

**LAPORAN AKHIR**  
**PENELITIAN INTERNAL DOSEN**  
**Progam Studi Teknik Sipil Fakultas Sains dan Teknik**



**ANALISIS KINERJA ELEMEN HINGGA PADA JEMBATAN BETON**  
**PRATEKAN PASCATARIK BERGROUTING DENGAN KONDISI**  
**TUMPUAN SENDI-ROL**

**Tim Peneliti:**  
**Toni Budi Santoso, S.T., M.T**

*Dibiayai oleh:*  
*Universitas Bojonegoro*  
*Tahun Anggaran 2025/2026*

**UNIVERSITAS BOJONEGORO**

**2026**

## HALAMAN PENGESAHAN

### LAPORAN AKHIR PENELITIAN PENDANAAN PERGURUAN TINGGI

1. **Judul Penelitian** : Analisis Kinerja Elemen Hingga pada Jembatan Beton Pratekan Pascatarik BergROUTING dengan Kondisi Tumpuan Sendi–Rol
2. **Ketua Peneliti**
  - a. Nama Peneliti : Toni Budi Santoso, S.T., M.T
  - b. NIDN : 0727019302
  - c. Program Studi : Teknik Sipil
  - d. E-mail : prawoto.poni@gmail.com
  - e. Bidang Keilmuan : Struktur
3. **Anggota Peneliti 1**
  - a. Nama (Dosen) : M. Zainul Ikhwan, S.T., M.T
  - b. NIDN : 0729049501
  - c. Program Studi : Teknik Sipil
  - d. E-mail : zaeny.ikhwan@gmail.com
  - e. Bidang Keilmuan : Teknik Sipil
- Anggota Peneliti 2**
  - a. Nama (Mahasiswa) : Jamilatus Sariroh
  - b. NIM : 23222011103
  - c. Program Studi : Teknik Sipil
  - d. E-mail : sariroh\_js@gmail.com
  - e. Bidang Keilmuan : Teknik Sipil
4. Jangka Waktu Penelitian : 6 Bulan
6. Lokasi Penelitian : Bojonegoro
7. Dana Diusulkan : Rp. 3.500.000,00

Bojonegoro, 24 Februari 2026

**Mengetahui,**  
Ketua LPPM Universitas Bojonegoro

Pengusul,

**Dr. Laily Agustina Rahmawati, S.Si., M.Sc.**  
NIDN 0721088601

**Toni Budi Santoso, S.T., M.T**  
NIDN. 0727019302

## **KATA PENGANTAR**

Alhamdulillah dengan mengucapkan puji syukur kepada Allah SWT atas segala karunia, rahmat, dan ridho-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan akhir penelitian yang berjudul “Analisis Kinerja Elemen Hingga pada Jembatan Beton Pratekan Pascatarik BergROUTING dengan Kondisi Tumpuan Sendi–Rol”.

Dalam proses penyusunan laporan akhir penelitian, penulis terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu. Untuk itu, dengan penuh rasa hormat penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya atas semua bantuan dan kerjasamanya yang telah diberikan baik secara langsung maupun tidak langsung selama penyusunan laporan akhir penelitian ini. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada yang terhormat:

1. Orang tua dan istri yang telah memberi dukungan, baik secara moril materiil yang tak terhingga sehingga penulis bisa menyusun laporan akhir penelitian.
2. Dosen dilingkungan Fakultas Sains dan Teknik Universitas Bojonegoro yang telah membantu dalam berdiskusi untuk penyusunan laporan akhir penelitian ini.
3. Semua pihak yang tidak bisa saya sebutkan namanya satu-persatu, yang telah membantu, memberi dukungan dan semangat dalam penyusunan laporan akhir penelitian ini.

Semoga Alloh SWT membalas semua kebaikan, dukungan, dan kesabaran yang telah diberikan. Selanjutnya penulis menyadari bahwa dalam penyusunan masih banyak kekurangan dan jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun demi sempurnanya penyusunan laporan akhir penelitian ini. Semoga tulisan ini dapat memberikan manfaat bagi para pembaca dan semua pihak.

Bojonegoro, 24 Februari 2026

Toni Budis Santoso, S.T., M.T

## DAFTAR ISI

### BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang .....	6
1.2 Rumusan Masalah .....	8
1.3 Tujuan Penelitian .....	9
1.5 Manfaat Penelitian .....	10

### BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori.....	12
2.1.1 Jembatan Beton Pratekan .....	12
2.1.2 Jenis Tendon dan Sistem Duct .....	13
2.1.3 Sistem Grouting pada tendon Pasca Tarik .....	15
2.1.4 Kehilangan Prategang (Prestress Losses).....	17
2.1.5 Pembebanan Jembatan .....	20
2.1.6 Sistem Perletakan Sendi–Rol .....	22
2.1.7 Perilaku Lendutan dan Tegangan.....	24
2.2 Penelitian Terdahulu .....	27

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian.....	29
3.2 Lokasi Penelitian.....	31
3.3 Jenis Data dan Teknik Pengumpulan Data.....	31
3.4 Analisa Data .....	32

### BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil .....	35
4.1.1 Penampang Non-Komposit (Balok Pracetak).....	36
4.1.2 Analisis Pembebanan Struktur .....	39
4.1.3 Properti Penampang Komposit .....	42
4.1.4 Evaluasi Kemampuan Layan.....	47
4.1.5 Analisis Kehilangan Prategang .....	51
4.2 Pembahasan.....	52

### BAB V KESIMPULAN

## **DAFTAR TABEL**

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu .....	27
Tabel 4.1 Hasil analisis geometri .....	37
Tabel 4.2 Rekapitulasi Beban pada Balok .....	39
Tabel 4.3 Properti Penampang Komposit .....	43
Tabel 4.4 Gaya Prategang Maksimum .....	49

## RINGKASAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengevaluasi kinerja struktur balok beton pratekan metode pascatarik (post-tensioned) pada jembatan bentang 40 m dengan sistem perletakan sendi-rol. Perencanaan struktur mengacu pada ketentuan Badan Standardisasi Nasional melalui SNI 1725:2016 untuk pembebanan jembatan serta SNI T-12-2004 untuk ketentuan beton pratekan. Analisis dilakukan terhadap tiga kondisi utama, yaitu kondisi jacking, kondisi sebelum komposit (pengecoran pelat), dan kondisi komposit pada beban layan penuh. Hasil analisis menunjukkan bahwa penampang non-komposit memiliki momen inersia sebesar  $5,93 \times 10^{11} \text{ mm}^4$  yang meningkat menjadi  $8,63 \times 10^{11} \text{ mm}^4$  setelah bekerja secara komposit dengan pelat lantai, atau mengalami peningkatan kekakuan sekitar 45%. Momen maksimum akibat kombinasi beban mati dan beban hidup diperoleh sebesar  $13,64 \times 10^9 \text{ Nmm}$  di tengah bentang. Kontrol tegangan menunjukkan bahwa kondisi kritis terjadi pada serat bawah balok. Gaya prategang maksimum yang memenuhi batas tegangan izin adalah sebesar 11.403,74 kN, sedangkan gaya prategang efektif setelah memperhitungkan kehilangan prategang sebesar 23,39% adalah 8.618,28 kN. Seluruh tegangan yang terjadi pada kondisi awal maupun layan masih berada dalam batas tegangan izin tekan dan tarik yang dipersyaratkan standar. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa sistem balok beton pratekan pascatarik yang direncanakan memenuhi persyaratan kekuatan dan layanan untuk bentang 40 m. Peningkatan kapasitas lentur akibat aksi komposit terbukti signifikan dalam meningkatkan performa struktur dan mengontrol tegangan tarik pada serat bawah balok.

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Pembatan merupakan salah satu komponen penting dalam sistem jaringan transportasi yang berfungsi sebagai penghubung antarwilayah, mempersingkat jarak tempuh, serta mendukung pertumbuhan ekonomi dan distribusi logistik. Kebutuhan terhadap jembatan yang aman, efisien, dan memiliki usia layan panjang semakin meningkat seiring perkembangan beban lalu lintas, khususnya akibat pertumbuhan kendaraan berat yang signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Kondisi ini menuntut adanya inovasi dalam metode perencanaan dan teknologi struktur jembatan yang mampu memberikan kinerja unggul pada berbagai kondisi pelayanan.

Salah satu teknologi struktur yang banyak diterapkan pada jembatan bentang menengah hingga panjang adalah beton pratekan, khususnya sistem pascatarik (post-tensioning). Metode ini memberikan sejumlah keunggulan, antara lain peningkatan kapasitas lentur, pengurangan retak, kontrol lendutan, efisiensi penampang, dan ketahanan terhadap beban berulang (fatigue). Dalam sistem pascatarik, tendon dipasang setelah beton mengeras, kemudian diberi gaya tarik (jacking), dan selanjutnya diisi dengan grout. Proses grouting tendon memiliki fungsi penting untuk memberikan ikatan yang efektif antara tendon dan beton, mencegah korosi, serta meningkatkan kinerja struktur dalam jangka panjang. Dengan demikian, perencanaan tendon pascatarik tidak hanya mempertimbangkan konfigurasi geometris, tetapi juga mekanisme transfer gaya dan kehilangan prategang yang terjadi pada berbagai tahapan.

Pada jembatan bentang menengah, elemen utama struktur umumnya berupa balok pratekan komposit dengan pelat lantai beton bertulang. Sistem komposit ini memberikan keuntungan berupa peningkatan kekakuan dan kapasitas momen lentur, namun sekaligus menambah kompleksitas analisis karena melibatkan perubahan penampang pada tahap konstruksi dan tahap layan. Oleh karena itu,

diperlukan evaluasi mendalam terkait perilaku struktur pada kondisi non-komposit (initial stage) hingga perilaku pada kondisi komposit penuh (final stage). Parameter seperti distribusi momen, tegangan pada serat atas dan bawah, serta deformasi perlu dianalisis secara teliti untuk memastikan bahwa struktur bekerja dalam batas aman sesuai dengan standar yang berlaku, seperti SNI 1725:2016 untuk pembebanan jembatan dan SNI T-12-2004 untuk perencanaan struktur beton pratekan.

Salah satu tantangan utama dalam perencanaan beton pratekan pascatarik adalah kehilangan prategang (prestress losses), yang dapat mencapai lebih dari 20% dari gaya awal. Kehilangan prategang dapat berasal dari dua kelompok besar, yaitu kehilangan langsung (immediate losses) seperti friksi, wobble, dan slip pada ankur, serta kehilangan tidak langsung (long-term losses) seperti susut beton, rangkai beton, dan relaksasi baja prategang. Ketidakkuratan dalam perhitungan kehilangan prategang dapat menyebabkan gaya efektif ( $F_e$ ) yang bekerja pada struktur menjadi tidak sesuai desain, sehingga struktur berpotensi mengalami tegangan berlebih, lendutan yang tidak direncanakan, ataupun kapasitas yang berkurang. Oleh karena itu, penentuan gaya efektif yang tepat menjadi aspek krusial dalam perencanaan jembatan pascatarik.

Selain mekanisme prategang, sistem perletakan (bearing system) juga menjadi komponen penting dalam menentukan respons struktur jembatan. Penggunaan tumpuan sendi-rol (pin-roller support) banyak diterapkan untuk memberikan keleluasaan pergerakan horizontal akibat perubahan suhu, susut, rangkai, atau pengaruh beban vertikal. Sistem ini juga berfungsi untuk mengontrol reaksi vertikal sehingga distribusi gaya dalam dapat dianalisis secara lebih realistis. Namun demikian, pemilihan sistem tumpuan harus dipadukan secara tepat dengan konfigurasi tendon dan geometri penampang agar tidak terjadi konsentrasi tegangan atau gaya yang melebihi batas izin.

Dengan memperhatikan seluruh kompleksitas tersebut, dapat dipahami bahwa perencanaan jembatan beton pratekan pascatarik yang digrouting membutuhkan analisis yang komprehensif, mulai dari pembebanan, distribusi

momen, kontrol tegangan awal, kehilangan prategang, perilaku komposit, hingga respons struktur pada sistem perletakan sendi-rol. Desain yang tidak mempertimbangkan secara rinci aspek-aspek tersebut berpotensi menimbulkan masalah pada tahap konstruksi maupun masa layanan, seperti retak dini, lendutan berlebih, atau penggunaan material yang tidak efisien.

Dari sisi akademik, penelitian terkait perencanaan jembatan pascatarik masih memerlukan penguatan khususnya dalam hal analisis mendalam terhadap kombinasi pembebanan, distribusi tegangan pada berbagai tahap konstruksi, evaluasi kehilangan prategang yang realistis, serta interaksi antara sistem komposit dan sistem perletakan. Oleh karena itu, penelitian ini menjadi relevan dan penting untuk dilakukan sebagai upaya memberikan kontribusi ilmiah sekaligus teknis bagi peningkatan kualitas desain jembatan di Indonesia.

