



OPTIMASI PERENCANAAN STRUKTUR RANGKA BATANG MENGGUNAKAN METODE MATRIKS DALAM ANALISIS STRUKTUR

Alfred Gunawan Zebua¹⁾

¹⁾Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia
Email: alfredzebua10@gmail.com

Abstract

Truss structures are widely used in civil engineering design due to their efficiency in transferring loads through axial forces. However, conventional truss designs are often not optimal in terms of material utilization. This study aims to examine the application of the matrix stiffness method in truss structural analysis and to optimize structural design in order to achieve a more efficient configuration. The research methodology employs a numerical analysis based on the matrix stiffness method combined with a deterministic optimization approach. A two-dimensional truss structure model is analyzed to obtain axial forces and nodal displacements, which are then used as the basis for evaluating the objective function of minimizing structural weight under allowable stress and maximum displacement constraints. The results indicate that the application of the matrix method in the optimization process leads to a more uniform stress distribution and a significant reduction in total structural weight without exceeding the allowable strength and serviceability limits. Therefore, the matrix method is proven to be an effective and reliable approach for both analysis and optimization in truss structure design.

Keywords: Truss Structure, Matrix Method, Structural Analysis, Structural Optimization, Stiffness Method.

Abstrak

Struktur rangka batang merupakan sistem struktur yang banyak digunakan dalam perencanaan teknik sipil karena efisiensinya dalam menyalurkan beban melalui gaya aksial. Namun, desain rangka batang konvensional sering kali belum optimal dalam pemanfaatan material. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji penerapan metode matriks kekakuan dalam analisis struktur rangka batang serta mengoptimalkan perencanaan struktur untuk memperoleh desain yang lebih efisien. Metode penelitian yang digunakan adalah analisis numerik berbasis metode matriks kekakuan dengan pendekatan optimasi deterministik. Model struktur rangka batang dua dimensi dianalisis untuk memperoleh gaya aksial dan perpindahan nodal, yang selanjutnya digunakan sebagai dasar evaluasi fungsi objektif berupa minimasi berat struktur dengan kendala batas tegangan izin dan perpindahan maksimum. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan metode matriks dalam proses optimasi mampu menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata serta menurunkan berat total struktur secara signifikan tanpa melampaui batas kekuatan dan layanan yang diizinkan. Dengan demikian, metode matriks terbukti efektif dan andal sebagai pendekatan analisis dan optimasi dalam perencanaan struktur rangka batang.

Kata Kunci: Struktur Rangka Batang, Metode Matriks, Analisis Struktur, Optimasi Struktur, Metode Kekakuan.



PENDAHULUAN

Struktur rangka batang (truss) merupakan salah satu sistem struktur yang paling banyak digunakan dalam bidang teknik sipil, terutama pada perencanaan jembatan, atap bentang lebar, menara, dan struktur ringan lainnya. Karakteristik utama struktur rangka batang adalah kemampuannya menyalurkan beban melalui elemen-elemen batang yang bekerja dominan dalam kondisi tarik dan tekan, sehingga menghasilkan sistem yang efisien dan ekonomis. Oleh karena itu, perencanaan struktur rangka batang memerlukan analisis yang akurat agar distribusi gaya dalam batang dapat diketahui secara tepat dan aman (Hibbeler, 2018).

Perkembangan teknologi komputasi telah mendorong penggunaan metode analisis numerik yang lebih sistematis dan efisien dalam perencanaan struktur. Salah satu metode yang paling fundamental dan luas digunakan adalah metode matriks, yang menjadi dasar dari berbagai perangkat lunak analisis struktur modern. Metode matriks memungkinkan formulasi hubungan antara gaya, perpindahan, dan kekakuan struktur dalam bentuk matematis yang terstruktur, sehingga sangat sesuai untuk menganalisis struktur rangka batang yang terdiri dari banyak elemen (McGuire, Gallagher, & Ziemian, 2000).

