

**EVALUASI EFISIENSI PENGGUNAAN BETON BERTULANG PADA STRUKTUR JEMBATAN****Bagus Nugroho Prasetyo<sup>1</sup> , Edison H Manurung<sup>2</sup>**<sup>1,2</sup>Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Mpu Tantular JakartaEmail: [bagusn2002@gmail.com](mailto:bagusn2002@gmail.com)

## INFO ARTIKEL

**Riwayat Artikel:**

Received :21-12-2025

Revised :03-01-2026

Accepted :09-01-2026

**Keywords:** Structural Efficiency, Cost Analysis, Reinforced Concrete, Bridges, Design Optimization, Precast Construction, Multi-Criteria.**DOI:** <https://doi.org/10.62335>**ABSTRACT**

*Efficiency in bridge construction is a critical multidimensional concept, encompassing structural, economic, and time aspects. This study aims to evaluate the efficiency of reinforced concrete use in bridge structures through a comparative analysis of various design parameters. The method used is applied research with a quantitative approach, through parametric design simulations of 18 scenarios which are a combination of cross-section type variables (T-Beam and Box Girder), concrete quality (K-300, K-350, K-450), and span length (20m, 30m, 40m). The analysis was carried out in an integrated manner with SAP2000 software for structural modeling and manual calculations based on SNI 2847:2019 and RSNI T-02-2005 for reinforcement design and cost analysis. The study results show that box girders are consistently more structurally efficient, with up to a 22% reduction in concrete volume compared to T-beams over a 30m span, especially when using high-grade concrete (K-450). However, from an economic efficiency perspective, conventional T-beams remain superior, with initial construction costs 4.6% lower under similar conditions, driven by lower formwork and labor costs. A weighted multi-criteria analysis reveals that the most efficient option depends heavily on project priorities: conventional K-350 T-beams are optimal for cost-oriented projects, while precast K-450 box girders excel for projects prioritizing speed and performance. The study concludes that there is no universally best solution and*

*recommends analyzing design alternatives at the concept stage to achieve holistic resource optimization in bridge planning in Indonesia.*

### **ABSTRAK**

Efisiensi dalam konstruksi jembatan merupakan konsep multidimensi yang kritis, mencakup aspek struktural, ekonomi, dan waktu. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi penggunaan beton bertulang pada struktur jembatan melalui analisis komparatif terhadap berbagai parameter desain. Metode yang digunakan adalah penelitian terapan dengan pendekatan kuantitatif, melalui simulasi desain parametrik 18 skenario yang merupakan kombinasi dari variabel tipe penampang (Balok T dan Box Girder), mutu beton (K-300, K-350, K-450), dan panjang bentang (20m, 30m, 40m). Analisis dilakukan secara terintegrasi dengan perangkat lunak SAP2000 untuk pemodelan struktur dan perhitungan manual berdasarkan SNI 2847:2019 serta RSNI T-02-2005 untuk desain penulangan dan analisis biaya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Box Girder secara konsisten lebih efisien secara struktural, dengan pengurangan volume beton hingga 22% dibandingkan Balok T pada bentang 30m, terutama ketika menggunakan mutu beton tinggi (K-450). Namun, dari perspektif efisiensi ekonomi, Balok T konvensional tetap unggul dengan biaya konstruksi awal 4.6% lebih rendah untuk kondisi yang sama, didorong oleh biaya bekisting dan tenaga kerja yang lebih murah. Analisis multi-kriteria dengan pembobotan mengungkap bahwa pilihan paling efisien sangat bergantung pada prioritas proyek: Balok T K-350 konvensional optimal untuk proyek berorientasi biaya, sedangkan Box Girder K-450 pracetak unggul untuk proyek yang mengutamakan kecepatan dan kinerja. Penelitian ini menyimpulkan bahwa tidak ada solusi universal terbaik dan merekomendasikan dilakukannya analisis alternatif desain pada tahap konsep untuk mencapai optimasi sumber daya yang holistik dalam perencanaan jembatan di Indonesia.

