



Contents lists available at [JESA](https://jesa.aks.or.id/index.php/jesa/index)

Journal of Engineering and Science Application

journal homepage: <https://jesa.aks.or.id/index.php/jesa/index>



Optimasi Jembatan Rangka Baja Bentang 40–60 m Menggunakan Particle Swarm Optimization Terintegrasi SAP2000 API dan Python

Akhmad Aminullah^a, Edison Hatoguan Manurung^b, Pio Ranap Tua Naibaho^c, Kodrat Satriawan^d

^aDepartment of Civil and Environmental Engineering Faculty of Engineering Universitas Gadjah Mada Jalan Grafika No. 2 Kampus UGM Yogyakarta 55281; Indonesian Society of Steel Construction (ISSC)

^bCivil Engineering Study Program, Faculty of Engineering, Mpu Tantular University, Jakarta; Indonesian Society of Steel Construction (ISSC)

^cMaster's Degree Program in Civil Engineering, Faculty of Engineering, Tama Jagakarsa University; Indonesian Society of Steel Construction (ISSC); Steel construction practitioner; Indonesian Society of Steel Construction (ISSC)

Article Info

Keywords:

Optimasi Struktur
Particle Swarm Optimization
SAP2000 API
Jembatan Rangka Baja
OpenSees

ABSTRACT

Optimasi jembatan rangka baja memerlukan pencarian desain yang ringan tanpa mengurangi kinerja struktur. Penelitian ini mengembangkan kerangka optimasi otomatis dengan mengintegrasikan Particle Swarm Optimization (PSO), Python, dan SAP2000 Application Programming Interface (API) untuk bentang 40, 50, dan 60 m. Variabel desain mencakup geometri, penampang, dan topologi, sedangkan fungsi objektif berupa minimisasi berat baja dengan batasan kinerja struktural. Validasi respons struktur dilakukan melalui perbandingan SAP2000 dan OpenSees. Hasil akhir menunjukkan berat bentang 40 m turun dari 69,50 menjadi 66,39 ton atau 4,47%. Konfigurasi deck truss komposit 50 m menghasilkan 56,57 ton, setara pengurangan 41,29% terhadap acuan 96,35 ton. Konfigurasi komposit 60 m menghasilkan 93,09 ton, setara pengurangan 26,94% terhadap acuan 127,42 ton. Temuan menunjukkan bahwa PSO efektif sebagai kerangka eksplorasi desain, sedangkan aksi komposit memberikan kontribusi terbesar pada efisiensi bentang menengah dan panjang. Ketersediaan profil baja dan berat sambungan tetap memerlukan verifikasi sebelum desain diterapkan sebagai rancangan final.

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



Corresponding Author:

Akhmad Aminullah
Department of Civil and Environmental Engineering Faculty of Engineering
Universitas Gadjah Mada
Jalan Grafika No. 2 Kampus UGM Yogyakarta 55281; Indonesian
Email: akhmadaminullah@ugm.ac.id

1. INTRODUCTION

Perkembangan komputasi teknik struktur memperluas penggunaan optimasi pada tahap perencanaan jembatan. Jembatan rangka baja menawarkan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, kemampuan fabrikasi modular, serta fleksibilitas geometri. Kompleksitas jumlah batang, variasi profil, posisi simpul, dan kombinasi pembebanan membuat proses pemilihan desain optimal sulit dilakukan hanya dengan iterasi manual.

Journal homepage: <https://jesa.aks.or.id>

Pendekatan optimasi modern mengubah proses tersebut menjadi pencarian terstruktur terhadap ruang solusi yang sangat besar.

Pemodelan konvensional menggunakan SAP2000 dapat memberikan hasil analisis yang rinci, tetapi pengulangan perubahan geometri dan profil membutuhkan waktu besar ketika setiap alternatif diperiksa secara manual. SAP2000 Application Programming Interface memungkinkan Python membuat geometri, mendefinisikan material, menerapkan pembebanan, menjalankan analisis, serta mengambil gaya dalam secara otomatis. Integrasi tersebut menjadi dasar pembentukan siklus optimasi yang dapat menguji ribuan model secara konsisten.

Particle Swarm Optimization memandang setiap kandidat desain sebagai partikel yang bergerak di ruang pencarian berdasarkan pengalaman terbaik partikel dan pengalaman terbaik populasi. Karakteristik tersebut sesuai untuk masalah jembatan rangka yang mempunyai variabel kontinu, diskrit, dan kombinasi keduanya. Literatur 2022–2026 menunjukkan pemanfaatan PSO serta metaheuristik lain untuk optimasi ukuran, bentuk, topologi, struktur baja skala besar, dan sistem jembatan komposit.

Data penelitian menggunakan tiga bentang utama, yaitu 40 m, 50 m, dan 60 m. Desain acuan Kementerian Pekerjaan Umum mempunyai berat baja masing-masing 69,50 ton, 96,35 ton, dan 127,42 ton. Proses optimasi mengevaluasi geometri, penampang, topologi, sistem komposit/nonkomposit, serta beberapa modifikasi through truss. Kerangka analisis juga memanfaatkan OpenSeesPy sebagai alat verifikasi independen dan FreeCAD untuk otomatisasi Building Information Modelling (BIM).

Kebutuhan penelitian terletak pada penyatuan proses pemodelan, analisis, optimasi, dan verifikasi dalam satu alur komputasi. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa efisiensi struktural tidak hanya dipengaruhi algoritma, tetapi juga pemilihan tipe sistem, batas geometri, ketersediaan profil, dan formulasi Batasan. Kajian pada data ini menguji sejauh mana kombinasi PSO dan otomatisasi SAP2000 dapat menghasilkan pengurangan berat yang terukur pada jembatan rangka baja dengan panjang bentang berbeda.