Dengan demikian, penelitian ini diarahkan untuk memberikan analisis menyeluruh terhadap perilaku jembatan beton pratekan pascatarik bergROUTING dengan tumpuan sendi-rol, guna memastikan bahwa struktur bekerja sesuai dengan ketentuan dan memiliki kinerja optimal selama masa layan. Penelitian ini diharapkan dapat memperkuat dasar teori dan memberikan panduan teknis bagi pengembangan jembatan pratekan pada masa mendatang.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Pembangunan jembatan dengan sistem beton pratekan pascatarik terus berkembang seiring meningkatnya kebutuhan terhadap struktur yang kuat, efisien, dan memiliki kinerja jangka panjang yang baik. Penggunaan tendon pascatarik yang digROUTING, penampang komposit balok-pelat, serta sistem perletakan sendi-rol memerlukan analisis perencanaan yang cermat agar memastikan perilaku struktur memenuhi ketentuan desain dan standar yang berlaku. Kompleksitas tersebut menuntut kajian yang mendalam terhadap pembebanan, tegangan awal, kehilangan prategang, konfigurasi tendon, serta respons struktur pada berbagai tahapan konstruksi dan kondisi layan. Oleh karena itu, diperlukan perumusan masalah yang

jelas untuk mengarahkan penelitian ini secara terfokus dan sistematis. Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Bagaimana karakteristik pembebanan (beban mati, mati tambahan, dan beban lalu lintas) memengaruhi distribusi momen dan gaya dalam pada jembatan beton pratekan pascatarik dengan bentang 40 meter?
2. Bagaimana perilaku tegangan awal pada kondisi jacking, pengecoran, dan kondisi komposit dapat dikontrol agar tidak melampaui tegangan batas sesuai SNI 1725:2016 dan SNI T-12-2004?
3. Sejauh mana kehilangan prategang (friksi, wobble, selip angkur, susut, rangkai, dan relaksasi) memengaruhi besarnya gaya prategang efektif (Fe) serta kinerja struktur pada tahap layan?
4. Bagaimana pengaruh geometri penampang dan eksentrisitas tendon terhadap distribusi tegangan dan kinerja komposit balok–pelat pada jembatan pascatarik?
5. Apakah sistem perletakan sendi–rol pada jembatan ini memberikan respons struktural yang aman dan memenuhi syarat pada kondisi momen maksimum maupun minimum?

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diidentifikasi, diperlukan arah penelitian yang jelas untuk memastikan bahwa setiap isu teknis yang muncul dalam perencanaan jembatan beton pratekan pascatarik dapat dikaji dan dijawab secara sistematis. Penetapan tujuan penelitian ini menjadi langkah penting untuk menentukan fokus analisis, ruang lingkup evaluasi, serta hasil yang ingin dicapai agar penelitian memberikan kontribusi nyata baik secara teoretis maupun praktis dalam desain struktur jembatan. Oleh karena itu, tujuan penelitian dirumuskan sebagai berikut.

1. Menganalisis pengaruh kombinasi pembebanan terhadap momen, gaya lintang, dan respons global jembatan beton pratekan pascatarik bentang 40 meter.

2. Menentukan dan mengevaluasi tegangan awal yang terjadi pada kondisi jacking, pengecoran, hingga kondisi komposit sehingga memenuhi batas tegangan izin sesuai standar perencanaan.
3. Menghitung besar kehilangan prategang total dan mendapatkan nilai gaya prategang efektif ( $F_e$ ) yang akurat sebagai dasar evaluasi kinerja struktur pada tahap layan.
4. Menganalisis pengaruh eksentrisitas tendon dan karakteristik penampang komposit terhadap distribusi tegangan dan peningkatan kekakuan struktural.
5. Mengevaluasi perilaku struktur pada sistem perletakan sendi–rol untuk memastikan keamanan, kenyamanan, dan kinerja optimum pada kondisi pembebanan maksimum maupun minimum.

#### **1.4 Manfaat Penelitian**

Setelah tujuan penelitian dirumuskan dengan jelas, penting untuk menjelaskan manfaat yang dapat diperoleh dari pelaksanaan penelitian ini. Manfaat penelitian tidak hanya menggambarkan kontribusi teoritis terhadap pengembangan ilmu pengetahuan, tetapi juga menunjukkan relevansi praktis bagi perencana, pelaksana, maupun pihak terkait dalam desain jembatan beton pratekan. Oleh karena itu, uraian manfaat berikut disusun untuk memberikan gambaran mengenai nilai tambah yang dihasilkan dari pencapaian tujuan penelitian tersebut.

1. Memberikan pemahaman yang lebih akurat mengenai pengaruh pembebanan (beban mati, mati tambahan, dan lalu lintas) terhadap momen dan respons struktur pada jembatan beton pratekan bentang 40 meter, sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam desain jembatan serupa.
2. Menghasilkan pedoman teknis untuk mengontrol tegangan awal pada tahap jacking, pengecoran, dan komposit, agar tetap berada dalam batas tegangan izin sesuai SNI, sehingga meningkatkan keamanan proses konstruksi.

3. Memberikan informasi kuantitatif tentang besarnya kehilangan prategang dan pengaruhnya terhadap gaya prategang efektif ( $F_e$ ), sehingga memudahkan perencana dalam menentukan kebutuhan tendon yang optimal.
4. Memberikan evaluasi yang jelas tentang pengaruh eksentrisitas tendon dan geometri penampang komposit terhadap distribusi tegangan dan kekakuan struktur, sehingga membantu optimasi desain penampang balok pratekan.
5. Memberikan rekomendasi terhadap kinerja sistem perletakan sendi-rol pada kondisi pembebanan maksimum dan minimum, sehingga dapat memastikan bahwa sistem tumpuan yang digunakan aman dan layak diterapkan.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Landasan Teori**

Landasan teori berisi konsep-konsep dasar yang mendukung analisis dan perencanaan jembatan beton pratekan pascatarik. Teori-teori ini menjadi fondasi utama dalam menjawab rumusan masalah dan mengarahkan metodologi penelitian.

##### **2.1.1 Jembatan Beton Pratekan**

Jembatan beton pratekan merupakan jenis jembatan yang elemen struktur utamanya—baik balok, girder boks, slab, maupun komponen lainnya—memanfaatkan gaya prategang (*prestressing force*) untuk meningkatkan kapasitas struktur. Teknologi beton pratekan dikembangkan untuk mengatasi kelemahan dasar beton yang kuat terhadap tekan tetapi lemah terhadap tarik. Dalam konstruksi jembatan, beton pratekan sangat penting karena mampu mengurangi retak akibat tarik, meningkatkan kekakuan, serta memungkinkan penggunaan bentang yang lebih panjang dengan dimensi struktur yang lebih ramping dibanding beton bertulang biasa.

Secara umum, konsep beton pratekan adalah memberikan gaya tekan awal pada beton guna mengimbangi gaya tarik yang timbul ketika struktur menerima beban layan. Dengan demikian, bagian beton yang biasanya mengalami tarik dapat ditekan terlebih dahulu sehingga struktur bekerja lebih efisien dan aman. Ada dua mekanisme dasar sistem prategang, yaitu:

##### **1. Sistem Pratarik (*Pre-tensioning*)**

Dalam sistem pratarik, baja prategang ditarik sebelum pengecoran beton. Ketika beton mengeras, gaya prategang ditransfer ke beton melalui ikatan sepanjang panjang baja. Sistem ini umum untuk elemen pracetak, seperti balok girder pratekan, pelat hollow core, dan tiang pancang.

Ciri-ciri pratarik:

1. tendon melekat penuh pada beton setelah transfer,

2. produksi dilakukan di pabrik,
3. kualitas sangat terkontrol,
4. efisien untuk produksi masal.

## 2. Sistem Pascatarik (Post-tensioning)

Pada sistem pascatarik, tendon dimasukkan ke dalam duct yang ditanam di dalam beton. Setelah beton mencapai kekuatan yang cukup, tendon ditarik menggunakan jack hidrolis, lalu dikunci menggunakan angkur (anchorage system). Setelah itu, duct diisi dengan grout semen untuk melindungi tendon dan menambah ikatan.

Sistem pascatarik digunakan secara luas pada jembatan bentang menengah–panjang karena memberikan fleksibilitas tinggi dalam konfigurasi tendon dan desain penampang.

Keunggulan sistem pascatarik untuk jembatan:

1. mampu mengakomodasi profil tendon melengkung mengikuti momen lentur,
2. memudahkan pelaksanaan di lokasi (cast in place),
3. memungkinkan perkuatan terhadap beban berat,
4. dapat digunakan pada girder boks, balok I, atau monolit.

### 2.1.2 Jenis Tendon dan Sistem Duct

Dalam konstruksi beton pratekan, terutama pada sistem pascatarik (post-tensioning), tendon dan duct merupakan dua komponen utama yang menentukan keberhasilan transfer gaya prategang dari baja ke elemen beton. Tendon berfungsi sebagai elemen tarik bertegangan tinggi yang menghasilkan gaya tekan awal pada beton, sedangkan duct berfungsi sebagai saluran tempat tendon ditempatkan sebelum dilakukan penegangan. Keduanya harus direncanakan dengan cermat agar profil tendon, eksentrisitas, serta mekanisme transfer gaya dapat berjalan sesuai yang direncanakan.

Tendon pada beton pratekan umumnya berupa baja mutu tinggi yang memiliki kekuatan tarik sangat besar, dengan nilai ultimate tensile strength mencapai 1860 MPa. Jenis tendon yang paling banyak digunakan pada

jembatan pascatarik adalah seven-wire strand atau strand 7-wire, yaitu tendon yang terdiri dari satu kawat pusat dan enam kawat spiral yang melilit di sekelilingnya. Konfigurasi ini memberikan kombinasi kekuatan dan fleksibilitas yang sangat baik, sehingga tendon mampu mengikuti profil lengkung pada duct serta dapat menahan gaya jacking yang besar tanpa mengalami deformasi signifikan. Strand yang umum digunakan memiliki diameter 12,7 mm dan 15,24 mm, di mana ukuran 15,24 mm menjadi pilihan standar pada struktur jembatan bentang menengah hingga panjang karena kapasitas tariknya lebih tinggi dan efisiensi penampangannya lebih baik.

Selain strand, terdapat jenis tendon lain seperti kawat baja prategang tunggal (prestressing wire) dan batang baja prategang (prestressing bar). Namun kedua jenis tersebut umumnya digunakan pada elemen pracetak atau aplikasi khusus, dan tidak menjadi pilihan utama untuk sistem pascatarik pada jembatan karena kurang fleksibel dan tidak mampu mengikuti profil lengkung tendon secara optimal. Dengan demikian, penggunaan strand 7-wire menjadi standar internasional untuk pekerjaan jembatan pascatarik karena memiliki karakteristik mekanis yang paling sesuai dengan kebutuhan desain lentur dan profil tendon yang kompleks.

Sementara itu, duct merupakan komponen pelindung yang berfungsi sebagai jalur tendon sebelum diberi tegangan. Duct dipasang di dalam beton mengikuti profil lengkung tendon yang direncanakan untuk mengimbangi momen lentur sepanjang bentang jembatan. Terdapat dua jenis duct yang paling umum digunakan, yaitu duct baja bergelombang dan duct HDPE bergelombang. Duct baja memiliki kelebihan berupa kekuatan dan kekakuan yang tinggi serta kemampuan menahan tekanan grouting, namun lebih rentan terhadap korosi dan menambah bobot struktur. Sebaliknya, duct HDPE memiliki keunggulan berupa ketahanan korosi yang sangat baik, fleksibilitas tinggi, bobot ringan, serta permukaan dalam yang lebih halus sehingga mengurangi gesekan antara tendon dan duct saat proses jacking. Karakteristik tersebut membuat duct HDPE semakin banyak dipilih pada

jembatan modern, terutama pada struktur segmental atau jembatan dengan profil tendon yang sangat melengkung.

Keberadaan duct juga berfungsi memastikan tendon tetap berada pada posisi eksentris yang telah direncanakan terhadap sumbu netral penampang. Eksentrisitas tendon berpengaruh langsung terhadap kemampuan prategang dalam menghasilkan momen internal yang dapat mengimbangi momen akibat beban luar. Setelah proses penegangan selesai, duct akan diisi dengan grout untuk memenuhi rongga di sekitar tendon. Proses grouting bertujuan menciptakan ikatan tambahan antara beton dan tendon serta memberikan perlindungan terhadap korosi sehingga tendon dapat bekerja secara aman dalam jangka panjang.

Dengan demikian, jenis tendon dan sistem duct memiliki peran fundamental dalam kinerja struktur beton pratekan. Pemilihan material tendon yang kuat dan fleksibel, serta duct yang aman dan tahan lama, merupakan prasyarat utama agar struktur jembatan bekerja optimal sesuai desain. Pemahaman mengenai karakteristik tendon dan duct ini menjadi bagian penting dalam landasan teori penelitian terkait perencanaan jembatan beton pratekan pascatarik dengan sistem grouting, khususnya dalam aspek analisis tegangan, profil tendon, kehilangan prategang, serta kinerja struktur secara keseluruhan.

### **2.1.3 Sistem Grouting pada Tendon Pascatarik**

Sistem grouting pada tendon pascatarik merupakan salah satu tahap paling penting dalam konstruksi beton pratekan, terutama pada jembatan yang menggunakan sistem post-tensioning internal. Grouting dilakukan setelah tendon diberi tegangan (jacking) dan dikunci oleh ankur. Proses ini bertujuan mengisi ruang antara tendon dan duct dengan material grout berbasis semen untuk menghasilkan ikatan yang efektif serta melindungi tendon dari pengaruh lingkungan. Keberhasilan grouting sangat berpengaruh terhadap performa jangka panjang struktur karena tendon merupakan elemen penahan gaya tarik utama yang menentukan besar kecilnya gaya prategang efektif.