### **PENDAHULUAN**

Jembatan merupakan infrastruktur vital yang menghubungkan dua wilayah yang terpisah oleh rintangan alam seperti sungai, lembah, atau jalan raya. Fungsi strategis jembatan tidak hanya dalam mendukung mobilitas manusia dan barang, tetapi juga dalam pertumbuhan ekonomi dan perkembangan wilayah. Seiring dengan meningkatnya beban lalu lintas dan tuntutan usia layan, kinerja dan keandalan struktur jembatan menjadi perhatian utama dalam perencanaan dan pemeliharaan infrastruktur.

Beton bertulang (reinforced concrete) telah menjadi material pilihan utama dalam konstruksi jembatan selama lebih dari satu abad. Kombinasi antara beton yang kuat terhadap tekan dan baja tulangan yang kuat terhadap tarik menghasilkan material komposit yang serba guna, tahan lama, dan relatif ekonomis. Penggunaannya mencakup hampir semua elemen struktur jembatan, mulai dari fondasi, pilar, abutment, balok gelagar (girder), pelat lantai jembatan, hingga diafragma.

Namun, di tengah dominasi penggunaannya, muncul pertanyaan mendasar tentang efisiensi penggunaan beton bertulang. Efisiensi dalam konteks ini tidak hanya dinilai dari segi biaya konstruksi awal (initial cost), tetapi merupakan suatu konsep multidimensional yang mencakup:

1. Efisiensi Struktural: Seberapa optimal material beton dan baja digunakan untuk menahan beban? Apakah ada redundansi (kelebihan) desain yang tidak perlu?
2. Efisiensi Ekonomi: Apakah biaya yang dikeluarkan sebanding dengan nilai kinerja dan umur layan yang dihasilkan? Termasuk biaya siklus hidup (life cycle cost) seperti pemeliharaan, perbaikan, dan pembongkaran.
3. Efisiensi Waktu Konstruksi: Bagaimana metode pekerjaan beton bertulang (konvensional, pracetak) memengaruhi durasi pembangunan?
4. Efisiensi Lingkungan: Seberapa besar jejak karbon dari produksi semen dan baja? Apakah ada material alternatif yang lebih ramah lingkungan dengan kinerja setara? Dalam praktiknya, banyak faktor yang menyebabkan inefisiensi, seperti desain yang terlalu konservatif (akibat ketidakpastian dalam pembebanan atau metode analisis), keterbatasan detail konstruksi, pemilihan dimensi elemen standar yang tidak optimal, atau kurangnya pertimbangan terhadap biaya pemeliharaan jangka panjang.

Oleh karena itu, evaluasi komprehensif terhadap efisiensi penggunaan beton bertulang pada struktur jembatan menjadi sangat penting. Evaluasi ini diharapkan dapat memberikan panduan bagi para perencana, kontraktor, dan pemilik jembatan dalam mengambil keputusan yang lebih rasional, berimbang, dan berkelanjutan, sehingga sumber daya yang terbatas dapat dialokasikan secara optimal tanpa mengorbankan aspek keselamatan dan keandalan.

#### Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana mengukur dan mengevaluasi tingkat efisiensi penggunaan beton bertulang pada berbagai tipe struktur jembatan (misalnya: jembatan balok T, box girder, pelat beton)?
2. Faktor-faktor dominan apa saja yang memengaruhi efisiensi penggunaan beton bertulang pada struktur jembatan, baik dari sisi desain, material, maupun konstruksi?
3. Bagaimana membandingkan tingkat efisiensi antara penggunaan beton bertulang konvensional dengan metode atau material alternatif (misalnya: beton pracetak, beton mutu tinggi, atau komposit baja-beton) untuk kasus jembatan dengan bentang tertentu?

4. Upaya-upaya optimasi seperti apa yang dapat diterapkan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan beton bertulang dalam perencanaan dan pelaksanaan konstruksi jembatan?

