

STUDI PERKUATAN JEMBATAN RANGKA TIPE K DENGAN PEMANFAATAN KABEL PRATEGANG EKSTERNAL

Jack Widjajakusuma*, Kevin A. Wibowo, Aazokhi Waruwu, Joshua M. Sondakh

Prodi Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan, Tangerang

e-mail: jack.widjajakusuma@uph.edu

ABSTRAK

Banyak jembatan rangka di Indonesia yang telah berfungsi selama lebih dari lima puluh tahun, mengalami kerusakan akibat usia yang semakin tua dan bertambahnya volume kendaraan. Agar dapat menghindari terjadinya kegagalan pada struktur, rehabilitasi atau peningkatan kapasitas jembatan adalah hal yang sangat penting. Salah satu metode yang efisien dan ekonomis untuk tujuan ini adalah penerapan kabel prategang eksternal, yang dapat diatur dalam konfigurasi lurus, segitiga, atau trapesium. Artikel ini menganalisis pengaturan terbaik untuk memperbesar kapasitas jembatan tipe K satu bentang dengan panjang 48 m dan tinggi 9 m. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaturan kabel jembatan tipe K adalah yang paling efisien, dengan penggunaan kabel prategang berbentuk trapesium dengan tinggi tendon antara 1,2 m hingga 2 m. Sementara perkuatan dengan tendon garis lurus tidak efektif untuk merehabilitasi jembatan tipe K yang telah mengalami penurunan kapasitas beban yang signifikan sebesar 50%. **Kata kunci:** frekuensi alami, perkuatan jembatan, kabel prategang eksternal, jembatan tipe K

1. PENDAHULUAN

Di Indonesia terdapat banyak jembatan rangka, dan setengah di antaranya telah beroperasi selama lebih dari tujuh puluh tahun. Saat ini, jembatan-jembatan tersebut mengalami penurunan kualitas yang cukup besar akibat penuaan dan bertambahnya beban kendaraan. Peningkatan beban ini terutama disebabkan oleh adanya peningkatan volume lalu lintas yang terjadi akibat urbanisasi dan pertumbuhan ekonomi, yang mengakibatkan lonjakan jumlah kendaraan pribadi dan komersial yang memanfaatkan struktur ini.

Selain beban bergerak dari kendaraan, beban tetap seperti pengerasan jalan semakin meningkatkan beban yang diberikan pada jembatan-jembatan tua tersebut. Untuk menghindari kemungkinan kegagalan struktur yang dapat mengancam keselamatan masyarakat, penerapan strategi rehabilitasi sangatlah penting. Strategi ini melibatkan evaluasi menyeluruh terhadap kekuatan struktural setiap jembatan, penguatan elemen-elemen penting, penggantian bahan yang telah rusak, serta kemungkinan perbaikan fitur desain untuk mendukung beban yang lebih besar. Dengan memperbaiki kapasitas jembatan rangka yang sudah tua ini, kita dapat menjamin keberlangsungan keselamatan, keandalan, dan kemudahan pemeliharaannya bagi masyarakat yang memerlukannya.

Salah satu cara yang efisien dan ekonomis untuk memperbaiki serta meningkatkan kinerja jembatan lama dengan memanfaatkan kabel prategang eksternal, sebagaimana ditunjukkan dalam studi oleh Kim et al. (2021). Konsep dasar prategang eksternal berpusat pada penerapan gaya prategang yang strategis, yang memungkinkan para insinyur sipil untuk memanfaatkan manfaat pembebanan eksentrik (Noor et al., 2025). Ketika elemen struktural, seperti batang atau balok, dikenai gaya tarik, elemen tersebut akan mengalami gaya tekan; sebaliknya, ketika elemen tersebut dikenai gaya tekan, elemen tersebut akan mengalami tegangan tarik. Interaksi gaya-gaya ini menghasilkan pengurangan netto dari tegangan keseluruhan yang bekerja pada komponen struktural, yang secara efektif meminimalkan lendutan dan meningkatkan daya dukungnya. Penerapan kabel prategang eksternal memungkinkan penyesuaian yang presisi selama proses rehabilitasi, sehingga para insinyur sipil dapat mengoptimalkan kinerja struktur yang ada tanpa perlu penggantian yang ekstensif dan mahal. Lebih jauh lagi, metode ini dapat memperpanjang umur layanan jembatan secara signifikan, menjamin keselamatan dan fungsionalitasnya selama bertahun-tahun yang akan datang.