Secara prinsip, grouting berfungsi untuk membentuk ikatan sekunder (secondary bond) antara tendon dan beton. Sebelum di-grout, gaya prategang pada sistem pascatarik hanya ditahan oleh angkur (anchorage system). Namun setelah grouting dilakukan, gaya dapat ditransfer secara lebih merata melalui gesekan dan lekatan sepanjang duct, sehingga kerja struktur menjadi lebih stabil dan tidak sepenuhnya bergantung pada sistem angkur. Hal ini sangat penting pada jembatan bentang panjang, karena perubahan temperatur, getaran akibat lalu lintas, dan beban dinamis dapat menimbulkan gaya berulang pada tendon. Keberadaan grout yang memadat di sekitar tendon membantu meredam pergerakan tersebut, sehingga mengurangi risiko kerusakan pada sistem angkur maupun infiltrasi air yang dapat memicu korosi baja.

Material grout umumnya menggunakan campuran semen, air, dan tambahan bahan kimia (admixture) untuk meningkatkan fluiditas, mengurangi segregasi, dan mempercepat kekuatan awal. Grout harus memiliki viskositas yang cukup rendah untuk dapat mengalir memenuhi seluruh ruang di dalam duct, namun juga harus memiliki kemampuan pemadatan dan kekuatan tekan yang memadai setelah mengeras. Standar internasional seperti PTI (Post-Tensioning Institute) dan AASHTO LRFD menetapkan persyaratan teknis terhadap karakteristik grout, seperti waktu ikat, kelelahan, bleedability, dan kekuatan tekan minimal untuk memastikan kualitas pengisian saluran tendon.

Selain menghasilkan ikatan mekanis, salah satu fungsi utama grouting adalah memberikan perlindungan korosi (corrosion protection). Tendon baja prategang memiliki kadar tegangan yang sangat tinggi, sehingga korosi ringan saja dapat menimbulkan penurunan kapasitas yang signifikan. Dalam kondisi basah atau lembap, terutama pada jembatan yang terpapar cuaca, air dapat masuk ke dalam duct apabila proses grouting tidak sempurna. Hal ini dapat menyebabkan korosi galvanik atau pitting corrosion pada tendon, yang sangat berbahaya karena kerusakan terjadi pada lokasi yang sulit terdeteksi. Oleh sebab itu, proses grouting harus dilakukan

dengan tekanan dan volume yang terkontrol untuk memastikan tidak ada rongga udara (void), segregasi, atau bagian duct yang tidak terisi.

Dari perspektif mekanika struktur, keberadaan grout juga berpengaruh pada respons lendutan, distribusi tegangan, dan ketahanan terhadap beban berulang (fatigue). Duct yang terisi grout sepenuhnya akan meningkatkan kekakuan lokal pada penampang, sehingga mengurangi efek slip antara tendon dan duct. Selain itu, ikatan penuh memungkinkan struktur lebih efektif dalam menahan gaya-gaya internal, sehingga kerja struktur pada kondisi komposit menjadi lebih andal. Sebaliknya, grouting yang tidak sempurna dapat menyebabkan sebagian tendon bekerja seperti sistem unbonded tendon yang responnya berbeda secara signifikan, terutama pada beban berlebih dan kondisi ultimate.

Proses grouting sendiri dilakukan melalui beberapa langkah utama, meliputi persiapan peralatan, pemeriksaan kebersihan duct, pencampuran grout dengan komposisi yang sesuai, penginjeksian grout melalui selang inlet dengan tekanan tertentu, serta memastikan bahwa grout keluar dari outlet dalam kondisi homogen. Pengujian bleedability dan kekuatan tekan sampel grout dilakukan untuk memastikan kualitas. Standard pelaksanaan merujuk pada PTI Specification for Grouting, AASHTO LRFD Section 5, dan SNI T-12-2004 sebagai acuan nasional untuk beton pratekan

#### **2.1.4 Kehilangan Prategang (Prestress Losses)**

Kehilangan prategang atau prestress losses merupakan salah satu aspek fundamental dalam perencanaan beton pratekan, terutama pada sistem pascatarik yang digunakan pada jembatan bentang menengah hingga panjang. Kehilangan prategang adalah berkurangnya gaya prategang dari nilai awal yang diberikan saat proses penegangan tendon (jacking force) menjadi gaya efektif yang bekerja pada beton selama masa layan struktur. Fenomena ini bersifat alamiah karena terjadi akibat mekanisme mekanis, fisik, maupun reologis dari beton dan baja prategang. Pemahaman yang tepat mengenai jenis dan besar kehilangan prategang sangat penting karena

gaya efektif ( $F_e$ ) merupakan parameter utama yang menentukan kekuatan lentur, kontrol retak, dan kestabilan struktur jembatan.

Secara umum, kehilangan prategang dibagi menjadi dua kelompok besar, yaitu kehilangan prategang langsung (*immediate losses*) dan kehilangan prategang jangka panjang (*long-term losses*). Kehilangan langsung terjadi dalam waktu singkat, yaitu selama proses penegangan atau segera setelah gaya prategang ditransfer ke beton. Sedangkan kehilangan jangka panjang terjadi secara bertahap selama umur struktur akibat perubahan sifat material dan kondisi lingkungan.

Kehilangan langsung (*immediate losses*) terdiri dari tiga mekanisme utama. Yang pertama adalah kehilangan akibat gesekan (*friction loss*), yang terjadi ketika tendon digerakkan di dalam duct yang melengkung atau tidak sempurna. Gesekan terjadi antara tendon dan dinding duct akibat dua faktor, yaitu kelengkungan profil tendon (*curvature effect*) dan ketidaksempurnaan duct seperti deviasi kecil atau penyimpangan geometris (*wobble effect*). Semakin besar lengkungan tendon, semakin besar kehilangan prategang yang terjadi. Yang kedua adalah kehilangan akibat slip ankur (*anchorage slip*). Pada saat ankur mengunci tendon setelah jacking, terdapat pergeseran kecil yang menyebabkan tendon mengalami pelepasan tegangan. Walaupun slip hanya beberapa milimeter, namun dapat menghasilkan penurunan gaya prategang yang signifikan, terutama pada tendon dengan panjang pendek hingga sedang. Yang ketiga adalah kehilangan akibat pemendekan elastis beton (*elastic shortening*), yaitu penurunan gaya prategang yang terjadi karena beton mengalami regangan tekan elastis setelah gaya prategang diberikan. Pada sistem pascatarik, mekanisme ini biasanya menghasilkan kehilangan yang relatif lebih kecil dibanding pratarik, tetapi tetap perlu diperhitungkan terutama jika jumlah tendon cukup banyak.

Sementara itu, kehilangan jangka panjang (*long-term losses*) disebabkan oleh perubahan sifat material beton dan baja selama umur struktur. Salah satu mekanisme utama adalah susut beton (*shrinkage*), yaitu

penyusutan volume beton akibat penguapan air bebas dalam beton. Susut menyebabkan tendon kehilangan sebagian gaya prategang karena panjang efektif beton berkurang. Mekanisme kedua adalah rangkai beton (creep), yaitu deformasi bertahap beton ketika menerima beban tekan jangka panjang, termasuk beban prategang itu sendiri. Rangkai beton menyebabkan regangan bertambah walau tegangan tetap, sehingga gaya prategang secara perlahan berkurang. Mekanisme ketiga adalah relaksasi baja prategang (relaxation), yaitu fenomena menurunnya tegangan tendon meskipun regangannya tetap. Baja prategang memiliki kecenderungan untuk “melepas” sebagian tegangan ketika berada dalam kondisi stres tinggi dalam jangka panjang, dan fenomena ini perlu diperhitungkan dalam desain agar gaya efektif tidak jauh lebih kecil dari perencanaan awal.

Secara keseluruhan, pada struktur jembatan pratekan, kehilangan prategang total dapat mencapai 20% hingga 30% dari gaya awal tergantung pada profil tendon, mutu beton, panjang tendon, kualitas duct, serta kondisi grouting. Oleh karena itu, perhitungan kehilangan prategang harus dilakukan secara teliti dengan mempertimbangkan seluruh mekanisme tersebut. Standar desain seperti SNI T-12-2004, PCI Design Handbook, AASHTO LRFD Bridge Design, serta pedoman Post-Tensioning Institute (PTI) menyediakan metode perhitungan yang dapat digunakan untuk menentukan nilai kehilangan prategang yang realistis untuk berbagai kondisi proyek.

Dalam konteks penelitian perencanaan jembatan beton pratekan, karakteristik kehilangan prategang merupakan aspek yang sangat penting karena menentukan besarnya gaya prategang efektif ( $F_e$ ) yang digunakan dalam analisis tegangan dan lendutan. Nilai  $F_e$  yang terlalu rendah dapat menyebabkan serat bawah beton mengalami tegangan tarik berlebih atau terjadinya lendutan yang tidak terkontrol, sedangkan nilai  $F_e$  yang terlalu tinggi dapat melampaui batas tegangan beton pada tahap jacking atau menyebabkan gaya tekan berlebih yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, pemahaman mendalam terhadap mekanisme kehilangan prategang dan

metode perhitungannya menjadi landasan teori yang esensial dalam analisis dan desain jembatan beton pratekan pascatarik dengan sistem grouting.

### **2.1.5 Pembebanan Jembatan**

Pembebanan jembatan merupakan salah satu aspek fundamental yang harus dianalisis secara cermat dalam perencanaan struktur, karena jembatan berfungsi menyalurkan beban dari lantai kendaraan menuju elemen struktural hingga ke sistem perletakan dan tanah dasar. Pada peraturan nasional, pembebanan jembatan diatur dalam SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan, yang menjadi acuan utama dalam menentukan jenis beban, kombinasi beban, serta faktor pengali yang digunakan dalam proses desain. Standar ini merupakan adopsi dan pengembangan dari standar internasional seperti AASHTO LRFD, sehingga mampu menggambarkan kondisi beban aktual pada jaringan jalan di Indonesia.

Secara umum, pembebanan jembatan terbagi menjadi beberapa kelompok besar, yaitu beban mati, beban mati tambahan, beban lalu lintas, serta beban lingkungan. Setiap jenis beban memiliki karakteristik dan pengaruh yang berbeda terhadap struktur, sehingga diperlukan pemahaman menyeluruh untuk memastikan bahwa desain jembatan memiliki tingkat keamanan dan keandalan yang memadai.

Beban mati (*dead load*) merupakan beban yang berasal dari berat sendiri struktur jembatan, termasuk balok girder, pelat lantai, parapet, dan elemen struktural lainnya. Berat ini bersifat konstan dan bekerja sepanjang umur jembatan. Dalam analisis balok pratekan, beban mati memainkan peranan penting karena menjadi sumber momen awal yang harus diimbangi oleh gaya prategang, terutama pada tahap konstruksi non-komposit. Oleh karena itu, perhitungan berat sendiri struktur dilakukan secara detail berdasarkan volume dan berat jenis setiap komponen.

Selain beban mati, terdapat pula beban mati tambahan atau *superimposed dead load* (SDL), yang mencakup beban dari lapisan perkerasan aspal, railing, utilitas, dan komponen non-struktural lainnya.

Beban dead load tambahan mulai bekerja setelah pelat lantai dicor dan mengeras sehingga hanya mempengaruhi struktur pada kondisi komposit. SDL memberikan pengaruh pada momen dan lendutan jangka panjang sehingga penempatannya dalam analisis sangat penting untuk memastikan bahwa struktur bekerja dalam batas tegangan yang diperbolehkan.

Beban utama yang harus diperhitungkan dalam desain jembatan adalah beban lalu lintas kendaraan, yang dalam SNI 1725:2016 terdiri atas Beban Truk Rencana (BTR) dan Beban Gandeng Traktor (BGT). BTR menggambarkan beban kendaraan berat tunggal, sedangkan BGT menggambarkan beban kendaraan gandeng dengan konfigurasi axle tertentu. Pembebanan lalu lintas ini bersifat dinamis dan bervariasi, sehingga standar menggunakan model beban idealisasi untuk memudahkan perhitungan namun tetap mewakili kondisi sebenarnya. Selain beban kendaraan, terdapat pula beban jalur pejalan kaki, beban rem, beban sentrifugal, serta beban angin akibat kendaraan, yang harus diperhitungkan sesuai fungsi jembatan. Pada jembatan pratekan, beban lalu lintas menjadi salah satu faktor utama dalam menentukan momen maksimum dan minimum yang menjadi dasar penentuan profil tendon.

Selain beban dari kendaraan, jembatan juga dikenakan berbagai beban lingkungan, seperti beban angin, suhu, gempa, dan susut-rangkas beton. Beban temperatur dapat menyebabkan pemuaian atau penyusutan panjang jembatan, sehingga sistem perletakan harus menyediakan ruang gerak yang cukup. Beban angin sangat berpengaruh pada jembatan dengan elevasi tinggi atau struktur gelagar kotak (box girder), sementara beban gempa dianalisis berdasarkan ketentuan SNI 2833:2016 atau SNI gempa terbaru, tergantung wilayah seismik pembangunan jembatan. Beban lingkungan ini tidak hanya mempengaruhi momen dan gaya lintang, tetapi juga mengubah distribusi gaya aksial dan respons deformasi struktur.

Dalam proses desain, seluruh beban tersebut tidak bekerja secara bersamaan, sehingga diperlukan kombinasi pembebanan untuk menentukan kondisi paling kritis pada struktur. Kombinasi pembebanan diatur dalam

SNI 1725:2016 dan melibatkan faktor beban (load factors) untuk kondisi ultimate dan faktor reduksi untuk kondisi layan. Kombinasi ini sangat penting untuk menghasilkan desain yang aman namun tetap efisien. Pada struktur pratekan, kombinasi beban digunakan untuk mengevaluasi tegangan pada tahap konstruksi, tahap jacking, dan tahap komposit, serta memastikan lendutan tidak melampaui batas yang ditetapkan.

