ANALISIS NUMERIK DISTRIBUSI GAYA, TEGANGAN, DAN REGANGAN KABEL PADA JEMBATAN *CABLE STAYED* DENGAN BEBAN LAYAN

Mariano bintang fabio[1*], Mohammad erfan[1], Hadi Surya Wibawanto Sunarwadi[1]

[1]*Program Studi Teknik Sipil S1, ITN Malang,*

Email: bintangfabio1901@gmail.com

[1]*Program Studi Teknik Sipil S1, ITN Malang,*

Email: mohammaderfan@ftsp.itn.ac.id

[1]*Program Studi Teknik Sipil S1, ITN Malang,*

Email: hadiwibawanto@lecturer.itn.ac.id

ABSTRAK

Jembatan *cable stayed* merupakan salah satu tipe jembatan bentang menengah hingga panjang yang banyak digunakan karena memiliki efisiensi struktur, kekakuan tinggi, dan nilai estetika yang baik. Pada sistem ini, kabel berfungsi sebagai elemen utama yang menyalurkan beban dari gelagar menuju *pylon* sehingga distribusi gaya tarik kabel sangat memengaruhi perilaku struktur. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi gaya, tegangan, dan regangan kabel pada jembatan *cable stayed* tipe *H-Pylon* berdasarkan kombinasi pembebanan *Service I* dan *Strength I* menggunakan perangkat lunak MIDAS Civil.

Model jembatan yang dianalisis memiliki panjang total 240 m dengan satu *pylon* bertipe H dan konfigurasi kabel *semi fan*. Penentuan gaya awal (*pretension*) kabel dilakukan melalui proses iterasi pada kombinasi pembebanan *Service I* hingga diperoleh kondisi keseimbangan struktur. Selanjutnya dilakukan analisis respons kabel pada kombinasi pembebanan *Service I* dan *Strength I*. Hasil analisis menunjukkan bahwa distribusi gaya kabel pada kombinasi pembebanan *Strength I* lebih besar dibandingkan *Service I* dengan pola distribusi yang relatif sama pada setiap kabel. Peningkatan gaya tarik menyebabkan tegangan dan regangan kabel meningkat sesuai dengan teori mekanika material. Seluruh nilai tegangan masih berada di bawah tegangan izin sebesar **1116 MPa**, sedangkan regangan masih berada pada daerah elastis, sehingga sistem kabel dinyatakan memenuhi persyaratan kekuatan dan keamanan berdasarkan metode *Load and Resistance Factor Design* (LRFD).

Kata Kunci: Cable Stayed Bridge, Gaya Kabel, Tegangan Kabel, Regangan Kabel, Service I, Strength I, MIDAS Civil.

ABSTRACT

Cable-stayed bridges are one of the most widely used bridge types for medium- to long-span applications due to their structural efficiency, high stiffness, and aesthetic appearance. In this structural system, stay cables act as the primary load-carrying elements that transfer loads from the girder to the pylon, making the distribution of cable forces a critical factor affecting the overall structural behavior. This study aims to analyze the distribution of cable force, stress, and strain in an H-pylon cable-stayed bridge under Service I and Strength I load combinations using MIDAS Civil software.

The bridge model analyzed has a total span of 240 m, consisting of a single H-shaped pylon with a semi-fan cable arrangement. The initial cable pretension was determined through an iterative process under the Service I load combination until structural equilibrium was achieved. Subsequently, the cable responses under Service I and Strength I load combinations were evaluated. The results indicate that the cable force distribution under the Strength I load combination is greater than that under Service I, while maintaining a similar distribution pattern among all stay cables. The increase in cable force leads to corresponding increases in cable stress and strain, consistent with the principles of mechanics of materials. Furthermore, all calculated cable stresses remain below the allowable stress limit of 1116 MPa, and the corresponding strains remain within the elastic range. Therefore, the cable system satisfies the strength and safety requirements based on the Load and Resistance Factor Design (LRFD) method.

Keywords: Cable Stayed Bridge, Cable Force, Cable Stress, Cable Strain, Service I, Strength I, MIDAS Civil.

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Jembatan *cable stayed* merupakan salah satu tipe jembatan bentang panjang yang banyak digunakan karena memiliki efisiensi struktur, kekakuan tinggi, dan nilai estetika yang baik. Pada sistem ini, kabel berperan sebagai elemen utama yang menyalurkan beban dari gelagar ke pylon, sehingga distribusi gaya kabel sangat memengaruhi tegangan dan regangan yang terjadi pada kabel serta kinerja struktur secara keseluruhan (Podolny & Scalzi, 1976; Walther et al., 1999; Gimsing & Georgakis, 2012).