Masalah optimasi dibagi menjadi tiga kelompok utama. Size optimization memilih ukuran penampang dari katalog profil, shape optimization mengubah koordinat atau tinggi simpul, sedangkan topology optimization menentukan keberadaan dan keterhubungan elemen. Ketiga kelompok tersebut saling memengaruhi karena perubahan satu variabel dapat menggeser distribusi gaya pada variabel lain. Pendekatan gabungan pada laporan penelitian memberi ruang pencarian yang lebih luas daripada optimasi tunggal dan mengikuti arah perkembangan optimasi truss mutakhir [3]–[6], [14], [18].

Komputasi ribuan model menuntut struktur data dan urutan analisis yang konsisten. Setiap kandidat perlu dibangun dengan parameter yang sama, diberi kombinasi beban yang setara, dianalisis, dievaluasi DCR-nya, lalu diberi nilai objektif. Automasi API mengurangi risiko perbedaan input antarmodel yang sering muncul ketika modifikasi dilakukan manual. Penelitian struktur baja skala nyata juga menunjukkan manfaat algoritma metaheuristik pada ruang desain diskrit yang besar.

Pertanyaan penelitian difokuskan pada tiga aspek: kemampuan PSO menurunkan berat struktur dibanding desain acuan, pengaruh sistem komposit terhadap efisiensi pada bentang lebih panjang, dan konsistensi respons SAP2000 ketika diperiksa melalui OpenSees. Jawaban ketiga aspek tersebut dipakai untuk menilai kegunaan metode sebagai kerangka eksplorasi desain, bukan sebagai pengganti pemeriksaan teknik final.

Tujuan penelitian mencakup pengembangan alur optimasi otomatis berbasis SAP2000 API–Python, penerapan PSO untuk geometri/penampang/topologi, validasi respons model melalui OpenSees, evaluasi efisiensi material pada bentang 40–60 m, serta penilaian konfigurasi 50 m yang mempertimbangkan variasi sistem deck truss dan through truss.

Kontribusi penelitian berupa rekapitulasi kuantitatif hasil optimasi lintas bentang, pemisahan pengaruh aksi komposit dari pengaruh perubahan geometri, dokumentasi alur otomatisasi, dan identifikasi batas implementasi. Posisi PSO diperlakukan sebagai proof of concept ketika ketersediaan profil baja dan detail sambungan belum seluruhnya masuk ke fungsi objektif.

2. RESEARCH METHOD

Penelitian menggunakan pendekatan komputasi eksperimental berbasis pemodelan numerik. Model jembatan dibangun pada SAP2000, dikendalikan melalui Python, dan dioptimasi menggunakan PSO. OpenSeesPy digunakan untuk membandingkan respons analisis, sedangkan FreeCAD digunakan untuk membangun model BIM dan Quantity Take-Off pada tahap otomatisasi.

Kriteria desain mengikuti standar yang tercantum pada laporan penelitian, yaitu RSNI T-03-2005, AASHTO LRFD 2020, SNI 1725:2016, SNI 2833:2016, SNI 1729, AISC 360, dan Surat Edaran Bina Marga No. 06/SE/Db/2021. Pembebanan model mencakup berat sendiri, beban mati tambahan, beban lajur D, beban truk, gaya rem, temperatur, angin struktur, angin kendaraan, gempa, serta kombinasi beban. Gaya dalam hasil analisis digunakan untuk memeriksa kapasitas batang melalui demand-capacity ratio (DCR).

Berat sendiri dihitung dari elemen permanen model, sedangkan beban mati tambahan mewakili komponen nonstruktural yang tetap bekerja selama masa layan. Beban lalu lintas memakai beban lajur D dan beban truk, gaya rem mewakili aksi longitudinal kendaraan, sedangkan angin dan temperatur menambah respons yang tidak berasal dari gravitasi. Beban gempa dimasukkan melalui ketentuan respons spektrum yang digunakan pada laporan. Kombinasi beban membentuk amplop gaya yang dipakai dalam pemilihan profil.

Pemeriksaan kekuatan menggunakan gaya dalam hasil analisis dan kapasitas elemen untuk memperoleh DCR. Nilai DCR yang melewati batas membuat kandidat tidak layak atau menerima penalti pada fungsi objektif. Nilai yang terlalu rendah pada banyak elemen dapat menunjukkan penggunaan material yang belum efisien. Logika ini menghubungkan hasil analisis SAP2000 dengan proses pemutakhiran partikel PSO.

Variabel geometri meliputi tinggi jembatan pada simpul-simpul yang diizinkan. Variabel penampang memilih profil baja untuk chord, diagonal, stringer, diaphragm, dan bracing. Variabel topologi mengatur jumlah segmen, stringer, serta keberadaan batang yang dapat dikurangi apabila kontribusinya rendah. Fungsi objektif meminimalkan massa total elemen baja dengan penalti ketika batasan struktur tidak terpenuhi.

Ruang desain tidak hanya dibatasi oleh kapasitas batang. Tinggi rangka, pilihan profil GYS, jumlah segmen, dan konfigurasi deck ikut menentukan apakah solusi dapat diterapkan. Pembatasan tinggi maksimum 3 m pada salah satu studi 50 m memperlihatkan bahwa kendala geometri dapat meningkatkan kebutuhan baja secara signifikan. Model dengan tinggi maksimum 3 m mencapai 136,32 ton, jauh di atas desain komposit tanpa pembatasan tersebut.

PSO memutakhirkan posisi setiap partikel menggunakan kecepatan yang dipengaruhi bobot inersia, koefisien kognitif, koefisien sosial, personal best (pbest), dan global best (gbest). Setiap posisi partikel diterjemahkan menjadi kombinasi variabel desain pada model SAP2000. Nilai fungsi objektif diperoleh sesudah analisis struktur dan pemeriksaan batasan selesai.

