



## *ABSTRACT*

The rolling stock manufacturing industry, as part of the heavy industry, has different operating characteristics from general manufacturing, such as the use of large machines and components, limited facility moves, high-capacity material handling systems, and walking worker operators. In addition, the high cost of re-layout leads companies to maintain layout configurations in the long term despite changes in demand and material flow. These conditions make the facility layout design not only efficient but also stable and resilient to uncertainty. However, most facility layout research still focuses on cost efficiency and has not comprehensively considered the characteristics of heavy industry or operational uncertainty.

This study proposes an optimization model that produces a stable or robust facility layout that simultaneously accounts for material and operator movement costs and layout stability under material demand and flow uncertainties. The main novelty of the model lies in the integration of heavy industry operational characteristics, namely the presence of fixed facilities, consideration of aisle width and unequal area, the presence of fatigue and recovery factors in walking worker operators, and the determination of facility length, all considered comprehensively. Furthermore, the model is formulated in Robust Mixed Integer Linear Programming (RMILP) with the Total Movement Cost (TMC) objective function consisting of Total Material Handling Cost (TMHC) and Total Walking Worker Operator Cost (TWOC), and equipped with a robustness index as a measure of the stability of the solution. The case study on PT INKA (Persero) is used to represent the real conditions of the heavy industry. To obtain solutions efficiently for large, multi-objective problems, the next model is solved using a metaheuristic approach.

The optimization results show that the model produces a more stable layout configuration against variations in demand and changes in material flow, compared to the deterministic approach. In multi-objective problems, the resulting Pareto solution provides a compromise between cost efficiency and layout resilience. In terms of solution quality, the MOPSO approach outperformed the NSGA II approach in the same test configuration. The model was further expanded to account for the type of material-handling system and work-in-process, to better reflect real industrial conditions. The final layout was selected using the multi-criteria decision-making (MCDM) method as a quantitative approach, so the solutions obtained can be directly used as a basis for practical decision-making.

**Keywords:** rolling stock manufacturing industry, mathematical model, robust facility layout, uncertainty, human factors, multi-objective optimization



## INTISARI

Industri manufaktur kereta api sebagai bagian dari *heavy industry* memiliki karakteristik operasi yang berbeda dengan manufaktur umum, seperti penggunaan mesin dan komponen berukuran besar, keterbatasan pemindahan fasilitas, penggunaan *material handling system* berkapasitas tinggi, serta keterlibatan *walking worker operator*. Selain itu, tingginya biaya *re-layout* menyebabkan perusahaan cenderung mempertahankan konfigurasi tata letak dalam jangka panjang meskipun terjadi perubahan permintaan dan aliran material. Kondisi tersebut menjadikan perancangan tata letak fasilitas tidak hanya harus efisien, tetapi juga stabil dan tahan terhadap ketidakpastian. Namun, sebagian besar penelitian tata letak fasilitas masih berfokus pada efisiensi biaya dan belum secara komprehensif mempertimbangkan karakteristik *heavy industry* serta ketidakpastian operasional.

Penelitian ini mengusulkan model optimasi yang menghasilkan tata letak fasilitas stabil atau *robust* yang secara simultan mempertimbangkan biaya perpindahan material, biaya pergerakan operator, serta stabilitas tata letak terhadap ketidakpastian permintaan dan aliran material. Kebaruan utama model terletak pada integrasi karakteristik operasional *heavy industry*, yaitu keberadaan fasilitas tetap, mempertimbangkan lebar lorong, *unequal area*, adanya faktor kelelahan dan *recovery* pada *walking worker operator*, serta penentuan panjang fasilitas yang dipertimbangkan secara komprehensif. Selanjutnya, model dirumuskan dalam *Robust Mixed Integer Linear Programming* (RMILP) dengan fungsi tujuan *Total Movement Cost* (TMC) yang terdiri dari *Total Material Handling Cost* (TMHC) dan *Total Walking Worker Operator Cost* (TWOC), serta dilengkapi dengan *robustness index* sebagai ukuran stabilitas solusi. Untuk memperoleh solusi secara efisien pada jumlah fasilitas besar dan multi-objektif, model selanjutnya diselesaikan menggunakan pendekatan metaheuristik.

Hasil optimasi menunjukkan bahwa model mampu menghasilkan konfigurasi tata letak yang lebih stabil terhadap variasi permintaan dan perubahan aliran material dibandingkan pendekatan deterministik. Pada permasalahan multi-objektif, solusi *Pareto* yang dihasilkan memberikan alternatif kompromi antara efisiensi biaya dan ketahanan tata letak. Dari sisi kualitas himpunan solusi, pendekatan MOPSO menunjukkan kinerja lebih baik dibandingkan pendekatan NSGA II pada konfigurasi pengujian yang sama. Model selanjutnya diperluas dengan mempertimbangkan jenis *material handling system* dan *work in process* untuk meningkatkan kedekatan dengan kondisi industri nyata. Pemilihan tata letak akhir dilakukan menggunakan metode *multi-criteria decision-making* (MCDM) sebagai metode pemilihan kuantitatif sehingga solusi yang diperoleh dapat langsung digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan praktis.

**Kata Kunci:** industri manufaktur kereta api, model matematika, tata letak fasilitas *robust*, ketidakpastian, faktor manusia, optimasi multi objektif