Penentuan *pretension* kabel merupakan tahapan penting untuk memperoleh distribusi gaya yang optimal. Setelah kondisi *pretension* tercapai, kinerja kabel dievaluasi menggunakan kombinasi pembebanan *Service I* dan *Strength I* berdasarkan metode *Load and Resistance Factor Design* (LRFD) sesuai SNI 1725:2016. Dengan bantuan perangkat lunak *MIDAS Civil*, analisis gaya, tegangan, dan regangan kabel dapat dilakukan secara lebih akurat (Nazmy & Abdel-Ghaffar, 1990; BSN, 2016; MIDAS IT, 2023).

Berbagai penelitian telah membahas optimasi *pretension* dan perilaku global jembatan *cable stayed*, namun kajian yang secara khusus membandingkan distribusi gaya, tegangan, dan regangan kabel berdasarkan kombinasi pembebanan *Service I* dan *Strength I* pada jembatan *cable stayed* tipe *H-Pylon* masih terbatas.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menganalisis dan membandingkan distribusi gaya, tegangan, dan regangan kabel pada jembatan *cable stayed* tipe *H-Pylon* menggunakan *MIDAS Civil* berdasarkan kombinasi pembebanan *Service I* dan *Strength I*. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi dalam evaluasi dan perencanaan jembatan *cable stayed* berdasarkan metode *LRFD*.

TINJAUAN PUSTAKA

Pengertian Jembatan *Cable Stayed*

Jembatan *cable stayed* merupakan salah satu jenis jembatan bentang panjang yang memanfaatkan kabel sebagai elemen utama untuk menopang gelagar secara langsung melalui pylon. Berbeda dengan jembatan gantung (*suspension bridge*), kabel pada jembatan *cable stayed* terhubung langsung antara gelagar dan pylon sehingga beban yang bekerja pada gelagar diteruskan ke pylon melalui gaya tarik pada kabel. Sistem ini menghasilkan struktur yang lebih kaku, efisien, serta mampu mengurangi momen lentur pada gelagar dibandingkan sistem jembatan konvensional (Podolny & Scalzi, 1976; Gimsing & Georgakis, 2012).

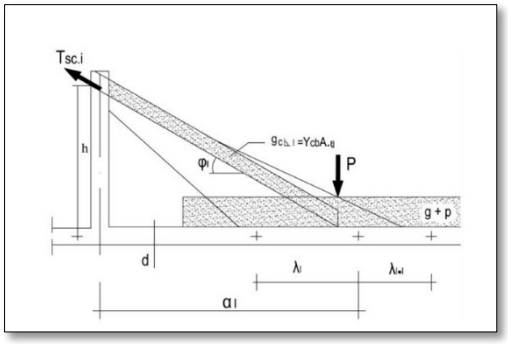
Keunggulan utama jembatan *cable stayed* adalah kemampuannya menjangkau bentang menengah hingga panjang dengan penggunaan material yang relatif lebih efisien, memiliki deformasi yang lebih kecil, serta memberikan nilai estetika yang tinggi. Oleh karena itu, tipe jembatan ini banyak diterapkan pada pembangunan jembatan modern, terutama untuk bentang sekitar 150–1.000 meter, dengan berbagai konfigurasi kabel seperti *fan*, *semi-fan*, dan *harp* yang dipilih sesuai kebutuhan struktur dan pertimbangan konstruksi (Walther et al., 1999; Gimsing & Georgakis, 2012).

Secara umum, komponen utama jembatan *cable stayed* terdiri atas gelagar (*deck*), pylon, dan kabel (*stay cable*). Gelagar berfungsi menerima beban lalu lintas dan beban lainnya, kemudian menyalurkannya kepada kabel. Selanjutnya, kabel mentransfer beban tersebut ke pylon dalam bentuk gaya tarik, sedangkan pylon meneruskan beban ke sistem pondasi. Interaksi antara ketiga komponen tersebut sangat menentukan kinerja struktur, sehingga distribusi gaya pada kabel menjadi salah satu aspek penting yang harus diperhatikan dalam proses analisis dan perencanaan jembatan *cable stayed* (Nazmy & Abdel-Ghaffar, 1990; Chen et al., 2000).