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 r_1 [pbest_i - x_i(t)] + c_2 r_2 [gbest - x_i(t)]$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1)$$

Parameter ω mengontrol pengaruh kecepatan sebelumnya, c_1 mengatur kecenderungan partikel kembali ke solusi terbaik individual, c_2 mengatur kecenderungan partikel menuju solusi terbaik populasi, sedangkan r_1 dan r_2 merupakan bilangan acak. Formulasi ini memungkinkan eksplorasi ruang solusi sekaligus eksploitasi area yang sudah menunjukkan kinerja baik [1], [2], [7], [8].

Batasan optimasi mencakup kelayakan profil, rasio kapasitas, perpindahan, serta kondisi geometri yang telah ditetapkan. Kandidat yang melanggar batas tidak dipilih hanya karena mempunyai berat kecil. Penalti menambahkan konsekuensi numerik pada nilai objektif sehingga partikel diarahkan kembali ke ruang solusi layak. Prinsip penanganan batasan ini sejalan dengan metode metaheuristik terkini yang memisahkan kualitas objektif dari kelayakan desain [17], [18].

Nilai pbest menyimpan posisi terbaik yang pernah dicapai setiap partikel, sedangkan gbest menyimpan solusi terbaik populasi. Mekanisme tersebut menjaga memori pencarian sekaligus memungkinkan partikel mengeksplorasi kombinasi profil dan geometri baru. Jumlah evaluasi model menjadi indikator penting karena setiap

Tabel 1. Prosedur optimasi PSO pada model jembatan

Tahap	Operasi komputasi
1	Inisialisasi parameter PSO, posisi, dan kecepatan partikel.
2	Konversi posisi partikel menjadi geometri, profil, dan topologi SAP2000.
3	Eksekusi analisis struktur dan pengambilan respons melalui API.
4	Perhitungan berat, DCR, serta penalti pelanggaran batasan.
5	Pembaruan pbest dan gbest dari nilai objektif.
6	Pembaruan posisi dan kecepatan untuk iterasi berikutnya.
7	Penghentian saat jumlah iterasi/percobaan model selesai dan gbest akhir diperoleh.

Eksplorasi 40 m dilakukan secara bertahap melalui optimasi geometri, penampang, topologi, lalu optimasi gabungan. Masing-masing tahap awal mengevaluasi sekitar 2.000 model, sedangkan optimasi gabungan mengevaluasi 10.000 model. Konfigurasi deck truss 50 m dan 60 m juga menggunakan 10.000 model pada optimasi gabungan. Beberapa modifikasi through truss 50 m menggunakan 100 model setelah ruang desain dibatasi oleh keputusan praktis terkait tipe profil.

Tabel 2. Contoh skala evaluasi model pada rekapitulasi penelitian

Model	Tinggi truss	Percobaan model	Berat akhir (ton)
40 m, gabungan	5,69 m	10.000	66,39
50 m, deck truss komposit	5,40 m	10.000	56,57
60 m, deck truss komposit	7,20 m	10.000	93,09
50 m, through truss	6,20 m	10.000	102,07
50 m, profile thickening	6,50 m	100	105,71

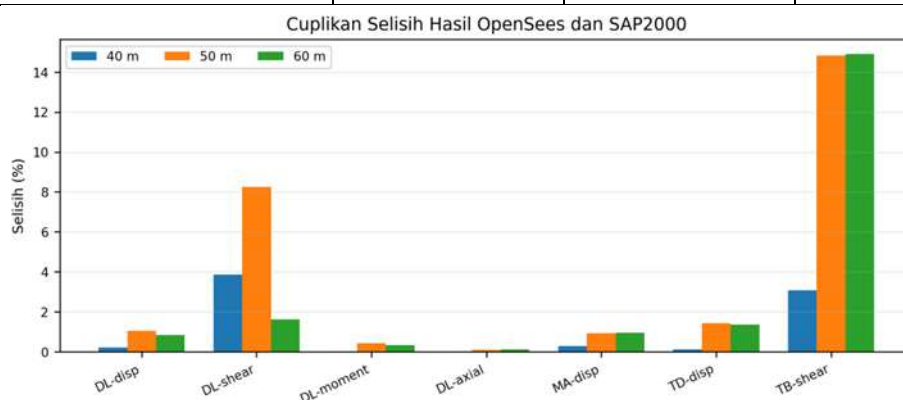
Python berfungsi sebagai pengelola utama alur iterasi. Script membentuk atau memodifikasi model, menjalankan solver SAP2000, mengambil hasil gaya dan perpindahan, menghitung indikator kelayakan, lalu mengirim nilai objektif kembali ke algoritma PSO. Siklus tersebut diulang tanpa interaksi manual sampai kriteria penghentian tercapai.

Pemakaian API juga mendukung reproduibilitas karena aturan pembentukan model dapat disimpan dalam kode. Kesalahan input manual dapat dikurangi selama parameter, satuan, dan urutan perintah sudah diverifikasi. Pemeriksaan model awal tetap diperlukan sebelum loop optimasi dijalankan dalam jumlah besar.

Validasi dilakukan dengan membandingkan keluaran OpenSees dan SAP2000 pada bentang 40 m, 50 m, dan 60 m untuk beberapa jenis beban. Parameter perbandingan mencakup perpindahan, gaya geser, momen, dan gaya aksial. Cuplikan data menunjukkan selisih kecil pada banyak parameter beban mati dan beban mati tambahan, sedangkan beberapa parameter gaya rem menunjukkan selisih lebih besar. Hasil tersebut digunakan sebagai pemeriksaan konsistensi model, bukan sebagai pengganti verifikasi desain rinci.