#### Tujuan Penelitian

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk melakukan evaluasi yang mendalam dan komprehensif terhadap efisiensi penggunaan beton bertulang pada struktur jembatan. Secara spesifik, tujuan penelitian adalah:

1. Merumuskan suatu kerangka metodologi atau indeks evaluasi yang dapat digunakan untuk mengkuantifikasi tingkat efisiensi (struktural, ekonomi, waktu) penggunaan beton bertulang pada jembatan.
2. Mengidentifikasi dan menganalisis faktor-faktor kritis yang menentukan efisiensi, baik yang bersifat teknis (kualitas material, metode analisis, detail tulangan) maupun non-teknis (regulasi, ketersediaan material, keahlian tenaga kerja).
3. Melakukan studi kasus komparatif dengan menganalisis desain alternatif (misalnya, variasi mutu beton, konfigurasi tulangan, atau sistem struktur) untuk menemukan konfigurasi yang paling efisien bagi suatu kondisi pembebanan dan bentang tertentu.
4. Memberikan rekomendasi praktis berupa pedoman atau langkah-langkah optimasi dalam perencanaan dan pelaksanaan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan beton bertulang pada proyek jembatan di Indonesia.

#### Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Manfaat Teoritis/ Akademis
  - Mengembangkan pemahaman yang lebih holistik tentang konsep efisiensi dalam desain struktur beton bertulang, khususnya untuk aplikasi jembatan.
  - Memberikan kontribusi pada bidang ilmu rekayasa nilai (value engineering) dan optimasi struktur di lingkungan akademik teknik sipil.
  - Dapat menjadi dasar referensi untuk penelitian serupa dengan cakupan atau variabel yang berbeda.
2. Manfaat Praktis:
  - Bagi Perencana (Konsultan): Sebagai acuan dalam membuat desain yang lebih optimal, tidak berlebihan, namun tetap memenuhi semua kriteria keamanan dan servis, sehingga meningkatkan nilai tambah dan kompetitifitas.
  - Bagi Kontraktor/Pelaksana: Memberikan wawasan mengenai metode konstruksi (konvensional vs. pracetak) yang lebih efisien dari segi waktu dan biaya pelaksanaan.
  - Bagi Pemilik/Pemerintah (Misalnya: Dinas PUPR, Bina Marga): Sebagai bahan pertimbangan dalam penyusunan spesifikasi teknis, pedoman desain, dan pengambilan keputusan investasi infrastruktur agar anggaran publik dapat digunakan secara lebih efektif dan berkelanjutan

- Bagi Industri Material: Memberikan gambaran tentang kebutuhan pasar terhadap material beton berkualitas tinggi atau produk pracetak untuk meningkatkan efisiensi.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian terapan (applied research) yang bertujuan untuk memecahkan masalah praktis dalam dunia teknik sipil, khususnya dalam evaluasi desain jembatan. Pendekatan utama yang digunakan adalah kuantitatif dengan metode studi kasus komparatif. Artinya, penelitian akan menghasilkan data numerik yang dapat diukur dan dibandingkan antara berbagai alternatif desain.

Untuk mencapai tujuan tersebut, metode penelitian ini mengintegrasikan simulasi desain parametrik dan analisis deskriptif. Simulasi desain dilakukan dengan memvariasikan parameter kunci seperti bentuk penampang dan mutu material, kemudian menganalisis dampaknya terhadap kinerja struktur dan biaya. Hasil simulasi ini kemudian dideskripsikan dan dibandingkan secara kuantitatif untuk menarik kesimpulan tentang konfigurasi yang paling efisien.

Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh desain jembatan beton bertulang bentang menengah yang ada di Indonesia. Namun, menguji seluruh populasi tersebut tidak mungkin dilakukan. Oleh karena itu, penelitian akan mengambil sampel berupa beberapa skenario desain hipotetis yang mewakili kondisi umum. Skenario ini dibangun dengan mengkombinasikan variabel-variabel bebas, misalnya menggabungkan penampang balok T dengan mutu beton K-350 untuk bentang 30 meter.

Pendekatan studi kasus ini dipilih karena memungkinkan pengontrolan yang ketat terhadap parameter desain. Data untuk membangun studi kasus ini bersumber dari dokumen standar seperti SNI dan RSNI untuk aspek teknis, serta dari Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) atau sumber sekunder terpercaya untuk data harga material dan upah. Dengan demikian, meski bersifat hipotetis, studi kasus yang dibangun tetap relevan dan mendekati kondisi riil di lapangan.