Kabel pada Jembatan *Cable Stayed*

Kabel (*stay cable*) merupakan elemen struktur utama pada jembatan *cable stayed* yang berfungsi menopang gelagar (*deck*) dan meneruskan beban menuju pylon dalam bentuk gaya tarik (*tension*). Besarnya gaya tarik pada setiap kabel dipengaruhi oleh geometri jembatan, posisi kabel, kekakuan struktur, serta kombinasi pembebanan yang bekerja. Perbedaan distribusi gaya tersebut akan memengaruhi perilaku struktur secara keseluruhan sehingga perlu dievaluasi dalam proses perencanaan maupun analisis jembatan *cable stayed* (Podolny & Scalzi, 1976; Gimsing & Georgakis, 2012; Chen et al., 2000).

Dalam proses perencanaan, setiap kabel diberikan gaya awal (*pretension*) untuk menghasilkan kondisi keseimbangan struktur dan mengurangi deformasi gelagar. Nilai *pretension* umumnya ditentukan melalui analisis iteratif menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*). Setelah kondisi keseimbangan tercapai, perubahan kombinasi pembebanan akan menyebabkan perubahan distribusi gaya pada kabel yang selanjutnya memengaruhi tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*). Oleh karena itu, analisis distribusi gaya kabel menjadi salah satu tahapan penting dalam evaluasi perilaku jembatan *cable stayed* (Nazmy & Abdel-Ghaffar, 1990; Ren et al., 2005; Wang et al., 2019).



Gambar 1. Diagram gaya pada kabel *stay cable* beserta parameter geometri pada jembatan *cable stayed* Podolny dan Scalzi, 1976

Pada Gambar 2.2, gaya tarik kabel $T_{SC,i}$ bekerja sepanjang sumbu kabel dan membentuk sudut φ_i terhadap bidang horizontal. Beban vertikal *P*yang bekerja pada gelagar diteruskan menuju pylon melalui gaya tarik kabel, sedangkan berat sendiri kabel dinyatakan sebagai $g_{cb,i}$. Parameter geometri seperti tinggi pylon (h), jarak horizontal kabel terhadap pylon (a_i), serta panjang panel (λ_i) memengaruhi besar gaya tarik yang terjadi pada setiap kabel. Besarnya gaya tarik tersebut selanjutnya menjadi dasar dalam perhitungan tegangan dan regangan kabel, sehingga evaluasi distribusi gaya merupakan langkah awal dalam menganalisis perilaku jembatan *cable stayed*.

Tegangan dan Regangan Kabel

Tegangan (*stress*) merupakan gaya tarik yang bekerja pada setiap satuan luas penampang kabel, sedangkan regangan (*strain*) merupakan perubahan panjang relatif kabel akibat gaya tarik tersebut. Pada daerah elastis, hubungan antara gaya tarik, tegangan, dan regangan mengikuti Hukum Hooke sehingga besarnya tegangan dan regangan dapat dihitung menggunakan Persamaan (1) dan Persamaan (2)

$$\sigma = \frac{T}{A} \quad (1)$$

dengan :

σ = tegangan kabel (MPa)

T= gaya tarik kabel (N)

A= luas penampang kabel (mm²)

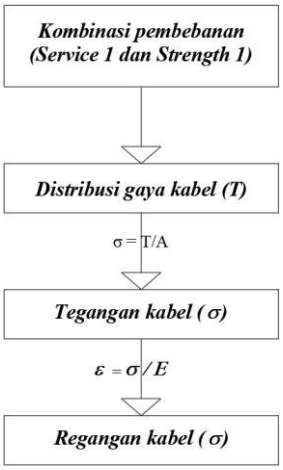
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2)$$

dengan:

ε = regangan kabel

E= modulus elastisitas kabel (MPa)

Berdasarkan Persamaan (2.1) dan Persamaan (2.2), perubahan gaya tarik pada kabel akan memengaruhi besarnya tegangan dan regangan. Oleh karena itu, ketiga parameter tersebut digunakan dalam penelitian ini untuk mengevaluasi respons kabel pada kombinasi pembebanan *Service I* dan *Strength I*.



Gambar 2.Hubungan Antarvariabel Penelitian

Gambar 2 .menunjukkan hubungan antarvariabel yang dianalisis dalam penelitian ini. Kombinasi pembebanan *Service I* dan *Strength I* dianalisis menggunakan MIDAS Civil untuk memperoleh distribusi gaya kabel. Selanjutnya, gaya tarik kabel digunakan sebagai dasar perhitungan tegangan dan regangan sehingga dapat dilakukan analisis dan perbandingan perilaku kabel pada kedua kombinasi pembebanan.