Penerapan metode prategang eksternal di lapangan merupakan proses yang sistematis dan efisien yang dapat secara signifikan meningkatkan integritas structural dari jembatan rangka. Prosedur ini diawali dengan perencanaan dan analisis untuk mengidentifikasi lokasi strategis pemasangan deviator atau elemen penguat, yang penting untuk mengalihkan beban yang diberikan pada tendon. Deviator ini biasanya ditempatkan pada titik-titik dengan tegangan tinggi atau perubahan arah sepanjang rangka.

Setelah deviator dipasang dengan aman, tendon yang memiliki kekuatan tinggi, yang biasanya terbuat dari material seperti baja atau serat komposit, dipasang pada deviator tersebut. Sangat krusial untuk memastikan bahwa tendon sejajar dan terjangkar dengan benar untuk memaksimalkan efektivitasnya. Langkah berikutnya adalah menegangkan tendon sampai mencapai tegangan desain yang telah ditentukan. Proses pengencangan ini biasanya dilakukan menggunakan dongkrak hidrolik yang memberikan kontrol presisi terhadap gaya yang diberikan, memastikan bahwa spesifikasi desain dipatuhi dengan ketat.

Apabila diperlukan peningkatan kapasitas dukung beban pada jembatan atau rehabilitasi tegangan yang terdapat dalam struktur, maka tegangan tendon dapat disesuaikan kembali. Proses penyesuaian ini memungkinkan redistribusi beban dan dapat sangat membantu dalam mengatasi kelemahan tertentu pada struktur rangka atau mengakomodasi

perubahan pola lalu lintas atau kondisi lingkungan. Secara keseluruhan, metode prategang eksternal memberikan solusi yang adatif dan efisien dalam mempertahankan serta meningkatkan keselamatan dan kinerja jembatan rangka.

Studi ini berfokus pada jembatan rangka tipe-K, dengan mengkaji perkutuan menggunakan susunan tendon lurus (*straight tendon*) dan trapesium (*two draped tendon*). Agar dapat memberikan pemahaman yang lengkap mengenai kinerja struktural, peneliti akan melakukan analisis statis di samping melakukan analisis dinamis. Analisis dinamis memiliki peranan yang sangat penting karena memungkinkan identifikasi frekuensi alami pada jembatan tipe-K yang telah diperkuat. Mengetahui frekuensi ini sangat krusial untuk pemantauan kondisi yang real dan mengevaluasi integritas struktural jembatan seiring berjalannya waktu (Widjajakusuma, 2025). Dengan mempelajari respons statis dan dinamis, studi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang tidak hanya memperbaiki metode desain tetapi juga meningkatkan rencana perawatan untuk jembatan.

Jembatan tipe-K, yang dicirikan oleh konfigurasi strukturalnya yang khas, menjadi objek studi ini dengan menggunakan perangkat lunak MIDAS. Tujuan Utama dari studi ini adalah untuk mengidentifikasi konfigurasi kabel prategang eksternal yang paling optimal, yang sangat penting untuk rehabilitasi dan penguatan jembatan tipe-K. Analisis ini tidak hanya berfokus pada peningkatan integritas struktural jembatan tetapi juga pada studi dampak dari pengukuran frekuensi alami dalam pemantauan kesehatan jembatan yang berkelanjutan. Dengan mengevaluasi pengaruh berbagai konfigurasi tendon terhadap frekuensi alami, penelitian ini bertujuan untuk memberikan strategi pemeliharaan prediktif serta untuk meningkatkan keselamatan dan umur jembatan secara keseluruhan.

Makalah ini terdiri dari lima bagian yang mendetail untuk membantu pembaca memahami penelitian ini. Bagian 1 berfungsi sebagai pengantar, yang menguraikan latar belakang penelitian, serta menguraikan tujuan dan signifikansi penelitian ini. Bagian 2 membahas kerangka teoritis, memberikan analisis mendalam mengenai konsep dan teori utama yang mendasari penelitian ini. Bagian 3 membahas mengenai geometri dan beban dari jembatan tipe-K yang dibahas dalam penelitian ini. Bagian 4 menyajikan hasil analisis, menyoroti temuan, dan menginterpretasikan data terkait dengan model yang telah dibahas sebelumnya. Terakhir, Bagian 5 menyajikan kesimpulan penelitian ini, membahas implikasinya, dan menyarankan arah untuk penelitian selanjutnya.