Pengumpulan data dilakukan secara bertahap dengan metode yang beragam. Tahap pertama adalah studi literatur dan dokumentasi, yaitu mengumpulkan dan menganalisis buku, jurnal, standar nasional (SNI), dan peraturan terkait desain jembatan serta konsep efisiensi. Tahap ini bertujuan untuk membangun fondasi teori yang kuat dan kerangka evaluasi yang komprehensif.

Tahap kedua adalah pengumpulan data sekunder teknis dan ekonomis. Data teknis meliputi sifat material beton dan baja, serta ketentuan pembebanan. Data ekonomis mencakup harga satuan beton, baja tulangan, bekisting, upah tenaga kerja, dan sewa alat. Data-data ini menjadi input kritis untuk tahap analisis berikutnya. Metode pengumpulan data utama yang ketiga adalah melalui simulasi digital, di mana model komputer dari setiap skenario desain dibuat dan dianalisis untuk menghasilkan data gaya dalam dan kebutuhan material.

Instrumen utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah perangkat lunak komputer. Software analisis struktur seperti SAP2000 atau MIDAS Civil berfungsi sebagai instrumen untuk memodelkan geometri jembatan, memberikan beban, dan menghitung gaya-gaya dalam (momen lentur, gaya geser) yang terjadi. Keluaran dari software ini adalah data numerik yang menjadi dasar perhitungan desain.

Selanjutnya, software spreadsheet (Microsoft Excel) digunakan sebagai instrumen untuk melakukan desain penulangan yang detail sesuai standar SNI. Spreadsheet juga berfungsi sebagai kalkulator untuk menghitung semua indikator efisiensi yang telah ditetapkan, seperti volume beton, berat baja, dan perkiraan biaya. Untuk analisis data, teknik analisis komparatif dan analisis skor tertimbang akan diterapkan. Analisis komparatif dilakukan dengan membandingkan nilai setiap indikator antar skenario secara side-by-side menggunakan tabel dan grafik.

Analisis skor tertimbang digunakan jika ingin mendapatkan kesimpulan tunggal dengan mempertimbangkan semua aspek (struktural, ekonomi, waktu) sekaligus. Pada metode ini, setiap indikator dinormalisasi dan diberi bobot berdasarkan tingkat kepentingannya. Skenario dengan total skor tertimbang tertinggi kemudian dapat diidentifikasi sebagai pilihan yang paling efisien secara keseluruhan, menyeimbangkan berbagai pertimbangan yang sering kali saling bertentangan.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Deskripsi Komperhensif Skenario Dan Hasil Pemodelan Awal**

Penelitian ini menganalisis 18 skenario utama yang dibangun melalui kombinasi sistematis dari tiga variabel kunci. Kombinasi ini meliputi: dua tipe penampang (Balok T Tunggal dan Box Girder Segi Empat), tiga mutu beton (K-300/f'c 25 MPa, K-350/f'c 29 MPa, K-450/f'c 37 MPa), dan tiga panjang bentang (20m, 30m, 40m). Model 3D dikembangkan dengan asumsi lebar dek jembatan 10 meter (mencakup 2 lajur dan bahu), duduk di atas dua perletakan sederhana pada abutment. Pembebanan mengacu ketat pada RSNI T-02-2005, dengan kombinasi beban terfaktor 1.2DL + 1.6LL sebagai kasus dominan untuk desain lentur.

Hasil pemodelan awal menunjukkan pola yang jelas dan terukur. Momen lentur maksimum di tengah bentang meningkat secara kuadratik terhadap penambahan panjang bentang. Sebagai contoh, untuk Balok T mutu K-350, momen meningkat dari 4,250 kNm pada bentang 20m menjadi 9,800 kNm pada bentang 40m. Analisis awal ini juga mengkonfirmasi bahwa peningkatan mutu beton tidak secara signifikan mengubah besaran gaya dalam (karena sifat elastis material), tetapi secara fundamental mengubah respons desain dengan memungkinkan penampang yang lebih kecil untuk menahan momen yang sama, membuka peluang untuk efisiensi material.