METODOLOGI PERENCANAAN

Data Perencanaan

Data Geometrik Jembata Aik Bari-Sumbawa :

Data Struktur :

Tipe Jembatan	: *Cable Stayed*
Kelas Jembatan	: I (satu)
Panjang Jembatan	: 240 meter
Lebar Jembatan	: 9 meter
Lebar Lantai Kendaraan	: 8 meter
Lebar Trotoir (2 x 0.5)	: 0.5 meter
Jarak Antar Gelagar Memanjang	: 2 meter
Jarak Antar Gelagar Melintang	: 5 meter

Data Material :

Mutu Beton (Fc')	: 30 MPa
	: 60 MPa
Mutu Profil Baja	: BJTS 520
Fy	: 360 MPa
Fu	: 485 MPa
Mutu *Steel Deck*	: 560 MPa
Mutu Baut	: ASTM A490
E Baja	: 200000 MPa

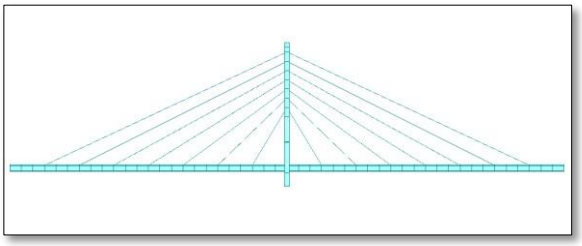
Data Material Kabel (ASTM A416-06 Grade 270)

Jenis Kabel	:PrestressingSteel Strand
Diameter Strand	: 15,24 mm
Luas Strand	: 140 mm^2
Kuat Tarik Ultimit (fpu)	: 1860 MPa

Tegangan ijin : 1116 MPa
Modulus Elastisitas : 195.000 MPa
Berat Jenis : 78,5 kN/m^3
Data penampang Struktur
1. Box Girder
Dimensi box girder yang digunakan h = 2500 mm, b = 1250 mm, tw = 50 mm, dan tf = 50 mm
2. Gelagar Melintang
Gelagar melintang menggunakan WF 900 x 300 x 16 x 28
3. Gelagar Memanjang
Gelagar memanjang menggunakan WF 500 x 200 x 10 x 16
4. Pylon
Menara pylon menggunakan bentuk H dengan b = 2000 mm dan h = 2000 mm

Pemodelan Struktur

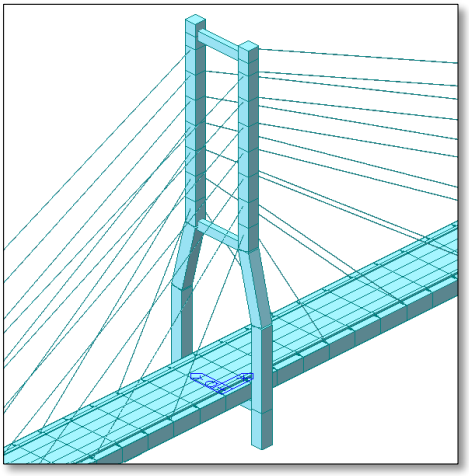
Pemodelan struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak *MIDAS Civil* dengan membangun model tiga dimensi (*3D model*) yang mengacu pada data geometri, dimensi penampang, dan spesifikasi material hasil perencanaan. Model tersebut disusun untuk merepresentasikan perilaku struktur jembatan *Cable Stayed* tipe *H-Pylon* sehingga respons struktur terhadap kombinasi pembebanan dapat dianalisis secara numerik. Tahapan pemodelan meliputi pembentukan geometri struktur, pendefinisian material dan penampang, penentuan kondisi perletakan, pemberian gaya awal pada kabel, serta pendefinisian pembebanan sesuai ketentuan yang berlaku.



Gambar 3. Model Tiga Dimensi Jembatan Cable Stayed pada MIDAS Civil

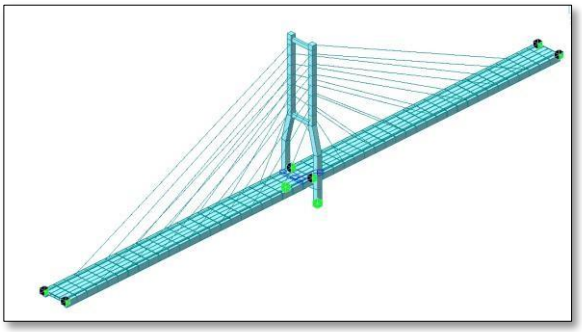
Komponen utama struktur yang terdiri atas pylon, gelagar utama (*box girder*), dan gelagar melintang dimodelkan menggunakan Beam Element, sedangkan kabel *stay cable* dimodelkan menggunakan Frame Element. Penggunaan jenis elemen tersebut disesuaikan dengan karakteristik masing-masing komponen sehingga perilaku struktur dapat direpresentasikan secara memadai dalam proses analisis. Seluruh elemen kemudian dihubungkan berdasarkan sistem struktur yang direncanakan sehingga membentuk model jembatan yang utuh.

