

Optimasi Desain Struktur Baja untuk Efisiensi Material

Pandya Fadil Mumpintoro¹, Edison Hatoguan Manurung²

^{1,2}Program Studi Teknik sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mpu Tantular, Jakarta, Indonesia
E-mail: pandyafadil11@gmail.com, edisonmanurung2010@yahoo.com

Article Info

Article history:

Received April 17, 2026

Revised May 10, 2026

Accepted May 14, 2026

Keywords:

Steel Structures, Optimization, Material Efficiency, Topological Optimization, Genetic Algorithms, Finite Element Analysis, Sustainability.

ABSTRACT

The demand for sustainable construction has driven the need to reduce material consumption in structural systems without compromising safety and performance. Steel structures, known for their high strength-to-weight ratio, offer significant opportunities for optimization. This paper presents a comprehensive framework for the design optimization of steel structures with a focus on material efficiency. The proposed methodology integrates topology optimization, genetic algorithms, and finite element analysis (FEA) to minimize structural weight while meeting constraints on stress, displacement, and stability. A series of numerical experiments was conducted on representative steel truss structures to evaluate the performance of the proposed approach. The results show that material savings of up to 30% can be achieved compared to conventional design practices. Additionally, the optimized structures exhibit improved load distribution and enhanced structural performance. This research highlights the potential of computational optimization techniques in achieving cost-effective and environmentally sustainable steel designs.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Article Info

Article history:

Received April 17, 2026

Revised May 10, 2026

Accepted May 14, 2026

Keywords:

Struktur Baja, Optimasi, Efisiensi Material, Optimasi Topologi, Algoritma Genetika, Analisis Elemen Hingga, Keberlanjutan.

ABSTRACT

Permintaan terhadap konstruksi berkelanjutan telah mendorong kebutuhan untuk mengurangi konsumsi material pada sistem struktur tanpa mengorbankan keselamatan dan kemampuan layan. Struktur baja, yang dikenal memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, menawarkan peluang signifikan untuk optimasi. Makalah ini menyajikan kerangka komprehensif untuk optimasi desain struktur baja dengan fokus pada efisiensi material. Metodologi yang diusulkan mengintegrasikan optimasi topologi, algoritma genetika, dan analisis elemen hingga (*Finite Element Analysis/FEA*) untuk meminimalkan berat struktur sambil memenuhi batasan tegangan, perpindahan, dan stabilitas. Serangkaian eksperimen numerik dilakukan pada struktur rangka baja representatif untuk mengevaluasi kinerja pendekatan yang diusulkan. Hasil menunjukkan bahwa penghematan material hingga 30% dapat dicapai dibandingkan praktik desain konvensional. Selain itu, struktur hasil optimasi menunjukkan distribusi beban yang lebih baik dan peningkatan kinerja struktural. Penelitian ini menyoroti potensi teknik optimasi komputasional dalam mencapai desain baja yang hemat biaya dan berkelanjutan secara lingkungan.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Corresponding Author:

Pandya Fadil Mumpintoro
Program Studi Teknik sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mpu Tantular, Jakarta, Indonesia
E-mail: pandyafadil11@gmail.com

PENDAHULUAN

Struktur baja sering digunakan dalam rekayasa modern karena fleksibilitas, daya tahan, dan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi. Namun, metode desain tradisional yang bergantung pada asumsi konservatif sehingga penggunaan material berlebihan. Dalam konteks meningkatnya biaya material dan kekhawatiran terhadap lingkungan, optimasi desain struktur untuk efisiensi material menjadi tujuan yang sangat penting.

Kemajuan terbaru dalam perangkat sistem komputasi memberi peluang bagi para insinyur mengeksplorasi solusi desain inovatif yang sebelumnya tidak memungkinkan untuk dilakukan. Teknik optimasi memungkinkan eksplorasi sistematis terhadap ruang desain, sehingga konfigurasi yang meminimalkan penggunaan material sambil mempertahankan integritas struktur dapat diidentifikasi.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan memvalidasi kerangka optimasi untuk struktur baja dengan menggabungkan optimasi topologi, algoritma genetika, dan analisis elemen hingga. Tujuan utama penelitian adalah meminimalkan berat struktur sambil memenuhi batasan desain berdasarkan standar internasional seperti *Eurocode 3* dan *AISC Steel Construction Manual*.