2. LANDASAN TEORI

Penelitian ini didasarkan pada beberapa asumsi kunci yang bertujuan untuk menyederhanakan analisis sekaligus menjaga akurasi kritis dalam pemodelan sistem rekayasa jembatan. Asumsi-asumsi tersebut adalah sebagai berikut (Widjajakusuma, 2025; Widjajakusuma dan Wijaya, 2015):

- (i) Batang dan tendon diasumsikan menunjukkan perilaku elastis linear, yang berarti akan mengalami deformasi secara proporsional terhadap beban yang diberikan dalam batas elastisnya. Hal ini menyiratkan bahwa hubungan tegangan-regangannya dapat dijelaskan menggunakan Hukum Hooke, yang penting untuk memprediksi responsnya dalam berbagai kondisi pemberaban.
- (ii) Diasumsikan bahwa gaya yang berlaku pada batang dan tendon tetap tidak berubah sepanjang panjangnya. Asumsi ini mempermudah analisis dengan memastikan distribusi tegangan yang konsisten, yang mendukung perhitungan respons struktural secara keseluruhan tanpa kesulitan yang disebabkan oleh variasi dalam ukuran atau arah beban.
- (iii) Analisis ini mengasumsikan bahwa luas penampang batang dan tendon tetap tidak berubah panjangnya setiap elemen. Stabilitas ini penting karena memastikan sifat kekuatan dan kekakuan yang seragam, sehingga memudahkan perhitungan kapasitas komponen struktur di bawah beban secara langsung.
- (iv) Model ini mengasumsikan tidak adanya gesekan antara tendon dan deviator. Dengan mengabaikan gaya gesekan, analisis dapat lebih berfokus pada gaya tarik dan tekan di dalam tendon tanpa komplikasi hambatan geser yang dapat memengaruhi akurasi transmisi beban.
- (v) Susunan tendon yang simetris diasumsikan, yang menyiratkan bahwa sifat geometris dan material identik pada kedua sisi struktur jembatan. Simetri ini krusial untuk menyederhanakan analisis dan memastikan beban terdistribusi secara merata, yang dapat meningkatkan stabilitas dan kinerja.
- (vi) Terakhir, diasumsikan bahwa rangka jembatan beroperasi sebagai rangka uniaksial. Ini berarti rangka terutama akan memikul beban melalui tarik dan tekan sepanjang sumbu tunggal, sehingga menyederhanakan analisis struktural dengan memungkinkan penggunaan teori rangka untuk menentukan gaya anggota dan integritas struktural secara keseluruhan.

Struktur rangka batang uniaksial terdiri dari serangkaian elemen batang linier yang terhubung pada titik sambungan tertentu. Batang uniaksial ini dirancang khusus untuk mendukung beban aksial, artinya batang tersebut dirancang untuk memikul beban yang bekerja di sepanjang batang, baik dalam beban tarik maupun tekan. Titik-titik sambungan berfungsi sebagai simpul sambungan pivot tempat batang bertemu, memfasilitasi transfer gaya antar elemen; namun, sambungan ini diasumsikan tidak mentransfer momen, yang menyederhanakan analisis struktur. Dalam studi struktur rangka batang, penting untuk dicatat bahwa beban diterapkan secara eksklusif pada titik-titik sambungan, sehingga menghasilkan sistem yang dapat dianalisis menggunakan prinsip keseimbangan statis. Untuk menentukan besarnya gaya aksial di dalam batang rangka batang, beberapa metode analisis dapat digunakan. Metode keseimbangan titik sambungan melibatkan penilaian keseimbangan gaya pada setiap sambungan dengan menerapkan persamaan keseimbangan statis—khususnya, jumlah gaya vertikal dan jumlah gaya horizontal harus sama dengan nol.

Teknik lain yang banyak digunakan adalah metode Ritter, yang melibatkan pemecahan rangka menjadi komponen-

komponen yang lebih sederhana dan perhitungan gaya-gaya pada batang secara sistematis dengan mempertimbangkan keseimbangan seluruh bagian rangka (Hibbeler, 2024). Selanjutnya, untuk menganalisis lendutan batang di bawah beban, prinsip gaya virtual dapat diterapkan. Pendekatan ini membutuhkan penggunaan gaya imajiner untuk menghitung perpindahan di dalam struktur (Hibbeler, 2024). Pemahaman komprehensif tentang perilaku rangka ini penting untuk desain dan analisis yang efektif dalam aplikasi rekayasa struktur.