### **Analisis Mendalam Terhadap Efisiensi Struktural Konsumsi Material Beton Dan Baja**

Analisis efisiensi struktural dimulai dengan menghitung konsumsi material dari setiap desain final. Hasil perhitungan volume beton per meter panjang ( $V_c$ ) menunjukkan bahwa Box Girder secara konsisten lebih hemat beton. Pada bentang 30m

dengan mutu K-350,  $V_c$  untuk Box Girder adalah  $3.15 \text{ m}^3/\text{m}'$ , sementara Balok T membutuhkan  $4.05 \text{ m}^3/\text{m}'$  – selisih hampir 22%. Efisiensi ini berasal dari distribusi material yang optimal pada bentuk penampang tertutup, di mana sebagian besar beton ditempatkan pada serat terluar (flens atas dan bawah) yang paling efektif menahan momen lentur.

Namun, pola yang berbeda muncul untuk konsumsi baja tulangan ( $W_s$ ). Untuk bentang pendek (20m), Balok T membutuhkan lebih sedikit baja ( $175 \text{ kg}/\text{m}'$ ) dibandingkan Box Girder ( $205 \text{ kg}/\text{m}'$ ). Ini disebabkan oleh mekanisme transfer geser dan torsi yang lebih sederhana pada Balok T. Pada bentang 40m, situasi berbalik: Box Girder menjadi lebih hemat baja ( $320 \text{ kg}/\text{m}'$ ) daripada Balok T ( $390 \text{ kg}/\text{m}'$ ), karena kemampuannya yang superior dalam mengontrol defleksi dan retak, sehingga mengurangi kebutuhan tulangan tambahan untuk persyaratan layan (serviceability).

### **Indeks Efisiensi Struktural (Ies) Dan Rasi Kapasitas-Terbeban**

Indeks Efisiensi Struktural (IES) dirumuskan sebagai rasio antara kapasitas momen nominal ( $M_n$ ) terhadap momen terfaktor ( $M_u$ ), kemudian dinormalisasi dengan berat total material per meter. IES yang lebih tinggi menunjukkan struktur yang lebih "cerdas" dalam menggunakan setiap kilogram materialnya. Box Girder dengan mutu beton K-450 mencapai IES tertinggi (1.18) untuk bentang 30m, mengungguli semua konfigurasi Balok T. Hal ini menegaskan bahwa untuk bentang menengah, kombinasi bentuk penampang efisien dan material kuat menghasilkan kinerja struktural terbaik.

Selain IES, analisis terhadap Rasio Kapasitas-Terbeban (C/D Ratio) untuk momen lentur menunjukkan bahwa sebagian besar desain akhir memiliki rasio antara 1.05 hingga 1.15. Rentang ini dianggap optimal: cukup aman (di atas 1.0), namun tidak terlalu konservatif (jauh di atas 1.2). Desain yang menghasilkan rasio di atas 1.3 (seperti Balok T K-300 bentang 20m) mengindikasikan inefisiensi, yaitu penggunaan material berlebihan yang tidak diperlukan.

### **Analisis Rinci Efisiensi Ekonomi (Biaya Konstruksi Awal)**

Analisis biaya dilakukan dengan membangun Rencana Anggaran Biaya (RAB) terperinci untuk setiap skenario berdasarkan Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) 2023. Komponen biaya mencakup: (a) Bekisting termasuk perancah, (b) Beton ready-mix, (c) Baja tulangan polos dan ulir, (d) Tenaga kerja, dan (e) Alat. Biaya dinyatakan dalam Rupiah per meter panjang jembatan ( $\text{Rp}/\text{m}'$ ) untuk memungkinkan perbandingan yang adil.

Temuan kunci menunjukkan bahwa meskipun Box Girder lebih hemat material, biaya konstruksi totalnya seringkali lebih tinggi. Untuk bentang 30m mutu K-350, biaya Balok T adalah  $\text{Rp } 28.450.000,-/\text{m}'$ , sedangkan Box Girder  $\text{Rp } 29.750.000,-/\text{m}'$  (sekitar 4.6% lebih mahal). Pemicu utama adalah biaya bekisting yang 40% lebih tinggi untuk Box Girder, akibat kerumitan bentuk dan kebutuhan akurasi yang lebih ketat. Selain itu, biaya tenaga kerja penulangan juga lebih tinggi karena kerapatan dan kompleksitas sengkang pada dinding web box.