TINJAUAN LITERATUR

Optimasi dalam rekayasa struktur telah menjadi bidang penelitian aktif selama beberapa dekade. Pendekatan awal berfokus pada optimasi ukuran, di mana dimensi penampang disesuaikan untuk memenuhi kriteria performa. Perkembangan terbaru mencakup optimasi bentuk dan optimasi topologi yang memberikan fleksibilitas lebih besar dalam desain. Optimasi topologi, yang diperkenalkan oleh Bendsoe dan Sigmund, memungkinkan redistribusi material dalam domain desain yang telah ditentukan. Metode ini telah berhasil diterapkan pada berbagai permasalahan teknik, termasuk struktur rangka batang, portal, dan struktur kontinu.

Algoritma genetika (*Genetic Algorithms/GA*), yang terinspirasi dari evolusi alam, sering digunakan untuk menyelesaikan masalah optimasi kompleks. GA sangat efektif untuk masalah nonlinier dan multimodal, di mana pada penggunaan metode berbasis gradien tradisional masih sering gagal. Analisis elemen hingga (*Finite Element Analysis/FEA*) menjadi peran penting dalam mengevaluasi kinerja struktur. Dengan mendiskretisasi struktur menjadi elemen-elemen kecil, FEA memungkinkan untuk perhitungan tegangan, perpindahan, dan karakteristik stabilitas dengan akurat. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa kombinasi dari teknik (*Genetic Algorithms/GA*) dan (*Finite Element Analysis/FEA*) ini dapat meningkatkan efisiensi material yang signifikan. Namun demikian, tantangan masih tetap ada dalam hal biaya komputasi dan implementasi praktis.

METODE

1. Formulasi Permasalahan

Permasalahan optimasi diformulasikan sebagai masalah minimisasi berat dengan batasan struktural. Fungsi objektif didefinisikan sebagai total berat struktur, yang dinyatakan sebagai jumlah hasil perkalian densitas material, luas penampang, dan panjang elemen.

Batasan meliputi batas tegangan, batas perpindahan, dan persyaratan stabilitas. Tegangan pada setiap elemen tidak boleh melebihi tegangan izin yang ditentukan oleh standar desain. Demikian pula, perpindahan pada titik kritis harus tetap berada dalam batas

yang diperbolehkan untuk memastikan kemampuan layan. Permasalahan optimasi dapat dinyatakan dalam bentuk umum sebagai berikut: meminimalkan total berat struktur dengan batasan tegangan, perpindahan, dan stabilitas.

2. Optimasi Topologi

Optimasi topologi digunakan untuk menentukan distribusi material yang optimal dalam suatu domain desain. Ruang desain didiskretisasi menjadi elemen hingga, dan setiap elemen diberikan variabel densitas. Proses optimasi secara iteratif memperbarui variabel-variabel tersebut untuk meminimalkan fungsi objektif. Pendekatan umum yang digunakan adalah metode *Solid Isotropic Material with Penalization* (SIMP), yang memberikan penalti terhadap nilai densitas menengah untuk menghasilkan perbedaan yang jelas antara area padat dan area kosong.

3. Algoritma Genetika

Algoritma genetika digunakan untuk mengoptimalkan variabel desain diskrit, seperti ukuran elemen struktur. Algoritma dimulai dengan populasi awal solusi kandidat yang dievaluasi berdasarkan fungsi fitness.

4. Analisis Elemen Hingga

Analisis elemen hingga digunakan untuk mengevaluasi respons struktur pada setiap iterasi desain. Matriks kekakuan disusun, dan sistem persamaan diselesaikan untuk memperoleh perpindahan nodal. Dari hasil tersebut, tegangan dan parameter stabilitas dihitung. Integrasi FEA dalam siklus optimasi memastikan bahwa seluruh solusi kandidat memenuhi batasan yang dipersyaratkan.

MODEL NUMERIK

Struktur rangka baja representatif digunakan sebagai studi kasus. Struktur terdiri dari beberapa balok dan kolom yang menerima beban statis. Properti material ditentukan berdasarkan standar baja struktural. Kondisi batas mencakup tumpuan jepit pada dasar struktur dan pembebanan pada titik tertentu. Model didiskretisasi menjadi elemen hingga, dan proses optimasi diimplementasikan menggunakan kombinasi perangkat MATLAB dan Python. Variabel desain mencakup luas penampang dan parameter topologi. Batasan ditentukan sesuai spesifikasi Eurocode 3.