Gaya batang untuk sistem rangka batang dengan kabel prategang eksternal dijelaskan oleh Ayyub, Ibrahim and Schelling (1990):

$$P_u = \frac{T_D}{A_m} - f_{ct} \frac{A_c}{A_m} + \frac{T_{L+1}}{A_m + A_c} \quad (1)$$

Di sini T_D merupakan gaya batang yang disebabkan oleh beban mati, A_m merupakan luas penampang batang, f_{ct} adalah gaya prategang tendon, A_c adalah luas penampang kabel tendon dan T_{L+1} merupakan gaya batang yang diakibatkan oleh beban hidup serta gaya impak. Jika f_i merupakan gaya tendon yang diijinkan, maka gaya prategang tendon f_{ci} diberikan oleh pertidaksamaan (Ayyub, Ibrahim and Schelling, 1990).

$$f_{ci} \leq f_i - \frac{T_{L+1}}{A_m + A_c} \quad (2)$$

Sementara, gaya batang P_u harus memenuhi pertidaksamaan (BSN, 2005b)

$$\frac{P_u}{\phi P_n} \leq 1. \quad (3)$$

Di sini P_n merupakan kapasitas elemen batang. Faktor reduksi ϕ diberikan oleh persamaan (BSN, 2005b)

$$\phi = \begin{cases} 0,85 & \text{batang tekan} \\ 0,90 & \text{batang tarik} \end{cases} \quad (4)$$

Berdasarkan RSNI T-03-2005 (BSN, 2005b) lendutan maksimum w_{max} yang diijinkan adalah

$$w_{max} = 0,125\% \times L, \quad (5)$$

dimana L = panjang bentang jembatan.

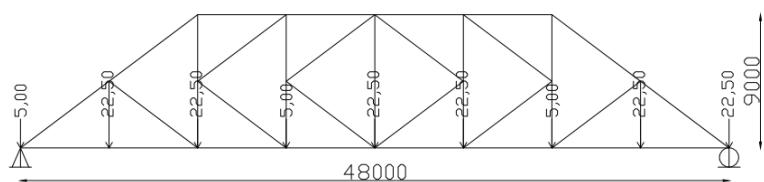
3. GEOMETRI DAN BEBAN DARI JEMBATAN K

Model jembatan Tipe K, yang dikembangkan untuk analisis struktur, memiliki panjang 48 meter dan tinggi 9 meter pada bagian tertingginya. Abutmen sebelah kiri berperan sebagai abutmen engsel, memberikan keleluasaan untuk berputar, sedangkan abutmen sebelah kanan berfungsi sebagai abutmen rol, yang memungkinkan pergerakan secara horizontal. Desain ini mendukung pengelolaan beban statis dan dinamis sesuai dengan aturan yang dijelaskan dalam RSNI-T03-2005.

Beban statis utama yang ada pada jembatan Tipe K berasal dari berat truk trailer yang membawa muatan penuh, sesuai dengan standar peraturan yang telah ditetapkan. Skenario pemuatan ini menjadi landasan untuk menilai kinerja jembatan dalam keadaan normal. Geometri, kondisi beban, dan pengaturan abutmen dijelaskan secara mendetail dalam Gambar 1, yang menunjukkan elemen-elemen penting dari model tersebut.

Dalam penelitian ini, jembatan Tipe K mengalami beban dinamis sebesar 50 ton, yang diterapkan sebagai beban kejutan selama 2 detik. Simulasi ini dirancang untuk mengevaluasi reaksi jembatan terhadap tekanan mendadak yang mungkin muncul dalam situasi dunia nyata, seperti saat lalu lintas padat atau terjadinya kecelakaan. Untuk keperluan analisis, dua model yang berbeda dibuat: Model 1 menggambarkan jembatan dalam keadaan optimal, di mana semua elemen struktural menunjukkan integritas serta kinerja yang maksimal. Sebaliknya, Model 2 mensimulasikan jembatan yang telah terdegradasi, di mana kerusakan terjadi untuk mengevaluasi ketahanan dan keamanan jembatan dalam kondisi yang memburuk.