Setelah geometri dan konektivitas struktur selesai didefinisikan, dilakukan pendefinisian sifat material, penampang, serta kondisi batas (*boundary condition*) pada setiap titik tumpuan sesuai dengan sistem struktur yang direncanakan. Selanjutnya, gaya awal (*pretension*) diberikan pada setiap kabel sebagai kondisi awal sebelum analisis pembebanan dilakukan. Nilai *pretension* diperoleh melalui proses analisis menggunakan kombinasi pembebanan *Service I* dan selanjutnya digunakan sebagai kondisi awal dalam analisis kombinasi pembebanan *Strength I*.



Gambar 4. Pemodelan Stay Cable dan Pylon pada MIDAS Civil

Model struktur yang telah selesai kemudian digunakan sebagai dasar untuk proses analisis numerik. Hasil analisis yang diperoleh dari kombinasi pembebanan *Service I* dan *Strength I* berupa gaya tarik, tegangan, dan regangan pada setiap kabel *stay cable*. Data tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi pengaruh kedua kombinasi pembebanan terhadap perilaku kabel pada struktur jembatan.



Gambar 5. Kondisi Perletakan (*Boundary Condition*) pada Model Struktur

Pembebanan dan Tahapan Analisis

1. Jenis pembebanan
   - Beban mati (*Dead Load*)
   - Beban mati tambahan (Superimposed Dead Load)
   - Beban lalu lintas
   - Beban angin

- Beban temperatur
- Beban lain (jika ada)

2. Kombinasi pembebanan
   - Service I
   - Strength I
3. Tahapananalisis
   - Membuat model struktur.
   - Memasukkan material dan penampang.
   - Memberikan kondisi batas.
   - Memberikan pretension pada kabel.
   - Memasukkan pembebanan.
   - Menjalankan analisis Service I.
   - Menentukan nilai pretension optimum.
   - Menjalankan analisis Strength I menggunakan pretension tersebut.
   - Mengambil hasil berupa gaya, tegangan, dan regangan kabel.

Nilai Pretension Awal pada Setiap Kabel

Kabel	P (kN)	Kabel	P (kN)
1	3822.92	15	3822.92
2	3758.44	16	3758.44
3	3330.10	17	3330.10
4	3008.85	18	3008.85
5	2767.92	19	2767.92
6	2553.75	20	2553.75
7	2205.73	21	2205.73
8	3822.92	22	3822.92
9	3758.44	23	3758.44
10	3330.10	24	3330.10
11	3008.85	25	3008.85
12	2767.92	26	2767.92
13	2553.75	27	2553.75
14	2205.73	28	2205.73

Nilai *pretension* pada setiap kabel ditentukan melalui proses penyesuaian (*trial and error*) menggunakan kombinasi pembebanan *Service I* hingga diperoleh kondisi keseimbangan struktur yang memenuhi kriteria perencanaan. Nilai *pretension* tersebut selanjutnya digunakan sebagai kondisi awal dalam analisis kombinasi pembebanan *Strength I.*

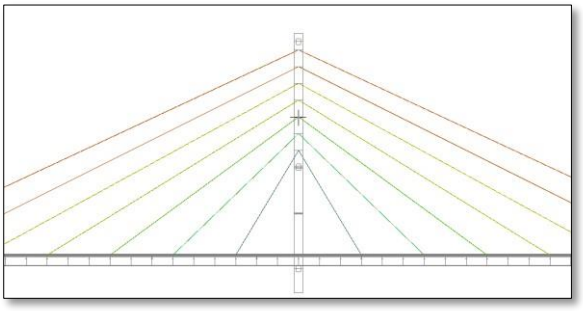
HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Gaya Kabel Stay

Analisis gaya kabel dilakukan untuk mengetahui distribusi gaya tarik (*tensile force*) yang bekerja pada setiap kabel *stay cable* akibat kombinasi pembebanan *Service I* dan *Strength I*. Nilai gaya kabel diperoleh dari hasil analisis numerik menggunakan perangkat lunak *MIDAS Civil* setelah model struktur mencapai kondisi keseimbangan dengan nilai *pretension* yang telah ditentukan. Distribusi gaya pada setiap kabel selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi perubahan respons struktur akibat perbedaan kombinasi pembebanan.

Distribusi Gaya Kabel pada Kombinasi Pembebanan *Service I*

Pada kombinasi pembebanan *Service I*, gaya tarik pada setiap kabel merupakan kondisi kerja struktur pada tahap layan. Hasil analisis menunjukkan bahwa besar gaya kabel berbeda pada setiap posisi kabel, bergantung pada panjang kabel, sudut kemiringan, serta distribusi beban yang diterima oleh struktur.