Tabel 3. Cuplikan persentase selisih OpenSees terhadap SAP2000

Parameter	40 m (%)	50 m (%)	60 m (%)
DL - displacement	0,22	1,04	0,83
DL - shear	3,86	8,24	1,63
DL - moment	0,03	0,43	0,34
DL - axial	0,03	0,09	0,11
MA - displacement	0,28	0,94	0,96
TD - displacement	0,11	1,44	1,35
TB - shear	3,07	14,83	14,89



Gambar 2. Visualisasi cuplikan selisih hasil OpenSees dan SAP2000

Sumber: data penelitian, 2026.

Selisih validasi perlu dibaca menurut jenis respons. Deviasi perpindahan dan momen pada cuplikan beban mati berada pada tingkat rendah, sedangkan respons geser pada gaya rem 50 m dan 60 m mencapai sekitar 14,8%. Pola tersebut mengindikasikan bahwa kesetaraan model untuk aksi tertentu masih perlu diperiksa lebih rinci. Penyebab yang dapat diuji pada pekerjaan lanjutan mencakup orientasi elemen, distribusi beban nodal, boundary condition, serta definisi kekakuan elemen.

Tujuan penggunaan OpenSees pada penelitian adalah verifikasi independen terhadap hasil SAP2000. Kesamaan tren pada sebagian besar respons memberikan dukungan terhadap kerangka otomatisasi, tetapi angka deviasi yang lebih tinggi tidak boleh diabaikan. Tahap validasi menjadi bagian penting sebelum hasil optimasi diterapkan pada keputusan desain.

Perhitungan sambungan baut memakai elastic bolt group method. Gaya geser langsung, gaya aksial langsung, dan tarik akibat momen didistribusikan ke baut sesuai posisi terhadap titik referensi. Pemeriksaan meliputi kapasitas geser, tarik, interaksi tarik–geser, bearing, jarak antar baut, dan jarak tepi. Algoritma menelusuri ukuran baut dan konfigurasi dua atau empat kolom untuk mencari susunan layak dengan rasio interaksi efisien.

Pemodelan BIM memakai FreeCAD untuk merepresentasikan geometri teroptimasi dalam bentuk tiga dimensi. Program dapat menerima dimensi dari hasil analisis, membangun komponen truss, sambungan, stringer, lateral bracing, dan menghasilkan Quantity Take-Off. Integrasi semacam ini sejalan dengan perkembangan otomatisasi analisis berbasis Python dan pemanfaatan model numerik terbuka untuk optimasi struktur [21].

3. RESULTS AND DISCUSSION

Optimasi Bentang 40 m

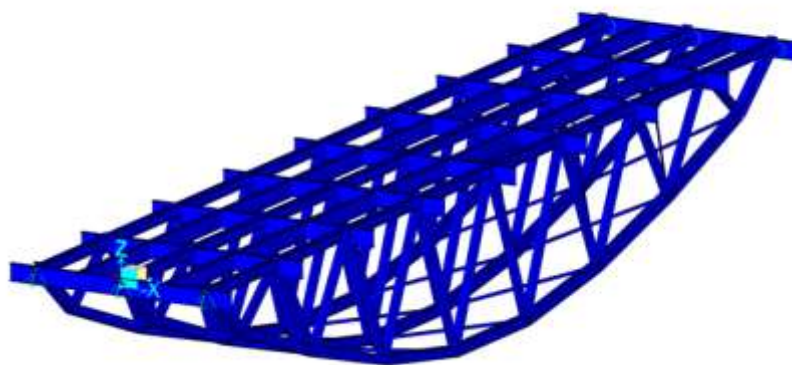
Desain acuan PU bentang 40 m mempunyai berat 69,50 ton. Optimasi geometri menghasilkan 82,47 ton, optimasi penampang menghasilkan 71,58 ton, dan optimasi topologi menghasilkan 73,32 ton. Optimasi gabungan menghasilkan 66,39 ton. Nilai akhir memberikan pengurangan 3,11 ton atau sekitar 4,47% terhadap desain acuan.

Tabel 4. Perbandingan tahap optimasi jembatan bentang 40 m

Komponen	PU (ton)	Geometri	Penampang	Topologi	Final
Outer truss	31,12	27,29	23,88	22,05	21,77
Inner truss	–	13,13	11,42	10,50	10,89
Deck	34,70	40,45	34,67	39,25	32,15
Bracing	3,68	1,60	1,60	1,52	1,58
Total	69,50	82,47	71,58	73,32	66,39



Hasil per tahap menunjukkan bahwa optimasi parsial tidak selalu langsung menurunkan berat di bawah desain acuan. Perubahan geometri menambah inner truss dan mengubah distribusi material sehingga berat sementara meningkat. Kombinasi geometri, penampang, dan topologi memberi ruang bagi algoritma untuk mengoreksi interaksi antarkomponen. Pola ini mendukung temuan penelitian optimasi truss bahwa desain ringan sering memerlukan pencarian simultan beberapa kelompok variabel, bukan perubahan satu variabel secara terpisah [3], [5], [6], [18].



Gambar 4. Visualisasi 3D hasil optimasi akhir jembatan bentang 40 m
Sumber: gambar model pada laporan penelitian, 2026.

Optimasi Bentang 50 m

Desain acuan PU bentang 50 m mempunyai berat 96,35 ton dengan sistem nonkomposit. Delapan konfigurasi pada rekapitulasi penelitian menunjukkan rentang berat yang lebar. Deck truss komposit menjadi konfigurasi paling ringan dengan 56,57 ton. Nilai tersebut memberikan efisiensi sekitar 41,29% terhadap acuan. Deck truss nonkomposit menghasilkan 98,71 ton, sedangkan through truss dasar menghasilkan 102,07 ton.