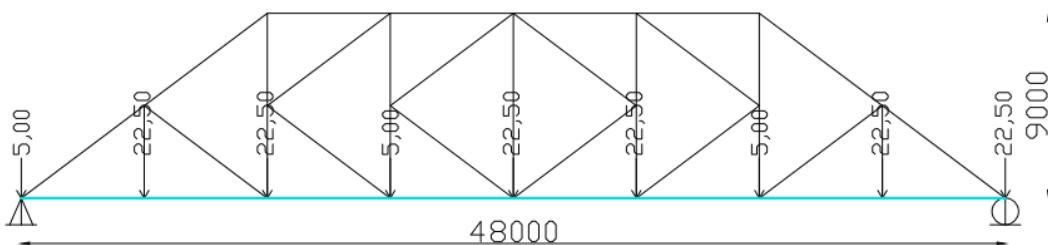
Untuk Model 1, bagian struktural terdiri dari profil baja Wide Flange (WF) dengan ukuran 350 mm x 300 mm dan ketebalan flens sebesar 10 mm, dipadukan dengan ketebalan web 16 mm. Komponen-komponen ini memiliki massa jenis sebesar 7850 kg/m³, modulus elastisitas 200 GPa, dan tegangan luluh 240 MPa, yang memberikan kekuatan dan kestabilan pada struktur jembatan. Sebaliknya, untuk Model 2, simulasi kerusakan dilakukan dengan secara sengaja mengurangi modulus elastisitas elemen baja hingga mencapai 100 GPa, yang menggambarkan adanya penurunan yang signifikan pada sifat material. Penyesuaian ini memberikan kesempatan untuk melakukan analisis menyeluruh mengenai pengaruh kerusakan struktural terhadap kinerja dan keselamatan jembatan Tipe K secara keseluruhan, baik dalam situasi pembebanan statis maupun dinamis.



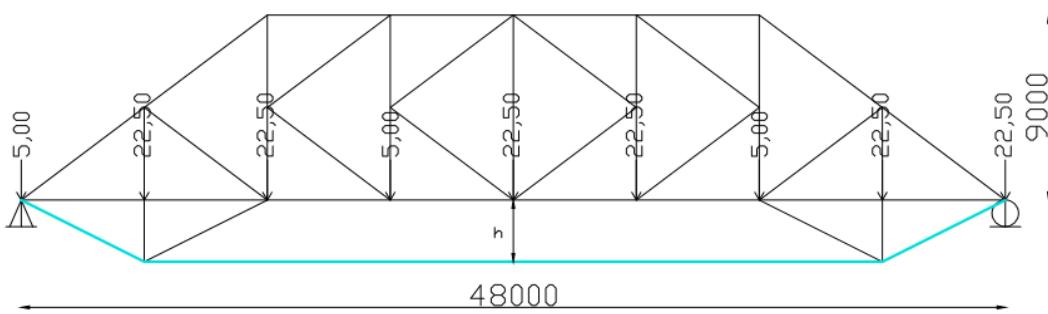
Gambar 1. Geometri dan pembebanan statis pada jembatan rangka tipe K

Jembatan model 2 akan diperkuat dengan penambahan tendon prategang eksternal. Tendon yang digunakan memiliki modulus elastisitas sebesar 200 GPa, luas penampang 600 mm^2 , dan tegangan leleh 1600 MPa. Untuk mencapai kinerja optimal, tendon dapat dikencangkan dengan tegangan awal prategang (*initial post-tensioning stress*) sebesar 1360 MPa di kedua ujungnya, sehingga memfasilitasi distribusi beban yang efektif di seluruh struktur jembatan. Konfigurasi tendon mencakup dua jenis yang berbeda: konfigurasi garis lurus, seperti yang digambarkan pada Gambar 2, yang memungkinkan distribusi tegangan yang merata di sepanjang panjangnya, dan konfigurasi trapesium yang diilustrasikan pada Gambar 3, yang dirancang untuk meningkatkan kapasitas dukung beban di area tertentu pada jembatan.

Secara khusus, untuk model yang melibatkan penggunaan tendon trapesium, analisis komprehensif dapat dilakukan untuk menyelidiki dampak jarak (h) antara tali bawah (*lower chord*) jembatan dan kabel tendon. Relasi ini sangat penting, karena perbedaan jarak ini dapat mempengaruhi sifat transmisi gaya dan keseluruhan stabilitas jembatan. Dengan menganalisis parameter-parameter ini secara teliti, peneliti dapat memaksimalkan kinerja sistem prategang untuk memperpanjang masa layanan dan ketahanan struktur jembatan secara keseluruhan.