Gambar 6. Distribusi Gaya Kabel pada Kombinasi Pembebanan *Service I*

Tabel 1. Gaya Tarik Kabel akibat Kombinasi Pembebanan *Service I*

No Kabel	Elemen	Load	Force-I (kN)	Force-J (kN)
1	658	LAYAN 1 B	3804.608	3840.758
2	659	LAYAN 1 B	3741.511	3774.711
3	660	LAYAN 1 B	3314.634	3344.883
4	661	LAYAN 1 B	2994.889	3022.187
5	662	LAYAN 1 B	2755.428	2779.774
6	663	LAYAN 1 B	2542.710	2564.105
7	664	LAYAN 1 B	2196.301	2214.746
8	665	LAYAN 1 B	3804.608	3840.758
9	666	LAYAN 1 B	3741.511	3774.711
10	667	LAYAN 1 B	3314.634	3344.883
11	668	LAYAN 1 B	2994.889	3022.187
12	669	LAYAN 1 B	2755.428	2779.774
13	670	LAYAN 1 B	2542.710	2564.105
14	671	LAYAN 1 B	2196.301	2214.746

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel.1, terlihat bahwa gaya tarik pada setiap kabel memiliki nilai yang berbeda. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa masing-masing kabel memiliki kontribusi yang berbeda dalam menahan beban sesuai dengan konfigurasi sistem *cable stayed*.

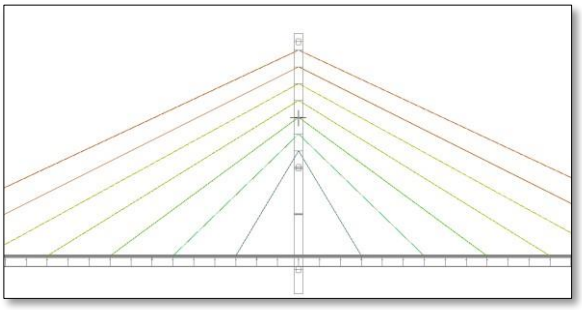
Dibandingkan dengan nilai *pretension* awal, gaya tarik kabel pada kondisi *Service I* mengalami perubahan akibat pengaruh beban layan yang bekerja pada struktur. Meskipun demikian, pola distribusi gaya tetap menunjukkan kecenderungan yang sama dengan kondisi awal, di mana kabel dengan *pretension* yang

lebih besar tetap memiliki gaya tarik yang relatif lebih tinggi.

Secara umum, hasil analisis pada kombinasi pembebanan *Service I* menunjukkan bahwa sistem kabel mampu mendistribusikan beban dengan baik. Nilai gaya tarik yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai dasar perbandingan dengan hasil analisis pada kombinasi pembebanan *Strength I*.

Gaya Kabel Akibat Kombinasi Pembebanan *Strength I*

Kombinasi pembebanan *Strength I* digunakan untuk mengevaluasi respons struktur pada kondisi batas ultimit (*ultimate limit state*). Kombinasi ini memperhitungkan faktor beban yang lebih besar dibandingkan kombinasi *Service I*, sehingga menghasilkan gaya internal yang lebih tinggi pada elemen struktur. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan kabel *stay cable* dalam menahan gaya tarik akibat pembebanan maksimum yang direncanakan.



Gambar 7. Distribusi Gaya Kabel pada Kombinasi Pembebanan *Strength I*

Tabel 2. Gaya Tarik Kabel akibat Kombinasi Pembebanan *Strength I*

No Kabel	Elemen	Load	Force-I (kN)	Force-J (kN)
1	658	KUAT 1 B	3805.770	3841.921
2	659	KUAT 1 B	3744.325	3777.524
3	660	KUAT 1 B	3319.145	3349.394
4	661	KUAT 1 B	3000.902	3028.199
5	662	KUAT 1 B	2762.342	2786.688
6	663	KUAT 1 B	2549.252	2570.647
7	664	KUAT 1 B	2199.943	2218.388
8	665	KUAT 1 B	3805.770	3841.921
9	666	KUAT 1 B	3744.325	3777.524
10	667	KUAT 1 B	3319.145	3349.394
11	668	KUAT 1 B	3000.902	3028.199
12	669	KUAT 1 B	2762.342	2786.688
13	670	KUAT 1 B	2549.252	2570.647
14	671	KUAT 1 B	2199.943	2218.388

