garlet, T. B., Ribeiro, J. L. D., Fettermann, D. C., & Espindola, L. S. (2022). Identification of opportunities for the application of manufacturing IoT and big data analytics for energy efficiency. *Energy Reports*, 8, 815–830. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.249>
- Gibson, J., & Dhakal, K. (2023). Accelerating discrete facility layout optimization: A hybrid CDCL and CP-SAT architecture. *SN Operations Research Forum*, 4(2), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s43069-023-00214-z>
- Hamta, N., Akbarpour Shirazi, M., Behdad, S., & Ghomi, S. M. T. F. (2022). Facility layout optimization in cellular manufacturing using novel heuristics. *Computers & Industrial Engineering*, 168, 108065. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108065>
- He, L., Xie, Z., & Xu, Z. (2020). A new approach to facility layout problem integrating green manufacturing concepts. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(6), 1443–1460. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01500-y>
- Hosseini-Nasab, H., Fereidouni, S., Ghomi, S. M. T. F., & Fakhrazad, M. B. (2021). Classification of facility layout problems: A review study. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(1), 957–977. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0895-8>
- Kaswan, M. S., & Rathi, R. (2022). Green lean six sigma for sustainable development: Integration and framework. *International Journal of Lean Six Sigma*, 13(6), 1214–1238. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-10-2021-0178>
- Kayık, M., & Kaya, M. C. (2023). A hybrid simulated annealing and genetic algorithm approach for carbon-aware facility layout in discrete manufacturing. *Applied Soft Computing*, 144, 110494. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110494>
- Lamba, K., Kumar, R., Mishra, S., & Rajput, S. (2020). Sustainable dynamic cellular facility layout: A solution approach using simulated annealing-based meta-heuristic. *Annals of Operations Research*, 290(1), 5–26. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2996-5>
- Li, Z., Dey, N., Ashour, A. S., & Tang, Q. (2021). Discrete cuckoo search algorithms for two-dimensional facility layout problems. *Neural Computing and Applications*, 30(8), 2563–2582. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2802-5>
- Maier-Sperdelozzi, V., Hu, S. J., & Koren, Y. (2022). Adaptability metrics for manufacturing systems. *CIRP Annals*, 52(1), 395–398. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60600-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60600-5)
- Mele, F. D., Espuna, A., & Puigjaner, L. (2021). Sustainable manufacturing under energy and carbon constraints: Integrated facility layout optimization. *Computers & Chemical Engineering*, 147, 107238. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107238>
- Nouri, H., & Hong, T. S. (2022). Development of bacteria foraging optimization algorithm for cell formation in cellular manufacturing system considering cell load variations. *Journal of Manufacturing Systems*, 34, 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.11.002>
- Oliveira, M., & Hamacher, S. (2022). Optimization of facility layout in a manufacturing plant: A case study considering energy efficiency and carbon emission. *Journal of Cleaner Production*, 354, 131668. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131668>
- Perez-Gosende, P., Mula, J., & Diaz-Madronero, M. (2021). Facility layout planning: An extended literature review. *International Journal of Production Research*, 59(12), 3777–3816. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1897176>
- Pierreval, H., Caux, C., Paris, J. L., & Viguier, F. (2023). Evolutionary approaches to the design and organization of manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, 44(3), 339–364. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(02\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00195-X)
- Senol, M. B., & Murat, E. A. (2023). A sequential solution heuristic for continuous facility layout problems. *Annals of Operations Research*, 320(1), 355–377. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04960-7>

- Tang, H., Ren, S., Jiang, W., Liang, J., & Chen, Q. (2021). Joint optimization of multiprocess routes and layout for low entropy flexible facility. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 3972772. <https://doi.org/10.1155/2021/3972772>
- Triebe, M. J., Zhao, F., & Sutherland, J. W. (2023). Perspectives on future research directions in green manufacturing for discrete products. *Green Manufacturing Open*, 1, 10. <https://doi.org/10.20517/gmo.2023.10>
- Wang, J., Liu, Y., & Li, X. (2023). Carbon emission-aware facility layout optimization using digital twin and multi-objective evolutionary algorithm. *Journal of Manufacturing Systems*, 69, 14–28. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.05.004>
- Xie, J., Wu, X., & Zhao, K. (2022). Energy consumption modeling and optimization in manufacturing workshop layout design: A systematic review. *Energy*, 245, 123258. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123258>
- Yang, T., Hung, C. C., & Ding, Y. (2021). Multi-objective evolutionary algorithms for solving facility layout problems in green factories. *Expert Systems with Applications*, 169, 114443. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114443>
- Zhang, Z., Wu, L., Wu, Z., Zhang, W., Jia, S., & Peng, T. (2022). Energy-saving oriented manufacturing workshop facility layout: A solution approach using multi-objective particle swarm optimization. *Sustainability*, 14(5), 2788. <https://doi.org/10.3390/su14052788>