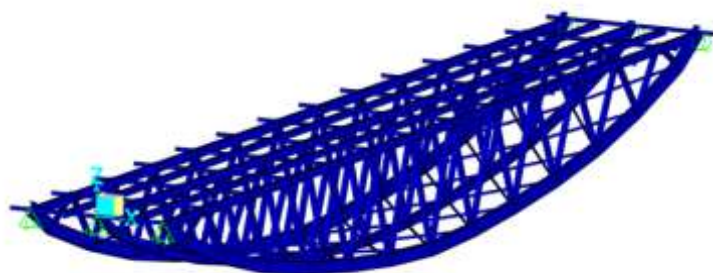
Tabel 6. Perbandingan konfigurasi jembatan bentang 50 m

Konfigurasi	Sistem	Berat (ton)	Perubahan vs PU
PU	Nonkomposit	96,35	0,00%
Deck truss	Komposit	56,57	-41,29%
Deck truss	Nonkomposit	98,71	+2,45%
Through truss	Nonkomposit	102,07	+5,94%
Deck truss, tinggi maks. 3 m	Nonkomposit	136,32	+41,48%
Compound profile	Nonkomposit	124,28	+28,99%
King Cross	Nonkomposit	121,16	+25,75%
Kurva negatif	Nonkomposit	123,41	+28,10%



Gambar 5. Berat berbagai konfigurasi jembatan bentang 50 m
Sumber: data penelitian, 2026.

Perbandingan memperlihatkan bahwa aksi komposit menjadi faktor dominan pada kasus 50 m. Modifikasi geometri nonkomposit tidak mampu mengalahkan berat through truss dasar. King Cross merupakan variasi geometri through truss yang paling ringan di antara variasi modifikasi, tetapi berat 121,16 ton masih lebih tinggi dari 102,07 ton pada through truss tanpa modifikasi. Hasil ini konsisten dengan penelitian jembatan komposit yang menunjukkan pentingnya interaksi material dan pemilihan konfigurasi sistem dalam optimasi [10], [19], [20].



Gambar 6. Visualisasi 3D deck truss komposit bentang 50 m

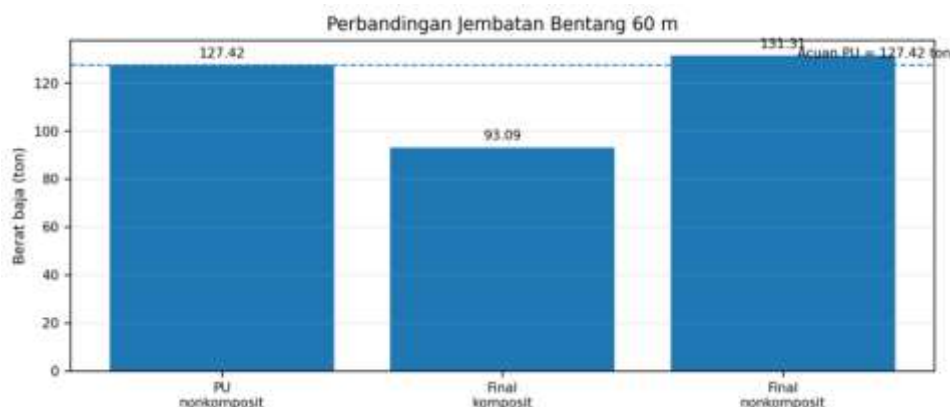
Sumber: gambar model pada laporan penelitian, 2026.

Optimasi Bentang 60 m

Desain acuan PU bentang 60 m mempunyai berat 127,42 ton. Rekapitulasi akhir penelitian mencatat konfigurasi komposit sebesar 93,09 ton dan konfigurasi nonkomposit sebesar 131,31 ton. Konfigurasi komposit menghasilkan pengurangan 34,33 ton atau sekitar 26,94%, sedangkan konfigurasi nonkomposit lebih berat 3,89 ton atau sekitar 3,05% dibanding acuan.

Tabel 7. Perbandingan desain bentang 60 m pada rekapitulasi akhir

Konfigurasi	Sistem	Outer truss	Inner truss	Deck	Bracing	Total
PU	Nonkomposit	70,87	—	51,15	5,40	127,42
Final	Komposit	33,17	15,84	22,62	2,72	93,09
Final	Nonkomposit	40,61	19,54	68,46	2,71	131,31

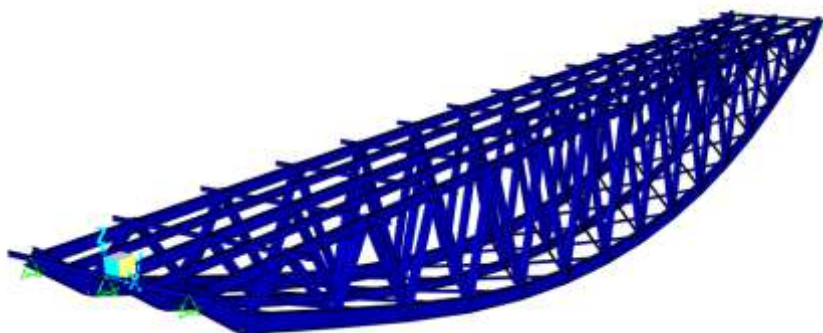


Gambar 7. Perbandingan berat desain bentang 60 m

Sumber: data penelitian, 2026.

Rekapitulasi akhir dipakai sebagai dasar pembahasan karena bagian lain pada laporan memuat angka intermediate yang berbeda untuk model komposit 60 m. Perbedaan tersebut menunjukkan kebutuhan pengendalian versi data pada penelitian komputasi. Nilai 93,09 ton dipertahankan pada artikel ini karena angka tersebut konsisten pada tabel perbandingan, rekapitulasi seluruh model, dan bagian kesimpulan laporan.

Efisiensi konfigurasi komposit memperlihatkan pengaruh sistem struktur terhadap kebutuhan baja. Kecenderungan serupa ditemukan pada kajian struktur komposit dan optimasi berbasis metaheuristik yang menekankan hubungan antara konfigurasi, batas layanan, dan penggunaan material [10], [19], [20]. Konfigurasi nonkomposit tidak otomatis menjadi lebih ringan hanya karena geometri telah dioptimasi.