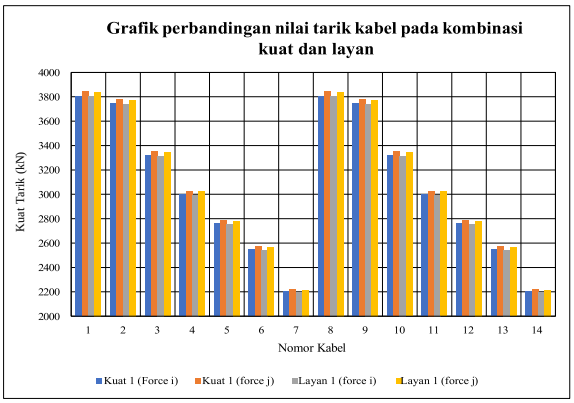
Berdasarkan hasil analisis pada Tabel.2, gaya tarik pada setiap kabel pada kombinasi pembebanan *Strength I* memiliki nilai yang berbeda sesuai dengan posisi dan fungsi masing-masing kabel dalam mendukung struktur jembatan.

Dibandingkan dengan kondisi *Service I*, gaya tarik kabel pada kombinasi *Strength I* mengalami peningkatan akibat penggunaan faktor pembebanan yang lebih besar. Meskipun demikian, pola distribusi gaya antar kabel tetap menunjukkan kecenderungan yang sama.

Hasil analisis pada kondisi *Strength I* selanjutnya digunakan sebagai dasar perbandingan dengan hasil analisis *Service I* untuk mengevaluasi pengaruh kombinasi pembebanan terhadap distribusi gaya kabel.

Perbandingan Gaya Kabel pada Kombinasi Pembebanan *Service I* dan *Strength I*

Untuk mengetahui pengaruh kombinasi pembebanan terhadap distribusi gaya kabel, dilakukan perbandingan hasil analisis gaya tarik pada kondisi *Service I* dan *Strength I*. Perbandingan ini bertujuan untuk mengidentifikasi perubahan gaya tarik yang terjadi pada setiap kabel akibat perbedaan faktor pembebanan yang digunakan.



Gambar 8. Grafik Perbandingan Gaya Tarik Kabel pada Kombinasi Pembebanan *Service I* dan *Strength I*

Setelah penyajian grafik, hasil perbandingan gaya tarik kabel disajikan dalam bentuk tabel untuk menunjukkan besarnya perubahan gaya pada setiap kabel.

Tabel. 3 Perbandingan Gaya Tarik Kabel pada Kombinasi Pembebanan *Service I* dan *Strength I*

No Kabel	Elemen	Load	Force-I (kN)	Load	Force-I (kN)	Selisih Force-I (kN)	Kenaikan (%)
1	658	KUAT 1 B	3805.770	LAYAN 1 B	3804.614	1.156	0.030
2	659	KUAT 1 B	3744.325	LAYAN 1 B	3741.502	2.823	0.075
3	660	KUAT 1 B	3319.145	LAYAN 1 B	3314.604	4.541	0.137
4	661	KUAT 1 B	3000.902	LAYAN 1 B	2994.831	6.071	0.202
5	662	KUAT 1 B	2762.342	LAYAN 1 B	2755.331	7.011	0.254
6	663	KUAT 1 B	2549.252	LAYAN 1 B	2542.564	6.688	0.262
7	664	KUAT 1 B	2199.943	LAYAN 1 B	2196.122	3.821	0.174
8	665	KUAT 1 B	3805.770	LAYAN 1 B	3804.608	1.162	0.031
9	666	KUAT 1 B	3744.325	LAYAN 1 B	3741.487	2.838	0.076
10	667	KUAT 1 B	3319.145	LAYAN 1 B	3314.580	4.566	0.138
11	668	KUAT 1 B	3000.902	LAYAN 1 B	2994.797	6.104	0.203
12	669	KUAT 1 B	2762.342	LAYAN 1 B	2755.288	7.054	0.255
13	670	KUAT 1 B	2549.252	LAYAN 1 B	2542.514	6.738	0.264
14	671	KUAT 1 B	2199.943	LAYAN 1 B	2196.081	3.862	0.176

Keterangan :

Selisih : F kuat – F layan .....(3)

Kenaikan (%) : $\frac{F\ kuat - F\ layan}{F\ kuat}$ x 100.....(4)

Berdasarkan Gambar 4.3 dan Tabel 4.3, terlihat bahwa gaya tarik kabel pada kombinasi pembebanan *Strength I* lebih besar dibandingkan kombinasi *Service I*. Peningkatan tersebut terjadi karena kombinasi *Strength I* menggunakan faktor pembebanan yang lebih besar sehingga menghasilkan gaya internal yang lebih tinggi pada struktur.