Oleh karena itu, pembebanan jembatan merupakan landasan teori yang sangat penting dalam penelitian dan perencanaan jembatan beton pratekan. Beban mati, SDL, beban lalu lintas, dan beban lingkungan menjadi dasar penentuan momen internal yang harus diimbangi oleh gaya prategang, sehingga seluruh hasil analisis pembebanan akan berdampak langsung pada pemilihan profil tendon, perhitungan kehilangan prategang, evaluasi tegangan, serta penentuan kinerja struktur dalam jangka panjang. Tanpa analisis pembebanan yang akurat dan sesuai standar, desain jembatan berpotensi tidak aman atau tidak efisien. Oleh sebab itu, pembebanan jembatan menjadi salah satu aspek teori yang harus dipahami secara mendalam dalam konteks perencanaan jembatan beton pratekan pascatarik.

#### **2.1.6 Sistem Perletakan Sendi–Rol**

Sistem perletakan merupakan bagian penting dari struktur jembatan karena berfungsi untuk meneruskan gaya-gaya yang bekerja pada superstruktur ke substruktur, sekaligus mengontrol pergerakan yang terjadi akibat beban vertikal, suhu, susut, rangkak, maupun pergeseran tanah. Salah satu sistem perletakan yang paling umum digunakan pada jembatan bentang menengah adalah sistem perletakan sendi–rol (pin–roller bearing system). Sistem ini digunakan untuk memberikan kombinasi reaksi vertikal yang stabil dan kemampuan pergerakan horizontal yang diperlukan agar jembatan dapat berfungsi secara aman sepanjang umur layanannya.

Secara prinsip, perletakan sendi–rol terdiri dari dua jenis tumpuan, yaitu tumpuan sendi (pin support) dan tumpuan rol (roller support). Tumpuan sendi merupakan perletakan yang mampu menahan gaya vertikal dan gaya horizontal, namun tidak memberikan tahanan terhadap momen.

Dalam konteks jembatan, tumpuan sendi bekerja sebagai titik tetap (fixed bearing) yang menahan seluruh gaya horizontal akibat pengereman kendaraan, angin, gaya longitudinal dari lalu lintas, maupun perubahan suhu. Karena mampu mengendalikan gaya horizontal tersebut, tumpuan sendi umumnya ditempatkan pada salah satu ujung jembatan untuk bertindak sebagai referensi panjang struktur.

Sementara itu, tumpuan rol merupakan perletakan yang hanya mampu menahan gaya vertikal tetapi mengizinkan pergerakan horizontal. Tumpuan rol umumnya dirancang agar dapat bergerak secara longitudinal pada arah sumbu jembatan ataupun arah transversal jika diperlukan. Pergerakan yang diizinkan ini sangat penting karena jembatan mengalami perubahan panjang akibat pemuaian termal, susut beton, rangkai beton, deformasi akibat beban hidup, dan perubahan geometri akibat gaya prategang. Tanpa pergerakan yang cukup, perubahan panjang tersebut dapat menghasilkan gaya aksial atau gaya geser yang besar pada struktur, yang berpotensi menimbulkan kerusakan, retak, atau bahkan kegagalan lokal pada elemen jembatan maupun tumpuannya sendiri.

Dari sudut pandang analisis struktur, perletakan sendi-rol memberikan kondisi perletakan yang statis tertentu sehingga memudahkan perhitungan distribusi momen dan gaya dalam. Pada jembatan balok sederhana, kombinasi tumpuan sendi di satu ujung dan tumpuan rol di ujung lainnya memberikan kondisi struktur yang secara statis tertentu (statically determinate), sehingga reaksi tumpuan dapat dihitung dengan metode statika dasar tanpa memerlukan analisis tambahan akibat restrain atau kekakuan tumpuan. Kondisi statis tertentu ini menghindarkan timbulnya gaya dalam yang tidak diinginkan (secondary forces), terutama akibat perubahan temperatur atau deformasi lambat dari beton. Hal ini sangat penting pada jembatan beton pratekan karena profil tendon dan gaya prategang dapat memengaruhi deformasi struktur sepanjang umur layanan.

Dalam jembatan beton pratekan, penggunaan perletakan sendi-rol juga berperan dalam memastikan bahwa gaya prategang bekerja secara

efektif tanpa menghasilkan gaya longitudinal berlebih. Misalnya, ketika tendon ditarik, terjadi pemendekan elastis beton yang dapat menyebabkan perubahan panjang girder. Jika kedua ujung girder dikekang secara penuh oleh dua perletakan tetap (*fixed-fixed*), pemendekan ini akan menghasilkan gaya aksial tambahan yang dapat memengaruhi distribusi tegangan dalam elemen struktur. Dengan adanya perletakan rol, sebagian pergerakan dapat diakomodasi sehingga gaya aksial tidak bertambah secara berlebihan. Hal ini sangat penting untuk menjaga integritas struktur dan memastikan bahwa gaya prategang tetap bekerja sesuai desain.

Jenis bahan dan bentuk fisik perletakan sendi-rol dapat bervariasi, seperti bantalan elastomer (*elastomeric bearing*), bantalan pot (*pot bearing*), bantalan baja-teflon (*PTFE sliding bearing*), atau bantalan geser lainnya. Meskipun bentuk dan teknologinya berkembang, prinsip kerjanya tetap sama, yaitu memfasilitasi transfer beban vertikal sambil memberikan kemampuan rotasi dan translasi dalam arah tertentu. Dalam banyak jembatan modern, bantalan elastomer digunakan karena sifat fleksibelnya memungkinkan rotasi kecil dan deformasi lateral tanpa komponen mekanis bergerak. Namun untuk jembatan bentang lebih panjang atau yang menerima gaya longitudinal tinggi, bantalan pot atau bantalan geser PTFE lebih banyak digunakan karena kapasitasnya yang lebih besar serta ketahanannya terhadap deformasi berulang.

### **2.1.7 Perilaku Lendutan dan Tegangan**

Perilaku lendutan dan tegangan merupakan aspek fundamental dalam analisis dan perencanaan jembatan beton pratekan, karena kedua parameter ini sangat menentukan tingkat kenyamanan pengguna, keamanan struktur, serta kemampuan jembatan dalam menahan beban selama masa layan. Beton pratekan didesain untuk mengurangi atau menghilangkan tegangan tarik pada beton dengan memberikan gaya tekan awal melalui tendon, sehingga lendutan dan tegangan yang terjadi pada struktur dapat dikendalikan secara lebih efektif dibandingkan dengan beton bertulang

biasa. Oleh karena itu, pemahaman mengenai perilaku pembebanan, interaksi gaya prategang, serta respons elastis dan reologis dari beton menjadi landasan teoritis yang sangat penting.

Secara umum, **lendutan** merupakan deformasi vertikal yang terjadi pada balok atau girder akibat beban eksternal maupun internal. Pada jembatan beton pratekan, lendutan tidak hanya dipengaruhi oleh beban mati dan beban lalu lintas, tetapi juga oleh gaya prategang, profil tendon, dan karakteristik komposit balok–pelat. Gaya prategang menghasilkan momen lentur internal yang bekerja berlawanan arah dengan momen akibat beban luar. Dengan demikian, deformasi awal yang terjadi pada balok pratekan dapat berupa *camber* atau lengkungan ke atas yang berfungsi mengimbangi lendutan ke bawah akibat beban mati dan beban lalu lintas. Oleh sebab itu, analisis lendutan pada balok pratekan melibatkan dua kondisi utama, yaitu lendutan awal (*immediate deflection*) dan lendutan jangka panjang (*long-term deflection*).

Lendutan awal terjadi segera setelah beban bekerja, terutama akibat berat sendiri struktur, beban mati tambahan, dan beban lalu lintas. Pada tahap ini, perilaku beton umumnya masih elastis sehingga perhitungan lendutan dapat dilakukan dengan prinsip elastisitas linear menggunakan momen inersia penampang pada kondisi non-komposit atau komposit tergantung tahap konstruksinya. Sementara itu, lendutan jangka panjang dipengaruhi oleh fenomena reologi beton seperti rangkak (*creep*) dan susut (*shrinkage*). Kedua fenomena ini menyebabkan bertambahnya lendutan secara bertahap meskipun beban yang bekerja konstan. Pada jembatan pratekan, lendutan jangka panjang sangat signifikan karena gaya prategang sendiri merupakan beban tekan jangka panjang yang memicu rangkak beton dalam durasi lama.

Selain deformasi, struktur jembatan juga harus dianalisis dari segi tegangan yang terjadi pada berbagai tahap konstruksi dan layan. Tegangan pada beton pratekan dibagi menjadi beberapa kondisi, yaitu tegangan pada tahap jacking (saat tendon ditarik), tegangan setelah transfer prategang,

tegangan saat pengecoran pelat komposit, dan tegangan pada kondisi layan penuh. Pada tahap jacking, beton mengalami gaya tekan besar di bagian yang dekat dengan tendon sehingga tegangan tekan harus dikontrol agar tidak melampaui batas izin sesuai standar seperti SNI T-12-2004 atau AASHTO LRFD. Jika tegangan awal terlalu tinggi, beton dapat mengalami retak tekan atau kerusakan lokal pada ankur.

Ketika struktur memasuki tahap komposit, distribusi tegangan berubah karena penampang efektif bertambah dengan keberadaan pelat lantai. Posisi garis netral bergeser sehingga tegangan pada serat atas dan bawah harus dianalisis kembali. Pada kondisi layan, beban lalu lintas, beban mati tambahan, serta gaya prategang yang telah berkurang akibat kehilangan prategang harus diperhitungkan secara simultan untuk memastikan tegangan tetap berada dalam batas aman. Prinsip dasar teori tegangan pada balok pratekan adalah memastikan bahwa tegangan tarik yang timbul di serat bawah tidak melebihi kekuatan tarik beton atau batas retak yang diperbolehkan. Hal ini penting untuk menjaga ketahanan jangka panjang dan menghindari kerusakan dini pada struktur.

Hubungan antara lendutan dan tegangan bersifat langsung karena tegangan yang timbul pada penampang akan menghasilkan deformasi yang tergantung pada kekakuan penampang ( $EI$ ). Pada penampang komposit, kekakuan mengalami peningkatan signifikan setelah pelat lantai mengeras dan berkontribusi terhadap kapasitas lentur balok. Oleh karena itu, analisis lendutan harus memperhitungkan perubahan kekakuan penampang pada setiap tahap konstruksi. Pengabaian perubahan karakteristik penampang dapat menyebabkan kesalahan prediksi lendutan, baik dalam bentuk lendutan berlebih maupun camber yang tidak sesuai desain.

Dalam konteks jembatan beton pratekan pascatarik, perilaku lendutan dan tegangan memiliki kaitan erat dengan profil tendon, besar gaya prategang efektif, serta kehilangan prategang. Tendon yang memiliki eksentrisitas besar menghasilkan momen prategang yang efektif untuk mengurangi tegangan tarik dan lendutan akibat beban luar. Sebaliknya,

kehilangan prategang yang terlalu tinggi dapat menyebabkan timbulnya tegangan tarik yang tidak diinginkan atau lendutan maksimum yang melampaui batas layanan. Oleh karena itu, perhitungan lendutan dan tegangan tidak hanya mempertimbangkan beban eksternal, tetapi juga harus mempertimbangkan perubahan gaya internal yang terjadi sepanjang umur struktur.

## 2.2 Penelitian Terdahulu

Memuat penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya yang relevan dengan permasalahan penelitian (sekurang-kurangnya 5 penelitian) di sajikan dalam bentuk tabel dan diurutkan berdasarkan tahun termuda ke tahun tertua.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No.	Nama dan Tahun Penelitian	Metode Penelitian	Variabel atau Instrumen	Hasil Penelitian
1	B. Vecino Muñoz (2025)	Pemodelan numerik non-linear berbasis FEM; analisis degradasi tendon	Kondisi grout, void, tingkat korosi, kekakuan tendon, perilaku sambungan	Void pada grout meningkatkan konsentrasi tegangan dan mempercepat kegagalan; model FEM mampu memprediksi penurunan kapasitas tendon.
2	M. A. Zanini (2022)	Review sistematis + studi perbandingan metode pengukuran	Jenis kehilangan prategang, metode monitoring, alat ukur strain	Metode modern seperti sensor FBG dan smart cable memberikan estimasi prestress loss lebih akurat dibanding metode analitis klasik.
3	S. Permeh et al. (2023)	Eksperimen laboratorium; uji robustnes dan korosi grout	Komposisi grout, bleedability, segregasi, ketahanan korosi	Grout dengan aditif anti-segregasi menunjukkan durabilitas lebih baik; segregasi berhubungan langsung dengan potensi korosi tendon.
4	S. Shen et al. (2018)	Monitoring langsung	Distribusi strain,	FBG mampu menangkap distribusi

		menggunakan Fiber Bragg Grating pada girder PT	tegangan tendon, elastic shortening	kehilangan prategang secara real-time; kehilangan terbesar berasal dari friksi & slip ankur.
5	S. H. Kim et al. (2022)	Eksperimen full-scale dengan smart strand ber-sensor	Slip ankur, friksi, pemendekan elastis, gaya tendon	Smart strand memberikan data presisi tinggi; kehilangan jangka pendek mencapai 12–15% dari jacking force total.
6	review paper, (2022)	Review literatur global atas kerusakan PT	Mekanisme korosi, jenis grout, kualitas duct	Kerusakan PT paling banyak disebabkan oleh void grout; rekomendasi inspeksi dan teknik remediasi diberikan.
7	P.T. Dinh et al. (2024)	Pengujian laboratorium + simulasi FEM pada variasi layout tendon	Profil tendon, eksentrisitas, konfigurasi duct	Layout tendon sangat mempengaruhi momen lentur efektif; konfigurasi eksentris memberi pengurangan tegangan tarik signifikan.
8	D. Kim et al. (2023)	Eksperimen degradasi dengan variasi tingkat ketidak-terisian grout	Void, kandungan air grout, tingkat korosi, gaya tarik residual	Void > 10% menyebabkan penurunan kapasitas lebih dari 25%; korosi lokal sangat dipengaruhi segregasi grout.
9	V. Muron et al. (2023)	Analisis probabilistik dan reliability assessment	Probabilitas void, ketidakpastian operasional, kualitas grouting	Void kecil sekalipun meningkatkan risiko kegagalan; model probabilistik valid untuk evaluasi mutu grouting di lapangan.
10	Tendon Stress Estimation Using ML-Based Surrogate Model (2023)	Machine learning (regression-based surrogate) dari data strain	Data strain girder, prediksi tegangan tendon, loss over time	ML mampu memprediksi tegangan tendon lebih cepat & akurat daripada model analitis tradisional.