Gambar 8. Visualisasi 3D deck truss komposit bentang 60 m

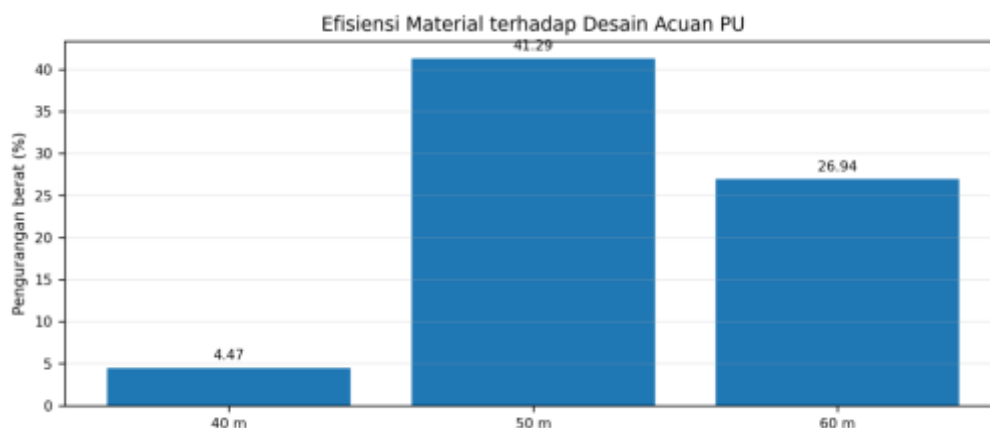
Sumber: gambar model pada laporan penelitian, 2026.

Perbandingan Efisiensi Lintas Bentang

Perbandingan lintas bentang menunjukkan tiga tingkat efisiensi yang berbeda. Bentang 40 m menghasilkan pengurangan 4,47% melalui optimasi gabungan nonkomposit. Bentang 50 m menghasilkan pengurangan 41,29% ketika sistem komposit digunakan. Bentang 60 m menghasilkan pengurangan 26,94% pada sistem komposit. Variasi tersebut menunjukkan bahwa persentase efisiensi tidak dapat dikaitkan hanya dengan panjang bentang atau algoritma PSO.

Tabel 8. Efisiensi material desain terpilih terhadap acuan PU

Bentang	Acuan PU (ton)	Desain terpilih (ton)	Pengurangan (ton)	Efisiensi
40 m	69,50	66,39	3,11	4,47%
50 m	96,35	56,57	39,78	41,29%
60 m	127,42	93,09	34,33	26,94%



Gambar 9. Persentase pengurangan berat pada desain terpilih

Sumber: data penelitian, 2026.

Interpretasi Pengaruh Variabel Desain

Optimasi geometri mengubah jalur gaya dan panjang batang. Optimasi penampang menyesuaikan kapasitas setiap kelompok elemen terhadap tuntutan gaya. Optimasi topologi mengurangi elemen atau segmen yang kontribusinya rendah selama batas kekuatan dan layanan tetap terpenuhi. Kombinasi ketiga variabel memperbesar dimensi ruang pencarian, tetapi juga membuka peluang menemukan desain yang tidak dapat dicapai melalui optimasi satu tahap [3], [5], [6].

Literatur terbaru memperlihatkan arah serupa melalui pendekatan discrete sizing, layout optimization, machine-learning surrogate, k-nearest neighbor comparison, dan multi-objective metaheuristics [3]–[9], [14], [17], [18]. Kerangka penelitian ini mempertahankan analisis struktur pada SAP2000 di setiap evaluasi kandidat sehingga fungsi objektif tetap bergantung pada respons model aktual yang dihasilkan perangkat lunak analisis.

Pengaruh Sistem Komposit

Aksi komposit pada bentang 50 m dan 60 m memberi penurunan berat yang jauh lebih besar daripada optimasi nonkomposit pada data penelitian. Deck dan elemen rangka dapat berbagi peran secara lebih efisien ketika sistem komposit dimodelkan. Keuntungan tersebut perlu dibaca bersama kebutuhan detailing, konektor geser, tahapan konstruksi, dan evaluasi layanan. Penelitian optimasi jembatan komposit 2022–2026 juga menempatkan biaya, emisi, deformasi, dan batas layanan sebagai faktor yang saling berinteraksi [10], [19], [20], [23].

Efisiensi Komputasi dan Jumlah Model

Optimasi gabungan pada model utama mengevaluasi hingga 10.000 kandidat untuk satu konfigurasi. Jumlah tersebut menjelaskan alasan otomatisasi menjadi komponen utama penelitian. Pengurangan waktu satu evaluasi akan terakumulasi menjadi penghematan komputasi besar pada keseluruhan proses. Penelitian terbaru juga mengembangkan surrogate model, k-NN comparison, dan strategi analisis cepat untuk menekan jumlah evaluasi struktur yang mahal [7], [9], [15], [21].

Efisiensi komputasi tetap harus dipisahkan dari efisiensi material. Algoritma yang cepat belum tentu menghasilkan struktur paling ringan, sedangkan desain paling ringan belum tentu paling mudah difabrikasi. Penilaian akhir perlu mempertimbangkan kualitas solusi, jumlah analisis, ketersediaan profil, dan kebutuhan detailing secara bersamaan.