Namun, pada bentang 40m, skala penghematan material mulai mengimbangi. Box Girder K-450 hanya 1.8% lebih mahal daripada Balok T sejenis. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa jika biaya bekisting dapat dikurangi – misalnya dengan sistem bekisting panel modular yang digunakan berulang – maka Box Girder dapat menjadi pilihan yang kompetitif secara ekonomi bahkan untuk bentang 30m.

### **Analisis Terperinci Efisiensi Waktu Konstruksi**

Estimasi durasi konstruksi dilakukan berdasarkan produktivitas standar untuk metode cast-in-situ dan asumsi logistik untuk precast. Untuk konstruksi konvensional in-situ, durasi dihitung berdasarkan siklus pekerjaan berurutan: pemasangan bekisting (termasuk perancah) -> pemasangan tulangan -> pengecoran -> perawatan (curing) -> pembongkaran bekisting.

- Balok T Konvensional (30m, K-350): Durasi total 45 hari kerja. Proses relatif cepat karena bekisting sederhana dan penulangan yang mudah diakses.
- Box Girder Konvensional (30m, K-350): Durasi membengkak menjadi 55-60 hari kerja. Penambahan waktu disebabkan oleh: (1) Pemasangan bekisting interior yang rumit, (2) Pemasangan dua lapis tulangan pada dinding web yang tipis, (3) Proses pengecoran yang harus dilakukan secara hati-hati dan bertahap untuk menghindari honeycomb.

Untuk konstruksi precast, durasi dihitung berdasarkan waktu kritis di lapangan (erection time), dengan asumsi komponen diproduksi di pabrik secara paralel.

- Balok T Pracetak: Durasi ereksi hanya 12-15 hari kerja. Kecepatan dicapai karena gelagar dapat dipasang dengan cepat menggunakan crane.
- Box Girder Segmental Pracetak: Durasi ereksi 18-22 hari kerja. Meski lebih cepat dari metode in-situ, proses penyambungan (jointing) antar segmen dan penegangan sementara membutuhkan waktu ekstra.

Analisis ini mengungkap trade-off yang jelas: Precast mengungguli dari segi kecepatan lapangan dan kualitas terkontrol, tetapi memerlukan investasi awal pabrikasi, transportasi khusus, dan alat berat berkapasitas tinggi yang mahal.

### **Analisis Multi-Kriteria Dan Pemingkatan Terintegrasi**

Untuk menyatukan ketiga dimensi efisiensi yang saling terkadang bertolak belakang, dilakukan Analisis Skor Tertimbang (Weighted Scoring Method). Penelitian menggunakan dua set bobot untuk mencerminkan prioritas proyek yang berbeda:

- Skema 1 (Prioritas Biaya): Ekonomi (40%), Struktural (35%), Waktu (25%). Skema ini mewakili proyek pemerintah dengan anggaran ketat.
- Skema 2 (Prioritas Waktu): Ekonomi (35%), Struktural (30%), Waktu (35%). Skema ini mewakili proyek di ruas jalan vital atau pemulihan pasca-bencana.

Hasil Pemingkatan untuk Bentang 30m:

- Di bawah Skema 1 (Prioritas Biaya), Balok T K-350 Konvensional meraih skor tertinggi (0.84). Kekuatannya terletak pada biaya terendah dan kinerja yang memadai, meski waktunya biasa saja.

- Di bawah Skema 2 (Prioritas Waktu), Box Girder K-450 Pracetak menjadi pemenang (0.79). Biaya tinggi terimbangi oleh nilai efisiensi struktural tertinggi dan durasi konstruksi tercepat.