1. Perbandingan Desain Konvensional dan yang Dioptimalkan

Tabel 1. Perbandingan Desain Konvensional dan yang Dioptimalkan

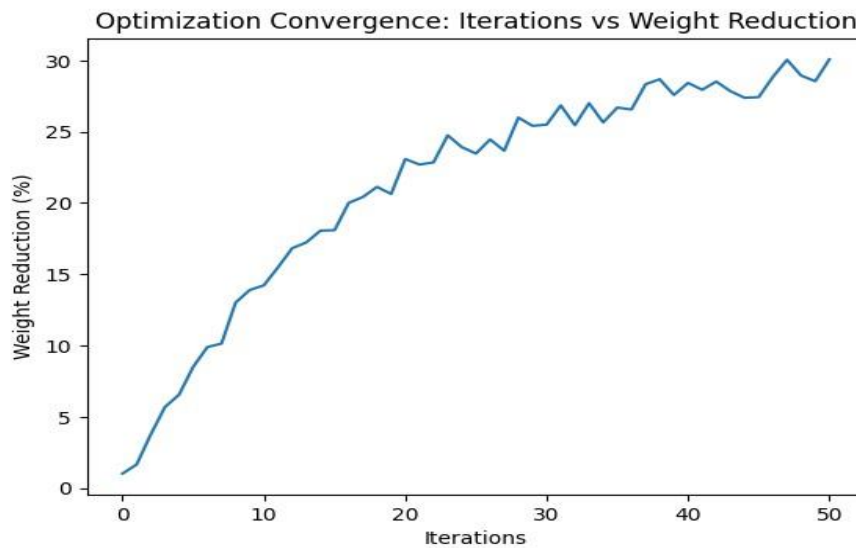
Parameter	Desain Konvensional	Desain Optimasi
Total Berat (kg)	12,500	8,900
Pengurangan Material (%)	-	28.8
Tegangan Maksimum (MPa)	220	235
Tegangan Izin (MPa)	250	250
Perpindahan Maksimum (mm)	12	14
Perpindahan Izin (mm)	20	20

HASIL DAN PEMBAHASAN

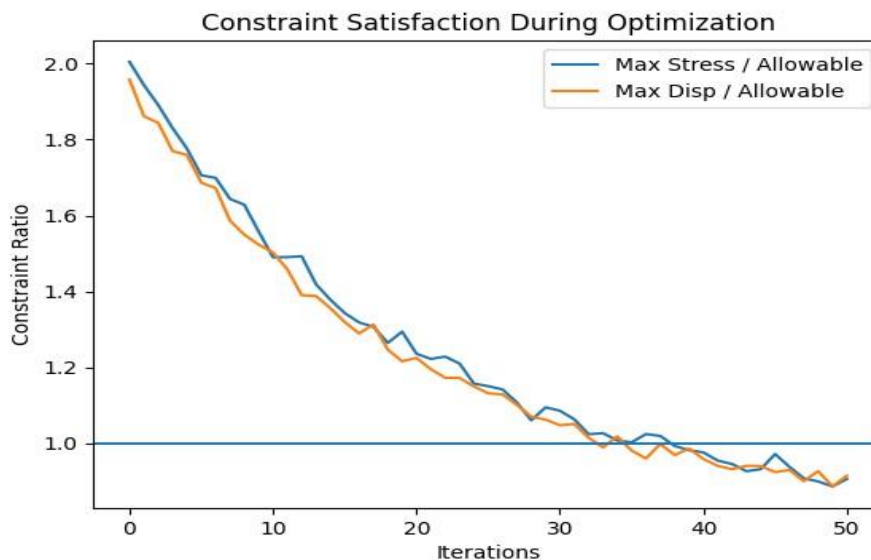
Proses optimasi menghasilkan pengurangan berat struktur yang signifikan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1. Desain hasil optimasi berhasil mencapai pengurangan material sekitar 28,8% dibandingkan desain konvensional.

Hasil optimasi tersebut dapat disimpulkan bahwa struktur aman dan tidak terganggu, ditandai dengan distribusi tegangan pada struktur hasil optimasi masih berada pada batas yang diperbolehkan. Meskipun terjadi sedikit peningkatan perpindahan, namun nilainya masih berada dalam batas yang dapat diterima.