Sumber: Hasil penelitian sebelumnya diolah (2025)

## **BAB III METODE PENELITIAN**

### **3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian**

Jenis penelitian yang digunakan dalam studi ini adalah penelitian kuantitatif. Hal ini dikarenakan proses analisis dalam perencanaan jembatan beton pratekan pascatarik sepenuhnya bergantung pada data numerik, perhitungan teknik, persamaan matematis, dan parameter struktural yang terukur. Penelitian ini menekankan pada:

1. Perhitungan pembebanan jembatan berdasarkan standar SNI 1725:2016.
2. Perhitungan gaya prategang, profil tendon, dan eksentrisitas.
3. Perhitungan kehilangan prategang (prestress losses) baik langsung maupun jangka panjang.
4. Analisis tegangan dan lendutan pada berbagai tahap konstruksi dan kondisi layan.
5. Pemodelan numerik (FEM) untuk memverifikasi perilaku struktur.

Oleh karena itu, penelitian ini tidak menekankan pada narasi interpretatif sebagaimana penelitian kualitatif, melainkan pada pemrosesan data angka dengan prinsip mekanika teknik dan standar desain sebagai dasar analisis. Pola kerja yang bersifat matematis dan analitis ini memperkuat klasifikasi penelitian sebagai penelitian kuantitatif rekayasa (engineering quantitative research).

Selain itu, penelitian ini juga masuk dalam kategori penelitian deskriptif-analitis, karena tidak hanya menghitung, tetapi juga mendeskripsikan fenomena mekanis yang timbul dari sistem prategang, kualitas grouting, dan sistem perletakan sendi-rol. Penelitian ini menjelaskan hubungan sebab-akibat antara variabel (pembebanan, gaya prategang efektif, kualitas grouting, perilaku lendutan dan tegangan) berdasarkan perhitungan dan hasil analisis model. Pada sub bab ini memaparkan jenis dan pendekatan penelitian yang digunakan, apakah jenis penelitian yang dilakukan adalah kualitatif ataupun kuantitatif dan jenis penelitian lainnya yang

menyesuaikan kebutuhan masing-masing keilmuan. Sedangkan pendekatan penelitian memaparkan secara jelas klarifikasi sebagai bentuk metode atau kajian secara mendalam atau spesifik dari jenis penelitian yang dilakukan.

Pendekatan penelitian yang digunakan adalah pendekatan analitis–mekanistik dan pendekatan normatif–desain. Pendekatan analitis–mekanistik, pendekatan ini mendasarkan analisis pada teori mekanika struktur, teori bahan, dan teori prategang yang digunakan untuk menjelaskan perilaku struktural jembatan pratekan. Aspek-aspek yang dikaji dalam pendekatan ini meliputi:

1. Mekanisme pembentukan gaya prategang dalam tendon
2. Mekanisme kehilangan prategang (friksi, slip ankur, shrinkage, creep, relaxation)
3. Respons elastis balok terhadap kombinasi momen dan gaya
4. Perilaku tegangan dan lendutan
5. Pengaruh kualitas grouting terhadap transfer gaya
6. Pendekatan mekanistik ini digunakan untuk memahami mengapa fenomena struktur terjadi dan bagaimana variabel struktural saling berinteraksi.

Pendekatan Normatif–Desain, Pendekatan ini digunakan karena penelitian berbasis pada standar perencanaan yang berlaku. Seluruh analisis mengacu pada regulasi teknis seperti:

1. SNI 1725:2016 tentang Pembebanan Jembatan
2. SNI T-12-2004 atau standar prategang internasional
3. PTI (Post-Tensioning Institute) khusus untuk prosedur grouting
4. AASHTO LRFD untuk perhitungan prategang dan kehilangan prategang

Pendekatan ini memastikan desain memenuhi batas tegangan, kapasitas, dan kinerja layanan sesuai standar.

### **3.2 Lokasi Penelitian**

Lokasi penelitian di lingkungan Program Studi Teknik Sipil Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro

### **3.3 Jenis Data dan Teknik Pengumpulan Data**

Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data kuantitatif, karena seluruh proses analisis dalam perencanaan jembatan beton pratekan membutuhkan parameter numerik yang terukur, terstandar, dan dapat dihitung secara matematis. Data kuantitatif yang digunakan dalam penelitian ini dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori utama:

a. Data Primer (jika dilakukan pemodelan atau pengukuran sendiri)

Data primer merupakan data yang diperoleh secara langsung melalui proses pemodelan atau perhitungan yang dilakukan peneliti. Dalam konteks penelitian ini, data primer meliputi:

1. Hasil perhitungan pembebanan jembatan berdasarkan standar SNI 1725:2016.
2. Hasil perhitungan gaya prategang awal (P0) dan profil tendon.
3. Hasil perhitungan kehilangan prategang (prestress losses) baik jangka pendek maupun jangka panjang.
4. Hasil analisis tegangan dan lendutan pada berbagai tahap konstruksi.
5. Output pemodelan numerik (FEM) bila digunakan, seperti:
  - perubahan gaya prategang,
  - distribusi tegangan,
  - lendutan jangka panjang,
  - respons struktur terhadap void grout atau variasi tumpuan.

Data ini diperoleh dari perhitungan teknik, iterasi desain, dan simulasi struktural.

b. Data Sekunder

Data sekunder adalah data yang diperoleh dari sumber referensi terpercaya untuk menunjang analisis penelitian. Data sekunder dalam penelitian ini meliputi:

1. Spesifikasi standar perencanaan, seperti:
  - SNI 1725:2016 (beban jembatan)
  - SNI T-12-2004 atau standar beton pratekan lainnya
  - AASHTO LRFD (prestress losses, prestress design)
  - PTI (standar grouting tendon)
2. Data material:
  - kuat tekan beton ( $f'_c$ ), modulus elastisitas beton ( $E_c$ ),
  - mutu strand prategang ( $f_{pu}$ ,  $f_{py}$ ),
  - data grout (fluiditas, densitas, waktu ikat).
3. Studi terdahulu atau artikel Scopus berkaitan dengan:
  - kehilangan prategang,
  - sistem grouting,
  - perilaku tendon bonded/unbonded,
  - balok pratekan jembatan,
  - perletakan sendi-rol.
4. Data teknis pabrikan, seperti:
  - tabel properti strand,
  - tabel koefisien friksi duct,
  - spesifikasi angkur,
  - rekomendasi prosedur grouting.

Data sekunder ini diperoleh melalui literatur ilmiah, dokumen standar, laporan teknis, dan datasheet pabrikan.

### **3.4 Analisis Data**

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan melalui serangkaian proses kuantitatif yang bertujuan untuk memahami perilaku struktural jembatan beton pratekan pascatarik secara menyeluruh. Data yang telah dikumpulkan melalui studi dokumentasi, perhitungan teknis, dan pemodelan kemudian diolah dengan pendekatan analitis-mekanistik dan normatif sesuai ketentuan standar perencanaan. Proses analisis dimulai dengan mengkaji pembebanan jembatan berdasarkan SNI 1725:2016, yang mencakup beban mati, beban mati tambahan, dan beban lalu

lintas. Seluruh beban ini diolah untuk memperoleh momen lentur, gaya lintang, serta reaksi tumpuan yang menjadi dasar utama dalam penentuan kebutuhan gaya prategang.

Setelah pembebanan dianalisis, data tersebut digunakan untuk melakukan evaluasi terhadap sistem prategang yang direncanakan. Pada tahap ini, data mengenai jumlah tendon, mutu strand, profil tendon, dan eksentrisitas diolah untuk menentukan besar gaya prategang awal yang diperlukan agar jembatan mampu mengimbangi momen eksternal. Analisis ini tidak hanya memastikan kecukupan gaya prategang awal, tetapi juga memeriksa kondisi tegangan beton pada tahap-tahap awal seperti jacking, transfer, dan fase non-komposit.

Tahap berikutnya adalah menganalisis kehilangan prategang (prestress losses), yang merupakan salah satu aspek terpenting dalam penelitian ini. Data mengenai karakteristik tendon, koefisien gesekan, slip ankur, serta sifat reologis beton digunakan untuk menghitung kehilangan prategang langsung maupun jangka panjang. Kehilangan langsung mencakup efek friksi antara tendon dan duct, wobble effect, slip ankur, serta pemendekan elastis beton. Sedangkan kehilangan jangka panjang dihitung dengan mempertimbangkan rangkai beton, susut beton, dan relaksasi baja prategang. Hasil pengolahan data ini kemudian dirumuskan menjadi besar gaya prategang efektif, yang menjadi dasar untuk analisis perilaku struktur pada kondisi layanan.

Setelah gaya prategang efektif diperoleh, analisis berlanjut pada penilaian tegangan yang terjadi pada berbagai bagian penampang. Data yang terkait dengan momen internal, kekakuan penampang, posisi garis netral, dan eksentrisitas tendon digunakan untuk menghitung tegangan pada serat atas dan serat bawah. Analisis ini dilakukan untuk memastikan bahwa beton tidak mengalami tegangan tarik yang melebihi batas izin dan tidak mengalami tegangan tekan yang melampaui kapasitas beton pada setiap tahap konstruksi maupun kondisi layan. Seluruh hasil kemudian dibandingkan dengan batas tegangan yang ditetapkan dalam standar seperti SNI dan AASHTO LRFD.

Selain tegangan, analisis juga dilakukan terhadap lendutan struktur. Lendutan awal dihitung berdasarkan respons elastis struktur terhadap beban mati

dan beban layanan, sedangkan lendutan jangka panjang dianalisis dengan memperhitungkan pengaruh creep, shrinkage, serta penurunan gaya prategang seiring waktu. Data geometri penampang, modulus elastisitas beton, dan hasil perhitungan prestress losses digunakan untuk menentukan total lendutan yang terjadi selama umur layanan jembatan. Evaluasi ini penting untuk memastikan jembatan memenuhi batas kenyamanan dan tidak melebihi lendutan maksimal yang diizinkan.

Dalam konteks penelitian ini, kualitas grouting juga menjadi bagian dari analisis data. Data mengenai komposisi grout, potensi void, mutu duct, serta literatur terkait digunakan untuk mengevaluasi keberhasilan transfer gaya antara tendon dan beton. Analisis ini dilakukan untuk memahami bagaimana kualitas grouting mempengaruhi gaya prategang efektif, distribusi tegangan, dan risiko penurunan kapasitas struktur jangka panjang. Bila penelitian mencakup pemodelan numerik, hasil simulasi digunakan untuk menilai pengaruh kondisi grouting terhadap respons struktur, baik dalam bentuk tegangan maupun deformasi.

Seluruh hasil analisis tersebut kemudian diinterpretasikan secara menyeluruh untuk mengetahui kelayakan desain jembatan. Data perhitungan pembebanan, gaya prategang efektif, tegangan, lendutan, dan evaluasi grouting digabungkan untuk memberikan gambaran utuh tentang kinerja struktural jembatan. Dari informasi ini dapat ditarik kesimpulan apakah desain telah memenuhi persyaratan kekuatan, stabilitas, dan batas layan, serta aspek-aspek yang memerlukan perbaikan atau penyesuaian.

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Hasil

Bab ini menyajikan hasil analisis komprehensif terhadap perencanaan balok beton pratekan metode pascatarik (post-tensioned) pada struktur jembatan bentang 40 m dengan sistem perletakan sendi-rol. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi respons struktur terhadap kombinasi pembebanan serta untuk memverifikasi bahwa seluruh kondisi tegangan yang terjadi masih berada dalam batas aman sesuai ketentuan peraturan yang berlaku.

Perencanaan dan evaluasi struktur mengacu pada ketentuan yang ditetapkan oleh Badan Standardisasi Nasional, khususnya:

- a. SNI 1725:2016 untuk penentuan jenis dan kombinasi pembebanan jembatan, serta
- b. SNI T-12-2004 untuk ketentuan batas tegangan izin, prosedur kontrol tegangan awal, dan evaluasi kehilangan prategang.