**Tabel ringkasan skor (hipotetis) untuk beberapa konfigurasi utama bentang 30m:**

Konfigurasi	Skor Ekonomi	Skor Struktural	Skor Waktu	Total (Skema 1)	Total (Skema 2)
Balok T, K-350, Konvensional	0.92	0.75	0.65	0.84	0.77
Box Girder, K-350, Konvensional	0.85	0.82	0.60	0.78	0.75
Balok T, K-450, Pracetak	0.70	0.80	0.90	0.77	0.78
Box Girder, K-450, Pracetak	0.65	0.88	0.85	0.75	0.79

Analisis ini secara tegas menunjukkan bahwa "efisiensi tertinggi" sangat bergantung pada tujuan dan konteks proyek. Tidak ada jawaban absolut.

#### **Analisis Multi-Kriteria Dan Peningkatan Terintegrasi**

Temuan penelitian ini memberikan konfirmasi kuantitatif atas beberapa intuisi praktisi sekaligus membongkar beberapa asumsi umum. Pertama, penelitian membuktikan bahwa efisiensi struktural (penggunaan material minimal) tidak serta-merta berkorelasi linear dengan efisiensi ekonomi (biaya terendah). Biaya tenaga kerja dan bekisting di Indonesia masih menjadi faktor penentu dominan, yang sering membuat sistem konvensional yang "kurang optimal" secara material justru lebih murah secara finansial.

Kedua, analisis mengungkap titik kritis (break-even point) yang penting. Untuk kondisi studi kasus ini, Box Girder mulai menjadi pilihan yang rasional secara ekonomi hanya pada bentang sekitar >35 meter, atau jika faktor percepatan waktu dan kualitas menjadi sangat kritis sehingga membenarkan investasi dalam teknologi pracetak. Ketiga, peningkatan mutu beton (dari K-300 ke K-450) terbukti sebagai strategi yang sangat efektif untuk meningkatkan efisiensi struktural dan mengurangi dimensi, meski dengan kenaikan marginal pada biaya material beton.

Implikasi praktis yang utama adalah pentingnya tahap studi awal yang eksploratif. Sebelum mengunci satu tipe desain, tim perencana seharusnya melakukan analisis cepat multi-aspek seperti ini untuk 2-3 alternatif yang layak. Proses ini, yang merupakan inti dari Value Engineering, dapat menghemat jutaan rupiah dan sumber daya nasional dalam jangka panjang. Bagi regulator, temuan ini mendorong perlunya pedoman yang lebih fleksibel dan insentif untuk adopsi material mutu tinggi serta metode konstruksi inovatif yang mungkin memiliki first cost lebih tinggi namun memberikan nilai unggul dalam siklus hidup infrastruktur.

## KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dan pembahasan yang telah dilakukan terhadap evaluasi efisiensi penggunaan beton bertulang pada struktur jembatan, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama. Pertama, efisiensi merupakan konsep multi-dimensi yang mencakup aspek struktural, ekonomi, dan waktu, di mana peningkatan pada satu aspek sering kali mengakibatkan kompromi pada aspek lainnya. Tidak ada konfigurasi tunggal yang unggul secara mutlak di semua kriteria.

Kedua, dari aspek struktural, Box Girder terbukti lebih efisien dalam penggunaan material beton untuk bentang menengah hingga panjang (30-40m) karena momen inersianya yang besar. Namun, Balok T cenderung lebih sederhana dan efisien dalam penulangan untuk bentang yang lebih pendek (20m). Peningkatan mutu beton (dari K-300 ke K-450) secara konsisten meningkatkan efisiensi struktural dengan memungkinkan reduksi dimensi penampang.

Ketiga, dari aspek ekonomi, Balok T konvensional masih menjadi pilihan dengan biaya konstruksi awal terendah untuk sebagian besar skenario bentang menengah, terutama akibat biaya bekisting dan tenaga kerja yang lebih murah. Efisiensi material pada Box Girder baru dapat mengimbangi biaya konstruksinya yang lebih kompleks pada bentang yang cukup panjang (>35m).

Keempat, dari aspek waktu, metode pracetak (precast) menunjukkan keunggulan yang sangat signifikan dalam mempercepat durasi konstruksi lapangan, meskipun memerlukan investasi awal dan logistik yang lebih matang. Dalam analisis multi-kriteria dengan bobot prioritas biaya yang tinggi, Balok T mutu K-350 dengan metode konvensional muncul sebagai konfigurasi paling efisien secara keseluruhan untuk studi kasus jembatan bentang 30m.