Gambar 1 dan Gambar 2 menunjukkan konvergensi proses optimasi dan pemenuhan batasan selama iterasi berlangsung. Hasil tersebut menunjukkan efektivitas metodologi yang diusulkan.



Gambar 1. Konvergensi Optimasi: Iterasi vs Pengurangan Bobot



Gambar 2. Pemenuhan Batasan Selama Optimasi

Kurva konvergensi pada Gambar 1 menunjukkan peningkatan yang cepat pada iterasi awal, diikuti dengan stabilisasi bertahap ketika algoritma mendekati solusi optimal. Perilaku ini umum terjadi pada teknik optimasi evolusioner.

Gambar 2 menunjukkan bahwa batasan tegangan dan perpindahan secara progresif terpenuhi selama proses optimasi. Rasio batasan mendekati satu, yang menunjukkan pemanfaatan material secara efisien. Integrasi optimasi topologi dan algoritma genetika memungkinkan optimasi simultan terhadap distribusi material dan ukuran elemen struktur. Pendekatan hibrida ini memberikan keseimbangan antara eksplorasi global dan penyempurnaan lokal.

Dari perspektif praktis, penerapan teknik optimasi semacam ini dapat menghasilkan penghematan biaya yang substansial pada proyek konstruksi berskala besar. Selain itu, pengurangan penggunaan material berkontribusi terhadap penurunan emisi karbon dan peningkatan keberlanjutan.

Namun demikian, biaya komputasi yang terkait dengan metode ini dapat menjadi signifikan, terutama untuk struktur besar dan kompleks. Penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada peningkatan efisiensi komputasi dan integrasi teknik ini dengan sistem Building Information Modeling (BIM). Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa solusi optimal cukup robust terhadap variasi kecil dalam kondisi pembebanan dan properti material, sehingga mendukung penerapan pendekatan ini pada kondisi nyata.

Selain itu, studi parametrik terhadap ukuran populasi dan tingkat mutasi dalam algoritma genetika menunjukkan pengaruhnya terhadap kecepatan konvergensi dan kualitas solusi. Penyesuaian parameter yang tepat sangat penting untuk mencapai performa optimal. Penelitian ini juga menyoroti pentingnya teknik penanganan batasan untuk memastikan kelayakan solusi selama proses optimasi. Metode penalti dan normalisasi batasan digunakan untuk menjaga stabilitas numerik.

KESIMPULAN

Makalah ini menyajikan kerangka terintegrasi untuk optimasi desain struktur baja dengan fokus pada efisiensi material. Dengan menggabungkan optimasi topologi, algoritma genetika, dan analisis elemen hingga, pendekatan yang diusulkan berhasil mengurangi berat struktur sambil tetap memenuhi batasan desain. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penghematan material yang signifikan dapat dicapai tanpa mengorbankan keselamatan maupun performa struktur. Temuan ini memiliki implikasi penting terhadap pengurangan biaya dan keberlanjutan lingkungan dalam industri konstruksi. Penelitian selanjutnya akan difokuskan pada pengembangan metodologi untuk kondisi pembebanan dinamis, pengakomodasian ketidakpastian, dan integrasi teknik optimasi ke dalam alur kerja desain praktis.

Daftar Pustaka

- AISC Steel Construction Manual, American Institute of Steel Construction.
- Amon, R., Knobloch, B., & Mazumder, A. Steel Construction Design for Engineers and Architects, 1996
- Bendsoe, M.P., and Sigmund, O., Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications, Springer, 2003
- Cook, R.D., Malkus, D.S., and Plesha, M.E., Concepts and Applications of Finite Element Analysis, Wiley, 2002.
- Deb, K., Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms, Wiley, 2001.
- Edison Hatoguan Manurung, Dkk, Desain dan Analisis Struktur Rangka Baja, Penerbit Gama Bakti Wahana, 2024
- Edison H. Manurung. Manajemen Mutu. Penerbit Widina, 2023.
- Eurocode 3: Design of Steel Structures, European Committee for Standardization.



- Manurung, E. H., Hutagaol, K., & Putrafakhmi, D. Analisis Efisiensi Material Baja pada Struktur Rangka Atap pada Bangunan Komersial, 2025
- Rao, S.S., Engineering Optimization: Theory and Practice, Wiley, 2009.
- Salmon, C. G., & Johnson, J. E. Steel Structures: Design and Behavior. Jakarta: Erlangga, 1996.
- 11.