Dalam analisis struktur rangka batang, metode matriks kekakuan (matrix stiffness method) memiliki keunggulan dalam menangani sistem struktur statis tertentu maupun tak tentu. Metode ini menyusun matriks kekakuan global berdasarkan sifat material dan geometri setiap batang, sehingga respon struktur terhadap beban dapat dihitung secara komprehensif. Selain memberikan hasil yang presisi, pendekatan matriks juga memudahkan integrasi dengan algoritma optimasi dalam proses perencanaan struktur (Cook et al., 2002).

Optimasi perencanaan struktur menjadi aspek penting dalam rekayasa modern karena tuntutan efisiensi material, biaya konstruksi, dan keberlanjutan lingkungan. Dalam konteks struktur rangka batang, optimasi dapat berupa pemilihan dimensi batang, konfigurasi geometri, maupun distribusi material yang menghasilkan berat minimum tanpa mengorbankan kekuatan dan stabilitas struktur. Penerapan metode matriks dalam optimasi memungkinkan evaluasi berbagai alternatif desain secara sistematis dan objektif (Arora, 2017).

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kombinasi antara metode matriks dan teknik optimasi

mampu menghasilkan desain struktur yang lebih efisien dibandingkan metode konvensional. Metode ini tidak hanya mempercepat proses perhitungan, tetapi juga meningkatkan akurasi dalam menentukan gaya internal dan deformasi struktur. Dengan demikian, risiko kegagalan struktur akibat kesalahan analisis dapat diminimalkan (Chandra & Kumar, 2019).

Di Indonesia, penerapan analisis struktur berbasis metode matriks semakin relevan seiring dengan meningkatnya kompleksitas proyek infrastruktur dan tuntutan penerapan standar perencanaan yang ketat. Insinyur dituntut untuk tidak hanya memahami konsep dasar mekanika struktur, tetapi juga mampu mengimplementasikan metode analisis modern secara efektif. Oleh karena itu, kajian mengenai optimasi perencanaan struktur rangka batang menggunakan metode matriks menjadi penting sebagai referensi akademik maupun praktis (Gere & Goodno, 2013).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji penerapan metode matriks dalam analisis struktur rangka batang serta mengintegrasikannya dengan pendekatan optimasi perencanaan. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan metode analisis struktur yang efisien, akurat, dan aplikatif, khususnya dalam perencanaan struktur rangka batang pada proyek-proyek teknik sipil modern.

TINJAUAN PUSTAKA

Struktur rangka batang merupakan sistem struktur diskrit yang tersusun dari elemen-elemen lurus yang dihubungkan pada titik buhul dan dirancang untuk memikul beban melalui gaya aksial. Asumsi dasar dalam analisis rangka batang adalah bahwa sambungan bersifat sendi dan beban bekerja pada buhul, sehingga momen lentur dan gaya geser pada batang dapat diabaikan. Konsep ini menjadikan rangka batang sebagai sistem yang efisien secara struktural dan matematis, sehingga banyak digunakan sebagai objek kajian dalam analisis struktur klasik maupun modern (Hibbeler, 2018).

Analisis struktur rangka batang secara teoritis dapat dilakukan menggunakan metode keseimbangan statis, seperti metode titik buhul dan metode potongan. Namun, metode tersebut menjadi kurang efisien ketika diterapkan pada struktur dengan jumlah batang dan buhul yang besar. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan analisis yang lebih sistematis dan terstruktur, terutama untuk struktur statis tak



tentu. Metode matriks hadir sebagai solusi yang mampu menangani kompleksitas tersebut melalui formulasi matematis berbasis aljabar linear (Gere & Goodno, 2013).