Gambar 2. Jembatan rangka tipe K dengan penambahan tendon garis lurus



Gambar 3. Jembatan rangka tipe K dengan penambahan tendon trapesium

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

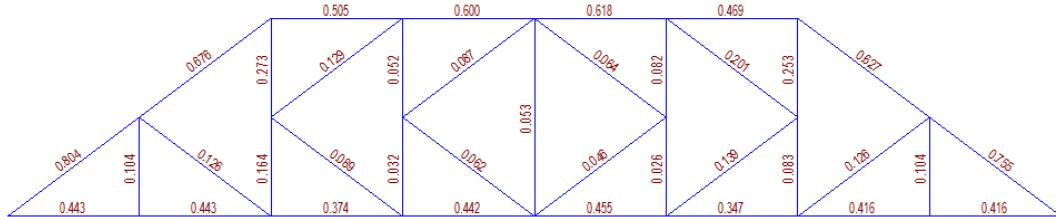
Hasil simulasi untuk model jembatan diuraikan secara rinci dalam Tabel 1. Model 1 merepresentasikan jembatan berdasarkan spesifikasi desain asli, sedangkan Model 2 mencakup perubahan yang menyebabkan penurunan kinerja yang signifikan sebesar 50% jika dibandingkan dengan Model 1. Berdasarkan persamaan yang telah ditentukan untuk lendutan maksimum yang diizinkan, batas lendutan maksimum adalah sebesar 60 mm. Sehingga, Model 1 memenuhi kriteria ini, menunjukkan tingkat kinerja yang dapat diterima. Sebaliknya, Model 2 gagal memenuhi ambang batas kritis ini, seperti yang dijelaskan dalam Tabel 1, yang menunjukkan adanya kekhawatiran serius mengenai integritas strukturnya.

Penelitian ini berjalan dengan asumsi bahwa jembatan rangka batang menunjukkan perilaku elastis yang linier, yang berarti bahwa lendutan yang terukur pada Model 2 adalah dua kali lipat dari yang terdapat pada Model 1. Untuk mengevaluasi gaya yang bekerja pada setiap elemen jembatan akibat beban yang diterapkan, dilakukan perhitungan mendalam menggunakan perangkat lunak MIDAS. Hasil dari perhitungan ini ditampilkan pada Gambar 4 dan 5.

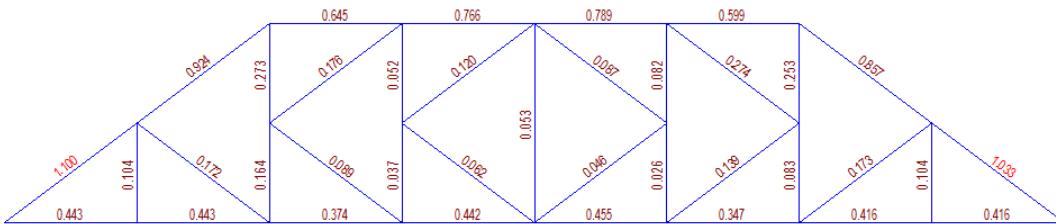
Gambar 4 menunjukkan perbandingan antara gaya anggota dan kapasitas maksimum anggota rangka jembatan dalam Model 1, yang selalu berada di bawah angka 1. Pernyataan ini secara efektif menunjukkan pemenuhan terhadap standar keselamatan yang dijelaskan dalam Persamaan 3, yang menegaskan kembali kekuatan struktural Model 1. Sebaliknya, Gambar 5 menunjukkan kinerja yang mengkhawatirkan pada Model 2, di mana beberapa bagian jembatan, terutama yang berada di ujung jembatan, melebihi ambang batas keselamatan. Nilai kritis yang dicatat untuk masing-masing elemen ini adalah 1,100 dan 1,033, yang menunjukkan adanya kemungkinan kegagalan dan menimbulkan kekhawatiran mendesak mengenai keselamatan serta kelayakan Model 2 jembatan tersebut.

Tabel 1. Hasil lendutan dan rasio $\frac{P_u}{\phi P_n}$ pada model 1 dan 2

Model	Tipe	Lendutan Statis (mm)	Rasio $\frac{P_u}{\phi P_n}$
1	Sesuai desain awal	33,45	0,804
2	Penurunan kapasitas 50%	66,91	1,100



Gambar 4. Rasio gaya batang untuk model 1



Gambar 5. Rasio gaya batang untuk model 2

Hasil pada Tabel 1 menunjukkan bahwa jembatan model 2 perlu direhabilitasi agar syarat maksimum lendutan dan rasio gaya batang terhadap kapasitas maksimum dapat lebih kecil dari batas yang ditetapkan pada Persamaan 3 dan 5. Rehabilitasi tersebut dapat dimodelkan melalui penambahan tendon, sehingga hasil analisis struktur dari proses rehabilitasi tersebut dapat dilihat pada Tabel 2. Model 3 merupakan model rehabilitasi jembatan dengan susunan tendon berbentuk garis lurus, sedangkan model 4 dan seterusnya menggunakan susunan tendon berbentuk trapesium dengan variasi tinggi antara lower chord dan tendon yang berbeda-beda.