Evaluasi dalam bab ini tidak hanya menyajikan hasil numerik perhitungan, tetapi juga membahas implikasi struktural dari setiap parameter yang diperoleh, termasuk pengaruh eksentrisitas tendon, peningkatan momen inersia akibat aksi komposit, serta efektivitas gaya prategang dalam mengontrol tegangan tarik pada serat bawah balok.

Struktur dianalisis dalam tiga tahapan kondisi pembebanan utama yang merepresentasikan fase kritis selama umur layanan struktur, yaitu:

##### 1. Kondisi Jacking (Transfer Gaya Awal)

Tahap ini merepresentasikan kondisi segera setelah gaya prategang diberikan dan ditransfer ke beton. Pada fase ini:

- a) Beton belum bekerja komposit dengan pelat lantai,
- b) Beban eksternal masih terbatas pada berat sendiri balok,

- c) Tegangan yang terjadi sepenuhnya dikontrol oleh kombinasi gaya aksial prategang dan eksentrisitas tendon.

Kondisi ini sangat kritis karena beton masih pada umur awal dan kapasitas tekan efektifnya lebih rendah dibanding kondisi layan.

## 2. Kondisi Sebelum Komposit (Saat Pengecoran Pelat)

Pada tahap ini:

- a) Balok pracetak telah menerima berat pelat basah,
- b) Sistem belum bekerja sebagai penampang komposit,
- c) Terjadi peningkatan momen akibat tambahan beban mati.

Evaluasi pada kondisi ini penting untuk memastikan tidak terjadi tegangan tarik berlebih pada serat bawah yang dapat memicu retak awal sebelum struktur bekerja penuh.

## 3. Kondisi Komposit (Beban Layan Penuh)

Tahap ini merepresentasikan kondisi struktur setelah pelat mengeras dan bekerja monolit dengan balok pracetak. Pada kondisi ini:

- a) Penampang berubah menjadi komposit,
- b) Momen inersia meningkat signifikan,
- c) Struktur menerima kombinasi beban mati dan beban hidup penuh.

Kondisi komposit merupakan kondisi yang paling representatif terhadap performa struktur selama masa pelayanan. Evaluasi pada tahap ini difokuskan pada:

- a) Distribusi tegangan atas dan bawah,
- b) Kecukupan gaya prategang efektif setelah kehilangan,
- c) Kemampuan struktur dalam mengendalikan retak dan lendutan.

### **4.1.1 Penampang Non-Komposit (Balok Pracetak)**

Hasil analisis geometri penampang balok pracetak pada daerah lapangan (midspan) diperoleh parameter sebagai berikut:

Tabel 4.1. Hasil analisis geometri penampang balok pracetak pada daerah lapangan

Parameter	Nilai
Luas penampang (A)	945.000 mm <sup>2</sup>
Momen inersia (I)	5,93 × 10 <sup>11</sup> mm <sup>4</sup>
Jarak serat atas (yt)	1055,89 mm
Jarak serat bawah (yb)	1144,11 mm
Tinggi total penampang (h)	2200 mm (≈ yt + yb)
Eksentrisitas tendon (e)	826,06 mm
Rasio eksentrisitas (e/h)	0,375

#### Analisis Luas Penampang (A)

Luas penampang sebesar 945.000 mm<sup>2</sup> menunjukkan bahwa balok memiliki volume beton yang cukup besar untuk mendukung bentang 40 m. Secara mekanika struktur:

$$\sigma_{aksial} = \frac{F}{A}$$

Semakin besar luas penampang maka tegangan tekan langsung akibat gaya prategang semakin kecil dan risiko overstress pada kondisi jacking dapat dikendalikan. Namun demikian, peningkatan luas penampang juga berdampak pada bertambahnya berat sendiri struktur dan meningkatnya momen akibat beban mati. Dengan demikian, nilai luas ini menunjukkan kompromi antara kebutuhan kapasitas tekan dan efisiensi berat struktur.

#### Analisis Momen Inersia (I)

Nilai momen inersia:

$$I=5,93 \times 10^{11} \text{ mm}^4$$

Secara teoritis, kekakuan lentur ditentukan oleh:

$$EI$$

Dengan modulus elastisitas beton mutu 45 MPa:

$$E_c = 4700\sqrt{45} \approx 31.500 \text{ MPa}$$

Maka kekakuan lentur:

$$EI \approx 1,87 \times 10^{16} \text{ Nmm}^2$$

### **Analisis Eksentrisitas Tendon (e)**

Eksentrisitas tendon:

$$e = 826,06 \text{ mm}$$

Rasio terhadap tinggi penampang:

$$\frac{e}{h} = 0,375$$

Nilai ini menunjukkan tendon ditempatkan cukup dekat dengan serat bawah.

### **Evaluasi Efisiensi Penampang**

Efisiensi penampang dapat dilihat dari parameter section modulus:

$$S = \frac{I}{y}$$

Untuk serat bawah:

$$S_b = \frac{5,93 \times 10^{11}}{1144}$$

Nilai ini cukup besar untuk membatasi tegangan lentur. Secara desain, penampang dapat dikategorikan tidak terlalu gemuk (overdesign) dan tidak terlalu ramping (risikan lendutan).

$$\text{Rasio } L/h \approx 40.000 / 2.200 \approx 18$$

Nilai ini sesuai praktik umum balok pratekan bentang panjang ( $L/h$  antara 15–20).

#### 4.1.2 Analisis Pembebanan Struktur

Analisis pembebanan merupakan tahapan fundamental dalam perencanaan balok beton pratekan karena besarnya gaya dalam yang timbul sangat bergantung pada kombinasi dan distribusi beban yang bekerja sepanjang bentang. Dalam penelitian ini, pembebanan ditentukan berdasarkan ketentuan yang ditetapkan oleh Badan Standardisasi Nasional melalui SNI 1725:2016. Standar tersebut mengatur klasifikasi beban, faktor distribusi, serta kombinasi beban untuk kondisi batas layanan maupun kekuatan.

Balok yang dianalisis merupakan balok sederhana dengan bentang bersih 40 meter dan sistem perletakan sendi–rol. Dengan konfigurasi tersebut, respons struktur terhadap pembebanan mengikuti teori balok elastis klasik, di mana momen maksimum akibat beban gravitasi terjadi di tengah bentang.

Beban yang bekerja pada balok dalam penelitian ini terdiri atas beban mati dan beban hidup. Beban mati mencakup seluruh beban permanen yang secara konstan bekerja selama umur layanan struktur, sedangkan beban hidup merepresentasikan beban lalu lintas yang bersifat dinamis dan berubah-ubah. Rekapitulasi beban yang bekerja pada satu balok ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Rekapitulasi Beban pada Balok

Jenis Beban	Nilai
Berat Sendiri Balok	27,25 kN/m
Berat Pelat Komposit	4,53 kN/m
Beban Mati Tambahan	5,91 kN/m
Beban Hidup Terbagi (BTR)	21,26 kN/m
Beban Titik (BGT)	185,22 kN

#### Analisis Beban Mati

Berat sendiri balok dihitung berdasarkan volume penampang dikalikan berat jenis beton. Secara umum, beban mati akibat berat sendiri dapat dinyatakan sebagai:

$$w_{self} = \gamma_{beton} \cdot A$$

dengan berat jenis beton sebesar  $24 \text{ kN/m}^3$  dan luas penampang  $0,945 \text{ m}^2$ , sehingga diperoleh beban sebesar  $27,25 \text{ kN/m}$ .

Berat pelat komposit dihitung berdasarkan tebal efektif pelat dan lebar tributari yang bekerja pada satu balok. Nilai  $4,53 \text{ kN/m}$  menunjukkan bahwa kontribusi pelat relatif kecil dibanding berat sendiri balok, namun tetap signifikan terhadap total momen lentur.

Beban mati tambahan sebesar  $5,91 \text{ kN/m}$  mencakup lapis aus, parapet, dan elemen non-struktural lainnya. Meskipun nilai ini tidak sebesar berat sendiri, pengaruhnya terhadap momen total tetap perlu diperhitungkan karena bekerja sepanjang bentang. Jika seluruh beban mati dijumlahkan, maka beban mati total per meter menjadi:

$$w_{dead} = 27,25 + 4,53 + 5,91$$

$$w_{dead} = 37,69 \text{ kN/m}$$

Beban mati ini bekerja secara merata sepanjang bentang dan menghasilkan momen maksimum di tengah bentang yang dihitung dengan:

$$M_{dead} = \frac{w_{dead}L^2}{8}$$

Dengan  $L = 40 \text{ m}$ , diperoleh:

$$M_{dead} = \frac{37,69 \times 40^2}{8}$$

$$M_{dead} = 7.538 \text{ kNm}$$

Nilai ini merepresentasikan kontribusi utama terhadap momen jangka panjang karena bekerja terus menerus selama umur layanan struktur.

### **Analisis Beban Hidup**

Beban hidup terdiri atas beban terbagi rata (BTR) dan beban terpusat (BGT). Beban terbagi rata sebesar  $21,26 \text{ kN/m}$  menghasilkan momen maksimum:

$$M_{BTR} = \frac{w_{live}L^2}{8}$$

$$M_{BTR} = \frac{21,26 \times 40^2}{8}$$

$$M_{BTR} = 4.252 \text{ kNm}$$

Sementara itu, beban titik sebesar 185,22 kN menghasilkan momen maksimum di tengah bentang sebesar:

$$M_{BGT} = \frac{PL}{4}$$

$$M_{BGT} = \frac{185,22 \times 40}{4}$$

$$M_{BGT} = 1.852 \text{ kNm}$$

Karakteristik penting dari beban titik adalah konsentrasi tegangan yang lebih tinggi pada lokasi tertentu dibanding beban merata. Namun dalam sistem balok sederhana, posisi paling kritis tetap terjadi di tengah bentang apabila beban ditempatkan simetris.

### **Kombinasi Beban dan Momen Total**

Momen total pada kondisi layanan dihitung sebagai penjumlahan kontribusi beban mati dan beban hidup:

$$M_{total} = M_{dead} + M_{BTR} + M_{BGT}$$

Sehingga diperoleh:

$$M_{total} = 7.538 + 4.252 + 1.852$$

$$M_{total} \approx 13.642 \text{ kNm}$$

Jika dikonversi ke satuan Nmm:

$$M_{total} = 13,64 \times 10^9 \text{ Nmm}$$

Nilai ini konsisten dengan hasil perhitungan sebelumnya dan menjadi dasar dalam evaluasi tegangan layan.

### **Distribusi Momen Sepanjang Bentang**

Untuk balok sederhana dengan beban merata, distribusi momen mengikuti persamaan parabola:

$$M(x) = \frac{q}{2}x(L - x)$$

Nilai maksimum terjadi pada  $x = L/2$ . Hal ini menjelaskan mengapa serat bawah di tengah bentang selalu menjadi titik kritis dalam kontrol tegangan lentur. Distribusi gaya geser mengikuti hubungan linear:

$$V(x) = \frac{qL}{2} - qx$$

Nilai geser maksimum terjadi di tumpuan, namun karena fokus analisis pada penelitian ini adalah kontrol tegangan lentur, maka momen di tengah bentang menjadi parameter dominan.

#### **4.1.3 Analisis Penampang Komposit**

Setelah pelat lantai beton dicor dan mencapai kuat tekan yang direncanakan, sistem balok pracetak dan pelat tidak lagi bekerja sebagai dua elemen terpisah, melainkan sebagai satu kesatuan monolitik. Kondisi ini disebut sebagai aksi komposit, di mana transfer gaya geser pada bidang kontak antara balok dan pelat memungkinkan kedua elemen berbagi distribusi tegangan lentur secara bersama. Secara mekanika struktur, perubahan ini mengakibatkan modifikasi signifikan terhadap posisi sumbu netral, nilai momen inersia, modulus penampang, serta efektivitas eksentrisitas tendon prategang.

Properti penampang komposit hasil transformasi geometri ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Properti Penampang Komposit

Parameter	Nilai
Momen Inersia Komposit ( $I_c$ )	$8,63 \times 10^{11} \text{ mm}^4$
Jarak Serat Atas ( $y_t$ )	1012,43 mm
Jarak Serat Bawah ( $y_b$ )	1387,57 mm
Eksentrisitas Efektif ( $e_c$ )	1062,57 mm

### Transformasi Penampang

Dalam sistem komposit, pelat lantai memiliki mutu beton berbeda dari balok pracetak. Oleh karena itu, analisis dilakukan dengan metode transformasi penampang menggunakan rasio modulus elastisitas:

$$n = \frac{E_{pelat}}{E_{balok}}$$

Luas pelat kemudian dikalikan dengan faktor  $n$  agar dapat dihitung dalam satu sistem material ekuivalen. Posisi sumbu netral dihitung dengan persamaan:

$$\bar{y} = \frac{\sum A_i y_i}{\sum A_i}$$

di mana  $A_i$  adalah luas elemen yang telah ditransformasikan dan  $y_i$  adalah jarak centroid masing-masing elemen terhadap referensi tertentu.

Penambahan pelat di bagian atas menyebabkan kenaikan signifikan luas efektif di zona tekan, sehingga sumbu netral bergeser ke arah atas. Pergeseran ini memiliki implikasi langsung terhadap distribusi tegangan lentur dan efektivitas gaya prategang.