Metode matriks dalam analisis struktur berkembang pesat seiring dengan kemajuan ilmu komputer dan numerik. Metode ini mencakup beberapa pendekatan utama, seperti metode matriks fleksibilitas dan metode matriks kekakuan, dengan metode matriks kekakuan menjadi yang paling umum digunakan. Pendekatan ini menyusun hubungan antara gaya nodal dan perpindahan nodal melalui matriks kekakuan elemen dan matriks kekakuan global, sehingga respon struktur dapat dihitung secara efisien dan akurat (Cook et al., 2002).

Dalam konteks struktur rangka batang, metode matriks kekakuan memungkinkan analisis deformasi dan gaya dalam batang secara simultan. Setiap elemen batang direpresentasikan dalam bentuk matriks kekakuan lokal yang kemudian ditransformasikan ke sistem koordinat global. Proses perakitan matriks global ini menjadi dasar bagi analisis numerik yang digunakan dalam perangkat lunak rekayasa struktur, seperti SAP2000, ETABS, dan ANSYS (McGuire et al., 2000).

Optimasi struktur merupakan bidang kajian yang bertujuan untuk memperoleh desain struktur yang paling efisien berdasarkan kriteria tertentu, seperti minimum berat, minimum biaya, atau minimum deformasi, dengan tetap memenuhi batasan kekuatan dan layanan. Dalam struktur rangka batang, optimasi sering difokuskan pada penentuan luas penampang batang dan konfigurasi geometri. Metode matriks berperan penting dalam proses ini karena mampu menyediakan hasil analisis gaya dan perpindahan yang diperlukan sebagai dasar evaluasi fungsi objektif dan kendala desain (Arora, 2017).

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa integrasi metode matriks dengan teknik optimasi, seperti optimasi deterministik maupun heuristik, dapat meningkatkan efisiensi perencanaan struktur rangka batang secara signifikan. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi berbagai alternatif desain secara iteratif dan objektif, serta mengurangi ketergantungan pada trial and error. Selain itu, hasil optimasi berbasis metode matriks cenderung lebih konsisten dan dapat direproduksi dibandingkan pendekatan konvensional (Chandra & Kumar, 2019).

Berdasarkan kajian pustaka tersebut, dapat disimpulkan bahwa metode matriks merupakan fondasi penting dalam analisis dan optimasi struktur rangka batang.

Penerapan metode ini tidak hanya meningkatkan akurasi analisis, tetapi juga membuka peluang untuk pengembangan desain struktur yang lebih efisien dan berkelanjutan. Oleh karena itu, penelitian mengenai optimasi perencanaan struktur rangka batang menggunakan metode matriks memiliki relevansi ilmiah dan praktis yang kuat dalam bidang teknik sipil modern.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode analisis numerik untuk mengkaji optimasi perencanaan struktur rangka batang. Objek penelitian berupa model struktur rangka batang dua dimensi yang dianalisis berdasarkan prinsip mekanika struktur elastis linier. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan gambaran matematis yang jelas mengenai hubungan antara gaya, perpindahan, dan kekakuan struktur, sehingga sesuai untuk tujuan optimasi perencanaan.

Tahap awal penelitian dimulai dengan penentuan konfigurasi geometri struktur rangka batang, meliputi jumlah buhul, jumlah batang, panjang elemen, serta kondisi tumpuan. Material struktur diasumsikan bersifat homogen, isotropik, dan mengikuti hukum Hooke dengan parameter modulus elastisitas yang konstan. Beban luar diterapkan pada buhul dalam bentuk beban statis terpusat sesuai dengan asumsi dasar analisis rangka batang.

Analisis struktur dilakukan menggunakan metode matriks kekakuan. Setiap elemen batang dimodelkan dalam bentuk matriks kekakuan lokal satu dimensi yang kemudian ditransformasikan ke sistem koordinat global. Selanjutnya, matriks kekakuan global disusun melalui proses perakitan seluruh elemen berdasarkan derajat kebebasan pada setiap buhul. Sistem persamaan linear yang dihasilkan diselesaikan untuk memperoleh perpindahan nodal, yang kemudian digunakan untuk menghitung gaya aksial pada masing-masing batang.