Evaluasi Alternatif Through Truss Bentang 50 m

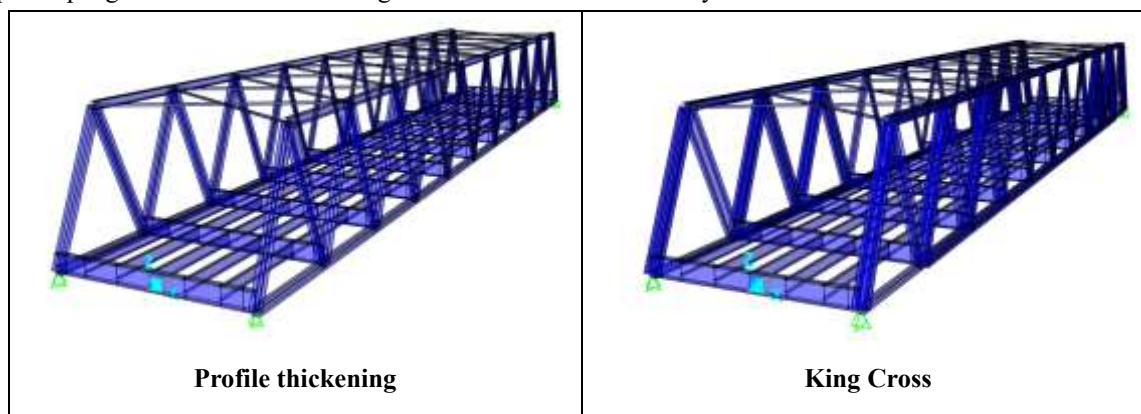
Evaluasi praktis pada bentang 50 m mempertimbangkan ketersediaan GYS section, pengurangan built-up section, penerimaan terhadap tipe deck truss yang tidak umum, serta pembatasan penyimpangan bentuk dari span through bridge konvensional. Pertimbangan tersebut menghasilkan beberapa alternatif yang lebih realistis untuk diskusi desain meskipun beratnya belum mengungguli acuan PU.

Tabel 9. Alternatif through truss 50 m setelah pertimbangan praktis

Alternatif	Berat truss	Deck	Bracing	Total (ton)	Catatan
PU	48,88	42,93	4,54	96,35	Acuan
Profile thickening	62,95	40,96	1,80	105,71	Web thickening
Compound profile	69,95	52,54	1,80	124,28	Profil majemuk

Alternatif	Berat truss	Deck	Bracing	Total (ton)	Catatan
King Cross	66,82	52,54	1,80	121,16	Sambungan lebih sulit
Kurva negatif	70,47	52,54	0,40	123,41	Geometri khusus

Berat sambungan baut belum dihitung pada rekapitulasi alternatif tersebut. Nilai total masih merepresentasikan berat penampang baja utama. Konsekuensi ini penting karena alternatif dengan geometri lebih kompleks dapat memerlukan plat sambung, baut, pengaku, dan detailing lebih banyak. Efisiensi tonase penampang belum tentu identik dengan efisiensi fabrikasi atau biaya total.



Gambar 10. Contoh visualisasi alternatif through truss bentang 50 m

Sumber: gambar model pada laporan penelitian, 2026.

Aspek Konstruktibilitas dan Sambungan

Konstruktibilitas perlu dimasukkan pada tahap pengembangan berikutnya melalui batas jumlah tipe profil, batas jumlah sambungan, berat plat, berat baut, serta kemudahan fabrikasi. Studi layout optimization terbaru menunjukkan bahwa pengurangan jumlah tipe batang dapat menurunkan kompleksitas manufaktur walaupun solusi dengan berat minimum teoritis belum tentu menjadi solusi paling sederhana [5]. Optimasi jembatan perlu menyeimbangkan massa, ketersediaan material, detailing, dan kebutuhan pelaksanaan.

Implikasi Optimasi Sambungan

Program sambungan memulai pencarian dari ukuran baut yang layak lalu mengevaluasi susunan dua dan empat kolom dengan jumlah baut yang meningkat. Posisi baut dibatasi agar tidak bertabrakan dengan web dan flange profil. Kandidat yang lolos pemeriksaan kapasitas dan geometri dibandingkan melalui rasio interaksi untuk memilih susunan yang efisien.

Kebutuhan sambungan dapat mengubah urutan preferensi antaralternatif. Model King Cross, misalnya, dicatat mempunyai detail sambungan yang lebih sulit. Berat struktur utama 121,16 ton belum memasukkan konsekuensi tambahan berupa plat, baut, dan pengaku. Evaluasi lanjutan perlu memasukkan komponen tersebut ke Quantity Take-Off agar perbandingan desain mencerminkan kebutuhan material secara lebih lengkap.

4. CONCLUSION

Integrasi SAP2000 API dan Python berhasil membentuk alur pemodelan serta analisis otomatis yang sesuai untuk evaluasi ribuan kandidat struktur. PSO mampu menangani optimasi geometri, penampang, dan topologi secara terintegrasi. Desain 40 m turun dari 69,50 menjadi 66,39 ton dengan efisiensi 4,47%. Deck truss komposit 50 m turun dari 96,35 menjadi 56,57 ton dengan efisiensi 41,29%. Deck truss komposit 60 m turun dari 127,42 menjadi 93,09 ton dengan efisiensi 26,94%. Aksi komposit menjadi faktor paling berpengaruh pada efisiensi material untuk bentang 50 m dan 60 m pada data penelitian. Alternatif through truss 50 m yang mempertimbangkan keterbatasan profil masih mempunyai berat di atas desain acuan. Implementasi desain final memerlukan verifikasi ketersediaan profil, berat sambungan, detail konstruksi, konsistensi model SAP2000–OpenSees, serta fungsi objektif tambahan seperti biaya dan emisi.