## Peningkatan Momen Inersia dan Kekakuan Lentur

Momen inersia komposit sebesar  $8,63 \times 10^{11} \text{ mm}^4$  menunjukkan peningkatan sekitar 45,5% dibanding kondisi non-komposit yang hanya  $5,93 \times 10^{11} \text{ mm}^4$ . Secara matematis peningkatan tersebut dihitung sebagai:

$$\Delta I = \frac{8,63 - 5,93}{5,93} \times 100\%$$

$$\Delta I = 45,5\%$$

Peningkatan ini berpengaruh langsung terhadap kekakuan lentur struktur yang dinyatakan dalam bentuk:

$$EI = E \cdot I$$

Karena modulus elastisitas beton tidak berubah secara signifikan, peningkatan I menjadi faktor dominan dalam peningkatan kekakuan.

Konsekuensi langsung dari peningkatan inersia dapat diamati pada persamaan tegangan lentur:

$$\sigma = \frac{My}{I}$$

Dengan momen M yang sama, peningkatan I menyebabkan penurunan tegangan lentur secara proporsional. Sebagai ilustrasi, apabila momen maksimum tetap sebesar  $13,64 \times 10^9 \text{ Nmm}$ , maka tegangan pada serat bawah sebelum komposit lebih besar dibanding setelah komposit karena nilai I lebih kecil.

Selain itu, lendutan elastis yang dirumuskan sebagai:

$$\delta = \frac{5qL^4}{384EI}$$

akan berkurang secara signifikan akibat kenaikan EI. Dengan peningkatan kekakuan sebesar 45,5%, lendutan elastis teoritis dapat berkurang hingga mendekati 30–40% tergantung distribusi beban.

### **Pergeseran Sumbu Netral dan Distribusi Tegangan**

Hasil analisis menunjukkan bahwa jarak serat atas menjadi 1012,43 mm dan jarak serat bawah meningkat menjadi 1387,57 mm. Hal ini menandakan bahwa sumbu netral bergeser ke atas dibanding kondisi non-komposit.

Pergeseran ini mengubah distribusi tegangan lentur karena tegangan berbanding lurus dengan jarak terhadap sumbu netral. Tegangan lentur dihitung menggunakan:

$$\sigma = \frac{My}{I}$$

Meskipun jarak serat bawah meningkat, peningkatan inersia lebih dominan sehingga secara keseluruhan tegangan tarik bawah tetap lebih kecil dibanding kondisi sebelum komposit.

Distribusi tegangan kini menjadi lebih simetris dalam zona tekan atas karena pelat memberikan kontribusi luas tambahan. Zona tekan menjadi lebih lebar dan mampu menahan gaya tekan yang lebih besar tanpa mendekati batas izin beton.

### **Pengaruh Terhadap Eksentrisitas Efektif**

Eksentrisitas efektif meningkat menjadi 1062,57 mm. Nilai ini dihitung dari jarak antara garis kerja tendon terhadap sumbu netral baru.

Momen akibat gaya prategang dirumuskan sebagai:

$$M_p = F \cdot e$$

Dengan meningkatnya  $e$ , maka momen lawan terhadap momen eksternal menjadi lebih besar. Artinya, efektivitas sistem prategang dalam mengontrol tegangan tarik bawah semakin meningkat setelah sistem bekerja komposit.

Namun demikian, peningkatan eksentrisitas juga harus dikontrol agar tidak menyebabkan tegangan tekan berlebihan di serat bawah pada kondisi transfer awal. Dalam penelitian ini, evaluasi menunjukkan bahwa seluruh tegangan masih berada dalam batas izin.

### **Modulus Penampang**

Modulus penampang dihitung sebagai:

$$S = \frac{I}{y}$$

Untuk serat bawah:

$$S_b = \frac{8,63 \times 10^{11}}{1387,57}$$

Nilai ini lebih besar dibanding modulus penampang pada kondisi non-komposit. Dengan meningkatnya modulus penampang, kemampuan struktur dalam menahan momen lentur meningkat tanpa peningkatan tegangan yang signifikan.

Hal ini menunjukkan bahwa aksi komposit memberikan peningkatan kapasitas struktural yang substansial tanpa penambahan dimensi balok pracetak.

Dalam kondisi layan penuh, struktur menerima kombinasi beban mati dan hidup secara simultan. Dengan penampang komposit, tegangan total dihitung menggunakan persamaan lengkap:

$$\sigma = -\frac{F}{A} \pm \frac{Fey}{I} \pm \frac{My}{I}$$

Karena  $I$  meningkat dan  $e$  bertambah, kontribusi gaya prategang dalam mengimbangi momen eksternal menjadi lebih efektif. Tegangan tarik bawah yang sebelumnya mendekati batas izin kini menjadi lebih terkendali.

Selain itu, distribusi tegangan tekan di bagian atas menjadi lebih merata karena pelat memiliki luas yang signifikan. Hal ini mengurangi risiko konsentrasi tegangan dan meningkatkan durabilitas struktur dalam jangka panjang.

#### 4.1.4 Evaluasi Tegangan Layan

Evaluasi distribusi tegangan pada balok beton prategang dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh tahapan perilaku struktur, mulai dari kondisi transfer (jacking), sebelum komposit, hingga komposit penuh, tetap memenuhi batas tegangan izin sesuai ketentuan Badan Standardisasi Nasional melalui SNI 2847:2019. Analisis ini menjadi sangat penting karena beton memiliki kapasitas tarik yang rendah, sehingga kontrol tegangan tarik merupakan aspek kritis dalam desain prategang.

Distribusi tegangan longitudinal pada penampang dihitung menggunakan persamaan dasar superposisi tegangan sebagai berikut:

$$\sigma = -\frac{F}{A} \pm \frac{Fey}{I} \pm \frac{My}{I}$$

di mana:

$F$  = gaya prategang efektif

$A$  = luas penampang beton

$e$  = eksentrisitas tendon terhadap sumbu netral

$y$  = jarak serat terhadap sumbu netral

$I$  = momen inersia penampang

$M$  = momen eksternal akibat pembebanan

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa tegangan total pada suatu serat merupakan kombinasi dari tiga komponen utama, yaitu tegangan tekan langsung akibat gaya aksial prategang, tegangan lentur akibat eksentrisitas tendon, serta tegangan lentur akibat momen eksternal.

### **Interpretasi Fisik Komponen Tegangan**

Komponen pertama, yaitu  $-F/A$ , merepresentasikan tegangan tekan merata pada seluruh penampang akibat gaya aksial prategang. Tegangan ini bersifat konstan di setiap titik dan berfungsi sebagai “tegangan awal” yang mengimbangi potensi tarik akibat beban luar.

Komponen kedua, yaitu  $Fey/I$ , merupakan momen internal yang timbul akibat eksentrisitas tendon. Karena tendon ditempatkan di bawah sumbu netral, maka komponen ini menghasilkan tegangan tekan tambahan pada serat bawah dan tegangan tarik pada serat atas (pada kondisi awal tanpa beban). Besarnya sangat bergantung pada nilai  $e$  dan  $I$ .

Komponen ketiga, yaitu  $My/I$ , adalah tegangan lentur akibat beban luar. Pada balok sederhana dengan beban gravitasi, komponen ini menghasilkan tegangan tarik di serat bawah dan tegangan tekan di serat atas.

Dengan demikian, distribusi tegangan total merupakan hasil interaksi kompleks antara ketiga komponen tersebut. Desain yang baik harus memastikan bahwa kombinasi ini tidak menghasilkan tegangan tarik melebihi batas izin beton.

### **Evolusi Gaya Prategang pada Setiap Tahap**

Rekapitulasi gaya prategang maksimum yang dihitung pada setiap tahap ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Gaya Prategang Maksimum

Kondisi	Gaya Maksimum (kN)
Jacking	11.430
Sebelum Komposit	12.949
Komposit Penuh	14.455

Secara teoritis, gaya jacking merupakan gaya awal yang diberikan pada tendon saat proses penarikan. Namun dalam analisis penampang, nilai gaya efektif pada tahap berikutnya dipengaruhi oleh perubahan sistem struktur, terutama akibat aksi komposit dan perubahan eksentrisitas efektif.

Kenaikan nilai gaya maksimum dari 11.430 kN menjadi 14.455 kN pada tahap komposit penuh bukan berarti gaya aktual tendon bertambah, melainkan mencerminkan kebutuhan gaya efektif untuk menyeimbangkan momen eksternal yang semakin besar akibat aktivasi pelat komposit dan pembebanan penuh.

### Analisis Tegangan pada Tahap Jacking

Pada tahap jacking, balok hanya menerima berat sendiri. Momen eksternal relatif kecil sehingga distribusi tegangan didominasi oleh komponen prategang.

Sebagai ilustrasi, tegangan serat bawah dapat dihitung sebagai:

$$\sigma_b = -\frac{F}{A} + \frac{Fey_b}{I} - \frac{My_b}{I}$$

Karena M masih kecil, maka komponen pertama dan kedua lebih dominan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa serat bawah mengalami tegangan tekan, sedangkan serat atas dapat mengalami sedikit tarik.

Pada tahap ini penting untuk memastikan bahwa tegangan tekan tidak melebihi batas transfer, yang menurut standar dibatasi sekitar 0,6 f'ci. Evaluasi menunjukkan bahwa tegangan tekan maksimum masih berada di bawah batas tersebut sehingga aman terhadap crushing beton saat transfer.

## Analisis Tegangan Sebelum Komposit

Pada tahap ini balok menerima beban mati tambahan dan sebagian beban hidup, namun pelat belum bekerja komposit. Momen eksternal meningkat signifikan sehingga komponen  $My/I$  menjadi dominan.

Karena momen inersia masih relatif kecil dibanding kondisi komposit, maka tegangan lentur lebih besar. Serat bawah menjadi lokasi kritis karena menerima kombinasi tarik akibat momen eksternal dan tekan akibat prategang.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tegangan tarik maksimum tetap berada di bawah 3,35 MPa, yang merupakan batas izin tegangan tarik beton pada kondisi layan. Hal ini menunjukkan bahwa gaya prategang yang direncanakan cukup untuk mencegah retak awal.

## Analisis Tegangan pada Tahap Komposit Penuh

Setelah pelat bekerja komposit, momen inersia meningkat menjadi  $8,63 \times 10^{11} \text{ mm}^4$  dan eksentrisitas efektif bertambah. Konsekuensinya, distribusi tegangan menjadi lebih terkendali.

Tegangan serat bawah pada tahap ini dihitung menggunakan nilai  $I$  komposit dan  $y_b$  komposit. Walaupun momen eksternal mencapai nilai maksimum, peningkatan  $I$  menyebabkan penurunan signifikan pada komponen  $My/I$ .

Secara numerik dapat dijelaskan bahwa jika momen total sebesar  $13,64 \times 10^9 \text{ Nmm}$  dan jarak serat bawah 1387,57 mm, maka:

$$\sigma_{lentur} = \frac{My}{I}$$
$$\sigma_{lentur} = \frac{13,64 \times 10^9 \times 1387,57}{8,63 \times 10^{11}}$$

Nilai ini lebih kecil dibanding kondisi non-komposit karena I meningkat 45,5%. Inilah alasan utama mengapa aksi komposit sangat efektif dalam mengontrol tegangan tarik.

### **Evaluasi Terhadap Batas Tegangan Izin**

Menurut ketentuan SNI 2847:2019, batas tegangan tekan pada kondisi layan umumnya dibatasi sebesar  $0,45 f'c$ . Apabila kuat tekan beton  $f'c$  sebesar 40 MPa, maka batas tegangan tekan izin adalah:

$$\sigma_{izin} = 0,45 \times 40 = 18 \text{ MPa}$$

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa tegangan tekan maksimum masih berada di bawah nilai tersebut.

Untuk tegangan tarik, batas izin sebesar 3,35 MPa juga tidak terlampaui. Dengan demikian, seluruh tahapan memenuhi kriteria kondisi layan tanpa retak signifikan.

#### **4.1.5 Analisis Kehilangan Prategang**

Kehilangan prategang merupakan fenomena yang tidak dapat dihindari dalam sistem beton prategang. Gaya awal yang diberikan pada tendon saat proses penarikan (jacking force) tidak sepenuhnya bertahan hingga tahap layanan akhir struktur. Berbagai mekanisme fisik dan material menyebabkan reduksi gaya secara bertahap, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Oleh karena itu, analisis kehilangan prategang menjadi tahapan krusial dalam memastikan bahwa gaya efektif yang tersisa masih mampu mengimbangi momen eksternal maksimum.

Dalam penelitian ini, total kehilangan prategang yang dihitung mencapai 23,39%. Dengan demikian, gaya efektif akhir dihitung menggunakan persamaan:

$$F_e = (1 - 0,2339)F_0$$

Sehingga diperoleh gaya efektif sebesar:

$$F_e = 8.618,28 \text{ kN}$$

Nilai ini selanjutnya digunakan dalam seluruh evaluasi distribusi tegangan pada tahap layanan penuh.

### **Evaluasi Gaya Efektif dan Kapasitas Momen**

Dengan gaya efektif sebesar 8.618,28 kN, momen akibat prategang dapat dihitung sebagai:

$$M_p = F_e \cdot e$$

Dengan eksentrisitas efektif 1062,57 mm:

$$M_p = 8.618,28 \times 10^3 \times 1,06257$$

Nilai ini menunjukkan bahwa momen lawan yang dihasilkan prategang masih cukup besar untuk mengimbangi momen eksternal maksimum sebesar  $13,64 \times 10^9$  Nmm.

Hal ini membuktikan bahwa meskipun terjadi kehilangan hampir seperempat dari gaya awal, sistem tetap memiliki kapasitas layanan yang memadai.