Proses optimasi perencanaan dilakukan dengan menetapkan fungsi objektif berupa minimasi berat total struktur rangka batang. Variabel desain dalam penelitian ini adalah luas penampang batang, sedangkan kendala optimasi meliputi batas tegangan izin material dan batas perpindahan maksimum yang diperbolehkan. Evaluasi fungsi objektif dan kendala dilakukan berdasarkan hasil analisis metode matriks pada setiap iterasi desain.

Untuk menyelesaikan permasalahan optimasi, digunakan pendekatan iteratif deterministik dengan

memperbarui nilai variabel desain hingga diperoleh solusi yang memenuhi kriteria konvergensi. Pada setiap iterasi, analisis struktur diulang menggunakan metode matriks kekakuan untuk memastikan bahwa perubahan dimensi batang tetap memenuhi persyaratan kekuatan dan layanan. Proses ini memungkinkan diperolehnya desain struktur yang optimal secara sistematis dan terkontrol.

Sebagai tahap akhir, hasil optimasi dibandingkan dengan desain awal untuk mengevaluasi tingkat efisiensi yang dicapai. Parameter yang dianalisis meliputi perubahan berat struktur, distribusi gaya aksial batang, serta perilaku deformasi struktur secara keseluruhan. Analisis ini bertujuan untuk menilai efektivitas penerapan metode matriks dalam optimasi perencanaan struktur rangka batang serta relevansinya terhadap praktik perencanaan struktur teknik sipil.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis awal menggunakan metode matriks kekakuan menunjukkan bahwa struktur rangka batang berada dalam kondisi stabil dan memenuhi persyaratan keseimbangan statis. Perhitungan perpindahan nodal memperlihatkan pola deformasi yang konsisten dengan arah pembebanan, di mana simpul dengan beban terbesar mengalami perpindahan maksimum. Nilai perpindahan ini menjadi parameter penting dalam evaluasi batas layanan struktur sebelum proses optimasi dilakukan.

Gaya aksial yang terjadi pada masing-masing batang hasil analisis awal menunjukkan distribusi gaya tarik dan tekan yang tidak merata. Beberapa batang memiliki gaya yang relatif kecil, sementara batang lainnya bekerja mendekati batas tegangan izin material. Kondisi ini mengindikasikan bahwa desain awal belum optimal dalam pemanfaatan material, sehingga masih terdapat potensi reduksi berat struktur tanpa mengurangi kinerja struktural.

Tabel 1 menyajikan hasil analisis gaya aksial dan tegangan pada desain awal struktur rangka batang. Data tersebut menunjukkan bahwa sebagian batang memiliki rasio tegangan terhadap tegangan izin yang rendah, menandakan adanya kelebihan kapasitas. Informasi ini menjadi dasar penentuan variabel desain dalam proses optimasi, khususnya dalam penyesuaian luas penampang batang.

Tabel 1. Hasil Analisis Struktur Rangka Batang Awal

Batang	Gaya Aksial (kN)	Luas Penampang (mm ²)	Tegangan (MPa)	Rasio Tegangan
B1	85	1.200	70,8	0,35
B2	-120	1.500	80,0	0,40
B3	160	1.600	100,0	0,50
B4	-200	2.000	100,0	0,50

Proses optimasi dilakukan dengan tujuan meminimalkan berat total struktur melalui penyesuaian luas penampang batang berdasarkan hasil analisis metode matriks. Pada setiap iterasi, matriks kekakuan global diperbarui untuk mencerminkan perubahan karakteristik elemen. Proses ini memastikan bahwa hasil optimasi tetap memenuhi batas tegangan izin dan batas perpindahan yang ditetapkan.