Variasi garis lurus yang diterapkan pada model 3 dapat menghasilkan lendutan statis yang lebih kecil dari lendutan izin, namun nilai rasio $P_u/\phi P_n$ masih lebih besar dari 1. Dengan demikian, rehabilitasi menggunakan tendon tipe garis lurus tidak dapat diterapkan untuk jembatan ini.

Rehabilitasi dengan susunan tendon berbentuk trapesium menunjukkan penurunan pada lendutan statis dan rasio $P_u/\phi P_n$. Rehabilitasi dengan bentuk trapesium ini dapat menurunkan lendutan hingga lebih kecil dari lendutan izin, namun variasi tinggi h antara 0,5 m hingga 1,0 m masih belum memenuhi persyaratan rasio $P_u/\phi P_n$ karena nilainya tetap lebih besar dari 1. Oleh karena itu, rehabilitasi yang memenuhi persyaratan lendutan izin dan rasio $P_u/\phi P_n$ dapat dicapai dengan menggunakan variasi tendon berbentuk trapesium dengan nilai h antara 1,2 m hingga 2,0 m.

Tabel 2. Hasil lendutan dan rasio $\frac{P_u}{\phi P_n}$ akibat variasi penambahan tendon

Model	Tipe	Lendutan Statis (mm)	Rasio $\frac{P_u}{\phi P_n}$
3	Garis lurus	44,60	1,105
4	Trapesium, $h = 0,5$ m	41,72	1,050
5	Trapesium, $h = 0,7$ m	40,81	1,031
6	Trapesium, $h = 1,0$ m	39,06	1,004
7	Trapesium, $h = 1,2$ m	38,44	0,989
8	Trapesium, $h = 1,5$ m	37,52	0,973
9	Trapesium, $h = 1,7$ m	36,69	0,961
10	Trapesium, $h = 2,0$ m	35,27	0,944

Analisis yang dilakukan dengan perangkat lunak MIDAS memberikan data penting tentang nilai frekuensi alami jembatan, yang disajikan secara menyeluruh dalam Tabel 3 dan 4. Secara khusus, Tabel 4 menunjukkan frekuensi alami yang diperoleh dari berbagai pengaturan penambahan tendon, yang mencerminkan rentang nilai antara 29 hingga 30 radian per detik. Penemuan ini memiliki hubungan yang kuat dengan nilai frekuensi alami yang dicatat untuk jembatan, yang menunjukkan adanya penurunan dalam kapasitas struktural, seperti yang diuraikan dalam Tabel 3. Kesamaan nilai frekuensi ini menunjukkan bahwa penambahan tendon tidak secara signifikan mempengaruhi

frekuensi alami sistem kerangka jembatan Tipe K, yang mengindikasikan bahwa perubahan struktural mungkin tidak memperbaiki kinerja dinamis seefektif yang telah diperkirakan sebelumnya.

Selanjutnya, hasil yang ditampilkan dalam Tabel 3 dan 4 menunjukkan informasi penting: frekuensi alami tidak dapat dijadikan satu-satunya parameter untuk menilai kesehatan jembatan. Kesimpulan ini menekankan pentingnya pendekatan evaluasi yang lebih menyeluruh yang dapat mencakup faktor-faktor lain seperti rasio redaman, struktur modal, dan dampak lingkungan. Oleh sebab itu, penelitian lanjutan perlu dilakukan di area ini untuk merancang kerangka kerja yang lebih akurat dalam penilaian kesehatan jembatan, dengan menggabungkan berbagai metode untuk meningkatkan ketepatan prediktif dan memastikan integritas struktural..