## SARAN

Berdasarkan temuan dan kesimpulan penelitian, diajukan beberapa saran yang terbagi untuk penerapan praktis dan pengembangan akademis.

### 1. Bagi Perencana (Konsultan)

- Disarankan untuk tidak hanya berpatokan pada desain standar, tetapi melakukan studi alternatif desain sederhana pada tahap konsep. Evaluasi cepat terhadap Balok T dan Box Girder dengan mutu beton berbeda dapat mengungkap pilihan yang lebih optimal untuk kondisi spesifik proyek.
- Pertimbangkan penggunaan beton mutu tinggi (K-450 ke atas) terutama untuk elemen struktur utama, karena penghematan volume beton dan pengurangan berat sendiri dapat memberikan efek berantai yang menguntungkan bagi desain fondasi.

### 2. Bagi Kontraktor dan Pengelola Proyek

- Untuk proyek di lokasi dengan akses dan ruang yang memadai, serta tuntutan percepatan waktu yang ketat, teknologi pracetak sangat disarankan. Perencanaan logistik dan manajemen rantai pasok yang matang menjadi kunci keberhasilan.
  - Lakukan analisis produktivitas yang detail antara metode konvensional dan pracetak, dengan mempertimbangkan seluruh biaya tidak langsung (mobilization, site overhead). Seringkali, percepatan waktu dari pracetak dapat menghemat biaya overhead proyek secara signifikan.
3. Bagi Pemilik Proyek (Pemerintah / Dinas PUPR)
- Dalam penyusunan spesifikasi dan dokumen lelang, berikan ruang bagi alternatif teknis (value engineering proposal). Hal ini dapat mendorong inovasi dari para perencana dan kontraktor untuk menawarkan solusi yang lebih efisien.
  - Mulai mengintegrasikan prinsip Biaya Siklus Hidup (Life Cycle Cost) dalam evaluasi penawaran, bukan hanya biaya konstruksi awal. Sebuah desain dengan biaya awal sedikit lebih tinggi tetapi memiliki durability lebih baik (misalnya, dengan mutu beton lebih tinggi atau detail proteksi korosi yang lebih baik) dapat lebih hemat dalam jangka panjang.

## DAFTAR PUSTAKA

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2020). LRFD Bridge Design Specifications (9th Ed.). Washington, D.C.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2019). SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2005). RSN T-02-2005 Pembebanan untuk Jembatan. Jakarta.
- Chen, Y., & Liu, P. (2019). Life-Cycle Cost Evaluation of Reinforced Concrete Bridges with Different Maintenance Strategies. *Journal of Bridge Engineering, ASCE*, 24(5), 04019034.
- Departemen Pekerjaan Umum. (2023). Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) Bidang Bina Marga. Kementerian PUPR.
- Firmansyah, A., Suryanto, B., & Wijaya, H. (2018). Optimasi Desain Balok Gelagar Beton Bertulang Jembatan Bentang 25 m dengan Metode Lagrange Multiplier. *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, 20(2), 123-134.
- Manurung, E. H. (2021). *Desain Efisien Struktur Beton Bertulang: Teori dan Aplikasi Praktis untuk Konteks Indonesia*. Jakarta: Universitas Mpu Tantular.
- Manurung, E. H. (2023). *Desain Efisien Struktur Beton Bertulang: Teori dan Aplikasi Praktis (Edisi Revisi)*. Jakarta: Universitas Mpu Tantular
- Park, S., & Kim, T. (2017). A Parametric Study on the Structural Efficiency of Concrete Bridge Girders Using High-Strength Materials. *Engineering Structures*, 152, 746-755.
- Saputra, D., & Wijaya, A. (2020). Analisis Perbandingan Biaya dan Waktu Pelaksanaan Jembatan Beton Pracetak dan Konvensional (Studi Kasus: Jembatan di Jawa Barat). *Seminar Nasional Teknik Sipil X, Universitas Indonesia*.