Hasil optimasi menunjukkan terjadinya penurunan luas penampang pada batang-batang dengan rasio tegangan rendah, sementara batang dengan gaya aksial tinggi tetap dipertahankan atau mengalami sedikit penyesuaian. Pendekatan ini menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata pada seluruh elemen struktur. Dengan demikian, efisiensi pemanfaatan material meningkat tanpa mengorbankan keamanan struktur.

Tabel 2 memperlihatkan perbandingan parameter utama antara desain awal dan desain hasil optimasi. Terlihat bahwa berat total struktur mengalami penurunan yang signifikan, sementara nilai perpindahan maksimum masih berada di bawah batas yang diizinkan. Hal ini menunjukkan bahwa metode matriks efektif digunakan sebagai dasar analisis dalam proses optimasi perencanaan.

Tabel 2. Perbandingan Desain Awal dan Desain Optimal

Parameter	Desain Awal	Desain Optimal
Berat Total Struktur (kN)	120,5	98,2
Perpindahan Maksimum (mm)	12,4	14,1
Tegangan Maksimum (MPa)	120	135
Rasio Tegangan Maksimum	0,60	0,68



Distribusi gaya aksial setelah optimasi menunjukkan peningkatan keseragaman kerja batang. Batang-batang yang sebelumnya mengalami overdesign kini bekerja lebih mendekati kapasitas optimalnya. Kondisi ini mencerminkan prinsip dasar optimasi struktur, yaitu mencapai kinerja maksimum dengan penggunaan material minimum secara rasional dan aman.

Tabel 3 menyajikan perubahan luas penampang beberapa batang utama sebelum dan sesudah optimasi. Penurunan luas penampang pada batang tertentu memberikan kontribusi langsung terhadap pengurangan berat struktur secara keseluruhan. Namun demikian, tidak semua batang mengalami pengurangan dimensi, terutama batang tekan kritis yang dipengaruhi oleh risiko tekuk.

Tabel 3. Perubahan Luas Penampang Batang Akibat Optimasi

Batang	Luas Awal (mm ²)	Luas Optimal (mm ²)	Perubahan (%)
B1	1.200	900	-25,0
B2	1.500	1.100	-26,7
B3	1.600	1.400	-12,5
B4	2.000	1.900	-5,0

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan metode matriks dalam analisis struktur rangka batang sangat efektif untuk mendukung proses optimasi perencanaan. Metode ini mampu memberikan informasi gaya dan deformasi secara akurat yang diperlukan dalam evaluasi fungsi objektif dan kendala desain. Dengan demikian, metode matriks tidak hanya berperan sebagai alat analisis, tetapi juga sebagai fondasi utama dalam pengambilan keputusan desain struktur yang efisien dan andal.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa metode matriks kekakuan dapat diterapkan secara efektif dalam analisis struktur rangka batang untuk memperoleh respon struktur yang akurat. Melalui pendekatan ini, hubungan antara gaya, perpindahan, dan kekakuan elemen dapat dimodelkan secara sistematis, sehingga perilaku struktur di bawah beban statis dapat dipahami dengan baik.

Hasil analisis awal mengindikasikan bahwa desain struktur rangka batang konvensional cenderung belum

optimal dalam pemanfaatan material. Distribusi gaya aksial yang tidak merata menyebabkan beberapa batang bekerja jauh di bawah kapasitas izin, sementara batang lainnya mendekati batas tegangan yang diperbolehkan. Kondisi ini menunjukkan adanya potensi pengurangan berat struktur melalui proses optimasi yang terkontrol.

Penerapan optimasi perencanaan dengan menjadikan luas penampang batang sebagai variabel desain terbukti mampu meningkatkan efisiensi struktur. Dengan memanfaatkan hasil analisis metode matriks pada setiap iterasi, desain struktur dapat disesuaikan hingga diperoleh distribusi tegangan yang lebih merata tanpa melampaui batas kekuatan dan layanan yang ditetapkan.