Tabel 3. Frekuensi alami dari jembatan model 1 dan 2

Model	Tipe	Frekuensi Alami (rad/s)
1	Sesuai desain awal	42,812576
2	Penurunan kapasitas 50%	30,273133

Tabel 4. Frekuensi alami dari jembatan akibat variasi penambahan tendon

Model	Tipe	Frekuensi Alami (rad/s)
3	Garis lurus	30,273133
4	Trapesium, $h = 0,5$ m	30,456805
5	Trapesium, $h = 0,7$ m	30,294107
6	Trapesium, $h = 1,0$ m	30,079674
7	Trapesium, $h = 1,2$ m	29,967333
8	Trapesium, $h = 1,5$ m	29,836227
9	Trapesium, $h = 1,7$ m	29,766702
10	Trapesium, $h = 2,0$ m	29,679906

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis komprehensif, dapat disimpulkan bahwa susunan tendon lurus tidak efektif untuk merehabilitasi jembatan tipe K yang telah mengalami penurunan kapasitas beban yang signifikan sebesar 50%. Sebaliknya, susunan tendon trapesium, yang dicirikan oleh nilai tinggi (h) 1,2 meter atau lebih, telah menunjukkan peningkatan yang nyata dalam kinerja jembatan secara keseluruhan. Konfigurasi ini secara efektif meningkatkan distribusi beban dan meminimalkan lendutan, sehingga berhasil memenuhi kriteria yang ditetapkan untuk batas lendutan dan rasio gaya anggota terhadap kapasitas maksimum.

Lebih lanjut, hasil analisis frekuensi alami menunjukkan bahwa parameter ini sendiri bukanlah indikator yang andal untuk kesehatan jembatan secara keseluruhan selama proses rehabilitasi yang menggunakan tendon prategang. Perubahan frekuensi alami dapat dipengaruhi oleh banyak faktor yang tidak terkait dengan kesehatan struktural, sehingga menunjukkan bahwa peneliti perlu memperluas perangkat diagnostik. Akibatnya, penelitian lebih lanjut sangat penting untuk mengidentifikasi parameter alternatif yang menawarkan penilaian yang lebih akurat dan representatif terhadap kondisi struktural jembatan pasca-rehabilitasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ayyub, B.M., Ibrahim, A. and Schelling, D. (1990). "Posttensioned Trusses: Analysis and Design". *J. Struct. Eng.*, Vol. 116 (6), 1491-1506.
- BSN (2005a). *Standar Pembebaran untuk Jembatan. RSNI T-02-2005*. BSN, Jakarta.
- BSN (2005b). *Perencanaan Struktur Baja untuk Jembatan. RSNI T-03-2005*. BSN, Jakarta.
- Burdet, O. and Badoux, M. (2000). "Comparison of Internal and External Prestressing for Typical Highway Bridges". 16th Congress of IABSE, Lucerne.
- Han, K.-B. and Park, S.-K. (2005). "Parametric study of truss bridges by the post-tensioning method". *Can. J. Civ. Eng.*, Vol. 32, 420-429.
- Hajiba, A., Cucuzza, R. and Bertagnoli, G. (2024). "Retrofitting of a Steel Truss Joint by Creating Composite Connections and PTMSs (Post-Tensioned Metal Straps)". *Applied Sciences*, Vol. 14(7), 2794.
- Hibbeler, R.C. (2024). *Structural Analysis*. Pearson Education Limited, London.
- Kim, S-H., Park, J-S., Jung, W-T., Kim, T-K., and Park, H-B. (2021). "Experimental Study on Strengthening Effect Analysis of a Deteriorated Bridge Using External Prestressing Method". *Applied Sciences*, Vol. 11, 2478.
- Noor R., Mustaqim, M., Mufassirin, U. and Siregar, A. (2025). "Analysis of Steel Bridge Frame Reinforcement Using External Prestressing Method Due to Moving Loads". *Journal of Science and Engineering*, Vol. 3(2), 74-79.
- Widjajakusuma, J. and Wijaya, H. (2015). "Effect of Geometries on the Natural Frequencies of Pratt Truss Bridges". *Procedia Engineering*, vol. 125, 1149-1155.

- Widjajakusuma, J. and Limbunan, F. (2015). "Analisis Frekuensi Alami Jembatan Rangka Kereta Api Model K". Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil 9, Makassar, 7-8 Oktober 2015, 893-898.
- Widjajakusuma, Jack, dan Limbunan, F. (2013). "Studi Simulasi Numerik Kesehatan Jembatan Rangka Warren dengan Uji Vibrasi". Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil 7, UNS, Solo, 24-26 Oktober 2013, S-333-S-338.
- Widjajakusuma, J. (2025). *Analisis Kesehatan Jembatan Rangka*. Penerbit Amerta Media, Purwokerto.