REFERENCES

- [1] L. Wang, R. Xi, X. Guo, and Y. Ma, "The Structural Design and Optimization of Top-Stiffened Double-Layer Steel Truss Bridges Based on the Response Surface Method and Particle Swarm Optimization," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 19, 11033, 2023. doi: 10.3390/app131911033.
- [2] T. H. Van, S. Tangaramvong, S. Limkatanyu, and H. Nguyen Xuan, "Two-phase ESO and comprehensive learning PSO method for

- structural optimization with discrete steel sections,” *Advances in Engineering Software*, vol. 167, 103102, 2022. doi: 10.1016/j.advengsoft.2022.103102.
- [3] J. Brütting, G. Senatore, and C. Fivet, “MILP-based discrete sizing and topology optimization of truss structures: new formulation and benchmarking,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 65, 277, 2022. doi: 10.1007/s00158-022-03325-7.
- [4] H. E. Fairclough, M. Gilbert, and A. Tyas, “Layout optimization of structures with distributed self-weight, lumped masses and frictional supports,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 65, 65, 2022. doi: 10.1007/s00158-021-03139-z.
- [5] H. Lu and Y. M. Xie, “Reducing the number of different members in truss layout optimization,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 66, 52, 2023. doi: 10.1007/s00158-023-03514-y.
- [6] J. Zhou, Y. Zeng, and G. Li, “Size, shape and topology optimization of truss structure via the finite particle method,” *Computers & Structures*, vol. 305, 107570, 2024. doi: 10.1016/j.compstruc.2024.107570.
- [7] N. Nourian, M. El-Badry, and M. Jamshidi, “Design Optimization of Truss Structures Using a Graph Neural Network-Based Surrogate Model,” *Algorithms*, vol. 16, no. 8, 380, 2023. doi: 10.3390/a16080380.
- [8] E. Yilmaz, M. Artar, and M. Ergün, “Investigation of notch effect in the optimum weight design of steel truss towers via Particle Swarm Optimization and Firefly Algorithm,” *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, vol. 19, pp. 358–377, 2025. doi: 10.1007/s11709-025-1160-0.
- [9] M.-C. Nguyen, H.-A. Pham, and V.-H. Truong, “An efficient multi-objective algorithm based on Rao and differential evolution for solving bi-objective truss optimization,” *Engineering Optimization*, pp. 97–127, published online 2025. doi: 10.1080/0305215X.2025.2463976.
- [10] C. G. M. Silva, A. F. G. Calenzani, C. C. R. de Oliveira, and É. C. Alves, “Sustainable optimum design of trussed composite floors considering vibrations constraints,” *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 11, 189, 2026. doi: 10.1007/s41062-026-02536-x.
- [11] M. Keleş, M. Artar, and M. Ergün, “Investigation of temperature effect on the optimal weight design of steel truss bridges using Cuckoo Search Algorithm,” *Structures*, vol. 59, 105819, 2024. doi: 10.1016/j.istruc.2023.105819.
- [12] A. Y. Aydoğdu, M. Artar, and M. Ergün, “Optimum weight design of steel truss roof systems considering corrosion effect,” *Structures*, vol. 49, pp. 88–105, 2023. doi: 10.1016/j.istruc.2023.01.099.
- [13] M. Artar and S. Carbas, “Optimizing the seismic resilience performance of steel truss bridges by maximum energy dissipation via friction dampers,” *Structures*, vol. 58, 105508, 2023. doi: 10.1016/j.istruc.2023.105508.
- [14] H. T. Öztürk and H. T. Kahraman, “Meta-heuristic search algorithms in truss optimization: Research on stability and complexity analyses,” *Applied Soft Computing*, vol. 145, 110573, 2023. doi: 10.1016/j.asoc.2023.110573.
- [15] A. Kaveh and A. Shabani Rad, “Metaheuristic-based optimal design of truss structures using algebraic force method,” *Structures*, vol. 50, pp. 1951–1964, 2023. doi: 10.1016/j.istruc.2023.02.123.
- [16] T. Vu-Huu, S. Pham Van, Q. H. Pham, and L. T. Cuong, “An improved bat algorithms for optimization design of truss structures,” *Structures*, vol. 47, pp. 2240–2258, 2023. doi: 10.1016/j.istruc.2022.12.033.
- [17] N. Panagant, S. Kumar, G. G. Tejani, N. Pholdee, and S. Bureerat, “Many-objective meta-heuristic methods for solving constrained truss optimisation problems: A comparative analysis,” *MethodsX*, vol. 10, 102181, 2023. doi: 10.1016/j.mex.2023.102181.
- [18] H. Cao, W. Sun, Y. Chen, F. Kong, and L. Feng, “Sizing and shape optimization of truss employing a hybrid constraint-handling technique and manta ray foraging optimization,” *Expert Systems with Applications*, vol. 213, 118999, 2023. doi: 10.1016/j.eswa.2022.118999.
- [19] D. Martínez-Muñoz, J. García, J. V. Martí, and V. Yepes, “Optimal design of steel–concrete composite bridge based on a transfer function discrete swarm intelligence algorithm,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 65, 312, 2022. doi: 10.1007/s00158-022-03393-9.
- [20] D. Martínez-Muñoz, J. A. Garcia, J. V. Martí, and V. Yepes, “Discrete swarm intelligence optimization algorithms applied to steel–concrete composite bridges,” *Engineering Structures*, vol. 266, 114607, 2022. doi: 10.1016/j.engstruct.2022.114607.
- [21] D. Llanos and R. M. Delgadillo, “Linear Seismic Analysis and Structural Optimization of Reinforced Concrete Frames Using OpenSeesPy,” *Buildings*, vol. 15, no. 23, 4388, 2025. doi: 10.3390/buildings15234388.
- [22] I. Aydogdu, T. O. Ormecioglu, O. Tunca, and S. Carbas, “Design of large-scale real-size steel structures using various modified grasshopper optimization algorithms,” *Neural Computing and Applications*, vol. 34, pp. 13825–13848, 2022. doi: 10.1007/s00521-022-07196-3.
- [23] R. Li, J. Wang, J. Xiao, and Y. Gong, “Optimization of Design Parameters of Through CFST Truss Bridges Based on RSM,” in *ICHCE and ESI 2025*, pp. 499–509, 2026. doi: 10.1061/9780784486788.045.