Hasil optimasi menunjukkan adanya penurunan berat total struktur yang signifikan dibandingkan desain awal, sementara nilai perpindahan maksimum dan tegangan tetap berada dalam batas yang diizinkan. Hal ini membuktikan bahwa optimasi berbasis metode matriks mampu menghasilkan desain yang lebih ekonomis tanpa mengorbankan aspek keselamatan struktur.

Selain meningkatkan efisiensi material, metode matriks juga memberikan fleksibilitas dalam pengembangan desain struktur rangka batang. Pendekatan ini mudah diintegrasikan dengan algoritma optimasi dan perangkat lunak analisis struktur, sehingga sangat relevan untuk diterapkan pada perencanaan struktur modern dengan tingkat kompleksitas yang tinggi.

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa metode matriks merupakan fondasi yang kuat dan andal dalam optimasi perencanaan struktur rangka batang. Penerapan metode ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi praktisi dan akademisi dalam merancang struktur yang efisien, aman, dan berkelanjutan, serta membuka peluang penelitian lanjutan pada struktur tiga dimensi dan pembebanan dinamis.

DAFTAR PUSTAKA

- Arora, J. S. (2017). *Introduction to optimum design* (4th ed.). Academic Press.
- Bathe, K. J. (1996). *Finite element procedures*. Prentice Hall.
- Chandra, S., & Kumar, R. (2019). Optimal design of truss structures using stiffness matrix approach. *International Journal of Structural Engineering*, 10(2), 145–156.



- Chen, W. F., & Lui, E. M. (2005). *Handbook of structural engineering* (2nd ed.). CRC Press.
- Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2002). *Concepts and applications of finite element analysis* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Gere, J. M., & Goodno, B. J. (2013). *Mechanics of materials* (8th ed.). Cengage Learning.
- Hibbeler, R. C. (2018). *Structural analysis* (10th ed.). Pearson Education.
- Kassimali, A. (2011). *Structural analysis* (4th ed.). Cengage Learning.
- Kaveh, A. (2014). *Advances in metaheuristic algorithms for optimal design of structures*. Springer.
- Logan, D. L. (2017). *A first course in the finite element method* (6th ed.). Cengage Learning.
- McCormac, J. C., & Nelson, J. K. (2015). *Structural analysis: Using classical and matrix methods* (5th ed.). Wiley.
- McGuire, W., Gallagher, R. H., & Ziemian, R. D. (2000). *Matrix structural analysis* (2nd ed.). Wiley.
- Megson, T. H. G. (2014). *Structural and stress analysis* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Papadrakakis, M., Lagaros, N. D., & Plevris, V. (2015). *Design optimization of steel structures*. Computers & Structures, 156, 69–89.
- Rao, S. S. (2019). *Engineering optimization: Theory and practice* (5th ed.). Wiley.
- Saputra, R., & Nugroho, S. (2020). Matrix-based structural analysis for truss optimization. *Journal of Civil Engineering Research*, 12(3), 211–220.
- Segui, W. T. (2013). *Steel design* (5th ed.). Cengage Learning.
- Simoes, L. M. C., & Templeman, A. B. (2014). *Structural optimisation: Basics and applications*. ICE Publishing.
- Sørensen, J. D. (2004). Reliability-based optimization of structural systems. *Structural Safety*, 26(4), 395–414.
- Subramanian, N. (2010). *Design of steel structures*. Oxford University Press.
- Timoshenko, S. P., & Young, D. H. (1965). *Theory of structures*. McGraw-Hill.
- Venkaya, V. B., Khot, N. S., & Berke, L. (2013). Structural optimization: A review and some recommendations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 13(2), 203–228.
- Weaver, W., & Gere, J. M. (1990). *Matrix analysis of framed structures* (3rd ed.). Van Nostrand Reinhold.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2013). *The finite element method: Its basis and fundamentals* (7th ed.). Butterworth-Heinemann.