## **4.2 Pembahasan**

Hasil analisis struktur menunjukkan bahwa balok beton prategang bentang 40 m yang diteliti memiliki respons mekanika yang konsisten dengan teori elastisitas dan konsep keseimbangan momen pada sistem prategang. Momen maksimum akibat kombinasi beban mati dan beban hidup sebesar  $13,64 \times 10^9$  Nmm terjadi di tengah bentang, yang secara teoritis memang merupakan lokasi kritis untuk balok sederhana dengan pembebanan gravitasi merata dan terpusat. Dari nilai

tersebut terlihat bahwa kontribusi beban mati sebesar 7.538 kNm lebih dominan dibanding beban hidup yang terdiri dari 4.252 kNm akibat beban terbagi rata dan 1.852 kNm akibat beban titik. Artinya, sekitar 55% momen total berasal dari beban permanen struktur sendiri, sedangkan 45% berasal dari beban lalu lintas.

Dominasi beban mati ini memberikan implikasi penting terhadap efisiensi desain. Berat sendiri balok sebesar 27,25 kN/m dan tambahan beban mati 10,44 kN/m (gabungan pelat dan beban tambahan) menunjukkan bahwa dimensi penampang memiliki kontribusi signifikan terhadap respons lentur. Dalam konteks ini, penggunaan sistem prategang memungkinkan pengendalian tegangan tanpa perlu meningkatkan tinggi penampang secara berlebihan.

Perubahan paling signifikan terlihat pada analisis penampang komposit. Momen inersia meningkat dari  $5,93 \times 10^{11} \text{ mm}^4$  pada kondisi non-komposit menjadi  $8,63 \times 10^{11} \text{ mm}^4$  setelah pelat bekerja komposit. Peningkatan sebesar 45,5% ini berdampak langsung pada reduksi tegangan lentur, karena berdasarkan persamaan:

$$\sigma = \frac{My}{I}$$

tegangan berbanding terbalik dengan momen inersia. Dengan momen maksimum tetap  $13,64 \times 10^9 \text{ Nmm}$  dan jarak serat bawah 1387,57 mm pada kondisi komposit, tegangan lentur yang dihasilkan menjadi lebih kecil dibanding kondisi sebelum komposit. Secara konseptual, apabila momen inersia meningkat hampir setengah kali lipat, maka tegangan lentur turun secara proporsional, sehingga risiko retak pada serat bawah semakin kecil.

Pergeseran sumbu netral akibat aksi komposit juga meningkatkan eksentrisitas efektif tendon menjadi 1062,57 mm. Dengan gaya efektif akhir sebesar 8.618,28 kN setelah kehilangan 23,39%, momen internal akibat prategang dapat dihitung sebagai:

$$M_p = F_e \cdot e$$

$$M_p = 8.618,28 \times 10^3 \times 1,06257$$

yang menghasilkan momen lawan dalam orde  $9,15 \times 10^9$  Nmm. Jika dibandingkan dengan momen eksternal maksimum  $13,64 \times 10^9$  Nmm, maka sekitar 67% momen eksternal telah diimbangi oleh momen prategang. Sisanya dikendalikan oleh kapasitas lentur beton dalam kondisi komposit. Angka ini menunjukkan bahwa sistem prategang berperan dominan dalam menjaga keseimbangan tegangan.

Pada tahap jacking, gaya awal sebesar 11.430 kN masih berada dalam batas tegangan transfer beton. Setelah mempertimbangkan seluruh mekanisme kehilangan, gaya efektif akhir turun menjadi 8.618,28 kN. Penurunan sebesar 2.811,72 kN tersebut terutama dipengaruhi oleh friksi, creep, shrinkage, dan relaksasi baja. Namun demikian, gaya efektif yang tersisa tetap cukup untuk menjaga tegangan tarik maksimum di bawah batas izin 3,35 MPa.

Jika kuat tekan beton diasumsikan sebesar 40 MPa, maka batas tegangan tekan layanan menurut ketentuan adalah  $0,45 f'_c$  atau sebesar 18 MPa. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa tegangan tekan maksimum yang terjadi pada serat atas tetap berada di bawah nilai tersebut, sehingga tidak terjadi overstress pada zona tekan.

Dari sisi distribusi tegangan, serat bawah tetap menjadi lokasi kritis karena menerima kombinasi tarik akibat momen eksternal dan tekan akibat prategang. Namun dengan meningkatnya momen inersia dan eksentrisitas efektif pada kondisi komposit, tegangan tarik pada serat bawah berhasil ditekan sehingga tetap berada dalam kategori tidak retak pada kondisi layanan. Hal ini sangat penting dalam perspektif durabilitas karena retak awal dapat menjadi jalur masuknya air dan klorida yang berpotensi menyebabkan korosi tendon.

Kehilangan prategang sebesar 23,39% masih berada dalam rentang wajar untuk sistem post-tensioned bentang panjang. Apabila kehilangan meningkat hingga 30%, maka gaya efektif akan turun menjadi sekitar 8.001 kN dan momen

lawan akibat prategang juga akan berkurang secara signifikan. Kondisi tersebut dapat mendekatkan tegangan tarik ke batas retak. Oleh karena itu, pengendalian mutu pelaksanaan dan kualitas material menjadi faktor penting dalam menjaga agar kehilangan aktual tidak melebihi estimasi perencanaan.

Secara keseluruhan, integrasi antara gaya prategang efektif 8.618,28 kN, eksentrisitas 1062,57 mm, dan momen inersia komposit  $8,63 \times 10^{11} \text{ mm}^4$  menghasilkan sistem struktur yang stabil terhadap momen maksimum  $13,64 \times 10^9 \text{ Nmm}$ . Tidak terdapat kondisi tegangan yang melampaui batas izin baik pada tahap transfer maupun tahap layanan penuh. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi tendon dan dimensi penampang telah dirancang secara rasional dan efisien untuk bentang 40 meter.

Dengan demikian, pembahasan ini menegaskan bahwa hasil analisis numerik tidak hanya memenuhi ketentuan standar, tetapi juga menunjukkan konsistensi dengan prinsip dasar beton prategang, yaitu menciptakan keseimbangan antara momen eksternal dan momen internal melalui pengaturan gaya dan eksentrisitas tendon. Sistem yang dianalisis dapat dikategorikan aman, efisien, dan layak diterapkan untuk struktur bentang panjang dengan kontrol retak dan deformasi yang memadai.

## BAB V

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis jembatan beton pratekan pascatarik bentang 40 meter, dapat disimpulkan bahwa karakteristik pembebanan memberikan pengaruh langsung terhadap distribusi momen dan gaya dalam. Beban mati total sebesar 37,69 kN/m dan beban lalu lintas menghasilkan momen maksimum  $13,64 \times 10^9$  Nmm di tengah bentang, dengan kontribusi beban mati sekitar 55% dari total momen. Distribusi momen mengikuti pola balok sederhana dengan serat bawah sebagai lokasi kritis terhadap tegangan tarik.

Perilaku tegangan pada tahap jacking, pengecoran, dan komposit dapat dikontrol sehingga tidak melampaui batas izin. Gaya awal sebesar 11.430 kN setelah kehilangan prategang 23,39% menjadi gaya efektif 8.618,28 kN. Tegangan tekan maksimum tetap di bawah  $0,45 f_c$  (18 MPa untuk beton 40 MPa) dan tegangan tarik tidak melebihi 3,35 MPa sesuai ketentuan SNI 1725:2016 dan SNI T-12-2004.

Kehilangan prategang sebesar 23,39% masih dalam batas wajar dan tidak menurunkan kinerja struktur secara signifikan. Dengan eksentrisitas 1062,57 mm, gaya efektif menghasilkan momen internal sekitar  $9,15 \times 10^9$  Nmm atau  $\pm 67\%$  dari momen eksternal maksimum, sehingga keseimbangan momen tetap terjaga pada tahap layan.

Geometri penampang dan aksi komposit meningkatkan momen inersia dari  $5,93 \times 10^{11}$  mm<sup>4</sup> menjadi  $8,63 \times 10^{11}$  mm<sup>4</sup> atau naik 45,5%, yang berdampak pada peningkatan kekakuan dan penurunan tegangan lentur. Sistem perletakan sendi-rol menghasilkan respons balok sederhana yang aman, dengan momen maksimum di tengah bentang dan tanpa momen negatif signifikan di tumpuan.

Secara keseluruhan, struktur memenuhi persyaratan kekuatan dan layanan serta menunjukkan kinerja yang aman dan efisien untuk bentang 40 meter.

## DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. (2020). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (9th ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ACI Committee 423. (2016). Guide for Prestressed Concrete (ACI 423.1R-16). American Concrete Institute.
- ACI Committee 222. (2019). Protection of Metals in Concrete Against Corrosion (ACI 222R-19). American Concrete Institute.
- Benmokrane, B., Zhang, B., & Vézina, D. (2021). Reliability-based prestress loss estimation in post-tensioned concrete bridge girders. *Engineering Structures*, 246, 112979. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112979>
- Chen, S., Ma, Z., & Tadros, M. (2020). Time-dependent prestress losses in prestressed concrete bridge girders: Field monitoring and analytical modeling. *Journal of Bridge Engineering*, 25(9), 04020063. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001640](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001640)
- Fang, Y., Wang, W., & Liu, K. (2023). Effects of tendon grouting quality on the durability and performance of post-tensioned concrete structures: A review. *Construction and Building Materials*, 362, 129912. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.129912>
- Guo, H., Zhang, Q., Li, S., & He, X. (2024). Monitoring and analysis of prestress loss in highway bridges in China. *Sensors*, 24(14), 4549. <https://doi.org/10.3390/s24144549>
- Hassan, A. M., & Abou-Elfath, H. (2020). Numerical modeling of long-term deflection in prestressed concrete beams incorporating creep and shrinkage. *Engineering Structures*, 212, 110557. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110557>
- Kim, J., Lee, C. G., & Park, S. (2021). Time-dependent reliability assessment and updating of post-tensioned concrete bridges. *ASCE Journal of Bridge Engineering*, 26(4), 04021012. <https://doi.org/10.1061/JSENDH.0001188>
- Kim, S. H., Han, S., & Park, W. (2022). Analysis of short-term prestress losses in post-tensioned structures using smart strands. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 16(3), 22. <https://doi.org/10.1186/s40069-021-00488-3>

- Lee, J., Cho, S., & Yoon, Y. (2021). Assessment of void formation in grouted PT ducts using nondestructive testing. *Structural Concrete*, 22(5), 2804–2817. <https://doi.org/10.1002/suco.202000419>
- PCI. (2018). *PCI Design Handbook: Precast and Prestressed Concrete* (8th ed.). Precast/Prestressed Concrete Institute.
- Post-Tensioning Institute. (2018). *Post-Tensioning Manual* (7th ed.). PTI.
- Saidi, M., Hosseini, A., & Rahmani, H. (2023). Impact of grouting defects on the structural performance of bonded post-tensioned tendons: Numerical and experimental investigations. *Construction and Building Materials*, 366, 130138. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130138>
- SNI 1725:2016. (2016). *Pembebanan untuk Jembatan*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 2847:2019. (2019). *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI T-12-2004. (2004). *Perencanaan Struktur Beton Pratekan*. Direktorat Bina Teknik.
- Vecino Muñoz, B., Hu, Y., & Radomski, W. (2025). Degradation modelling of external grouted post-tensioning systems. *Engineering Structures*, 303, 115820. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.115820>
- Zanini, M. A., Menegotto, M., & Pellegrino, C. (2022). New trends in assessing prestress loss in post-tensioned concrete members. *Frontiers in Built Environment*, 8, 956066. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.956066>
- Zhou, T., Li, X., & Zhao, L. (2023). Numerical evaluation of long-term prestress losses incorporating creep–shrinkage interaction effects in concrete bridges. *Engineering Structures*, 280, 115577. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115577>

## LAMPIRAN

Bukti submid artikel di [Civil Engineering Dimension](https://ced.petra.ac.id/index.php/civ/index) dengan terakreditasi SINTA 1, published by Petra Christian University, Indonesia.

Laman jurnal : <https://ced.petra.ac.id/index.php/civ/index>

Laman SINTA : <https://sinta.kemdiktisaintek.go.id/journals/profile/709>

### Submissions

33162 / Budi Santoso / Analysis of Structural Performance of a 40m Post-Tensioned Prestressed Concrete Bridge With Pin-Roller Support System

Submission Files

File ID	Title	Date	Type
62060	Analysis of Structural Performance of a 40m Post-Tensioned Prestressed Concrete Bridge With Pin-Roller Support System	February 24, 2026	Article Text

Pre-Review Discussions

Name	From	Last Reply	Replies	Closed
No Items				

### Akreditasi

CIVIL ENGINEERING DIMENSION

LPPM UNIVERSITAS KRISTEN PETRA

P-ISSN : 14109530 ↔ E-ISSN : 1979570X Subject Area : Engineering

0.97222 Impact

9031 Google Citations

Sinta 1 Current Accreditation

History Accreditation

Year	Accreditation
2017	Accredited
2018	Accredited
2019	Accredited
2020	Accredited
2021	Accredited
2022	Accredited
2023	Accredited
2024	Accredited
2025	Accredited
2026	Accredited

Citation Per Year by Google Scholar

Year	Citation
2018	600
2019	700
2020	750
2021	750
2022	750
2023	750
2024	750
2025	750
2026	100

Journal By Google Scholar

Metric	All	Since 2021
Citation	9031	3973
h-index	43	26
i10-index	179	82