Meskipun terjadi peningkatan gaya tarik, pola distribusi gaya pada setiap kabel tetap menunjukkan kecenderungan yang sama antara kedua kombinasi pembebanan. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan kombinasi pembebanan memengaruhi besarnya gaya yang bekerja pada kabel, namun tidak mengubah karakteristik distribusi gaya pada sistem *cable stayed*.

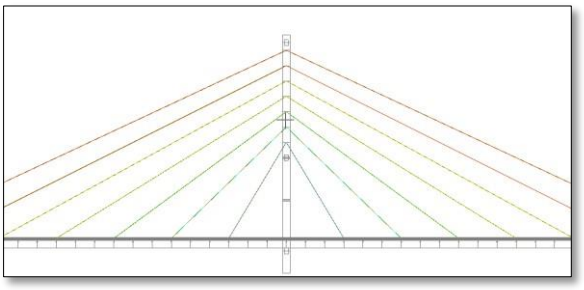
Secara keseluruhan, hasil perbandingan menunjukkan bahwa kombinasi pembebanan memberikan pengaruh terhadap besarnya gaya tarik kabel. Hasil ini menjadi dasar untuk analisis lebih lanjut terhadap perubahan tegangan dan regangan kabel yang dibahas pada subbab berikutnya.

Analisis Tegangan Kabel Stay

Analisis tegangan kabel dilakukan untuk mengetahui besarnya tegangan tarik (*tensile stress*) yang terjadi pada setiap kabel *stay cable* akibat kombinasi pembebanan *Service I* dan *Strength I*. Nilai tegangan diperoleh dari hasil analisis numerik menggunakan perangkat lunak *MIDAS Civil* berdasarkan gaya tarik yang bekerja pada masing-masing kabel dan luas penampang kabel yang digunakan dalam pemodelan. Hasil analisis tegangan selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi keamanan kabel terhadap tegangan izin serta sebagai dasar dalam analisis regangan kabel.

Tegangan Kabel Akibat Kombinasi Pembebanan *Service I*

Kombinasi pembebanan *Service I* digunakan untuk mengevaluasi tegangan kabel pada kondisi layan, yaitu kondisi ketika struktur beroperasi dalam penggunaan normal. Pada tahap ini, tegangan yang terjadi pada setiap kabel dipengaruhi oleh gaya tarik hasil analisis serta karakteristik penampang kabel. Nilai tegangan diperoleh dari hasil analisis perangkat lunak *MIDAS Civil* pada kombinasi pembebanan *Service I*.



Gambar 9. Distribusi Gaya Kabel pada Kombinasi Pembebanan *Service I*

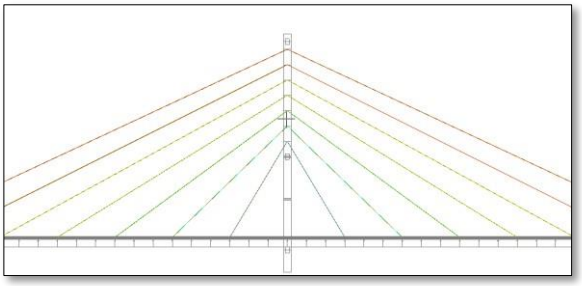
Tabel 4. Gaya Tarik Kabel akibat Kombinasi Pembebanan *Service I*

No kabel	Elemen	Load	Stress-I (kN/m^2)	Stress-J (kN/m^2)
1	658	LAYAN 1 B	445300	449500
2	659	LAYAN 1 B	437900	441800
3	660	LAYAN 1 B	388000	391500
4	661	LAYAN 1 B	350500	353700
5	662	LAYAN 1 B	322500	325400
6	663	LAYAN 1 B	297600	300100
7	664	LAYAN 1 B	257100	259200
8	665	LAYAN 1 B	445300	449500
9	666	LAYAN 1 B	437900	441800
10	667	LAYAN 1 B	387900	391500
11	668	LAYAN 1 B	350500	353700
12	669	LAYAN 1 B	322500	325300
13	670	LAYAN 1 B	297600	300100
14	671	LAYAN 1 B	257100	259200

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 4. Terlihat bahwa tegangan pada setiap kabel memiliki nilai yang berbeda. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh besarnya gaya tarik yang bekerja pada masing-masing kabel. Secara umum, nilai tegangan yang diperoleh pada kondisi *Service I* masih berada di bawah tegangan izin sehingga kabel memenuhi persyaratan keamanan pada kondisi layan.

Tegangan Kabel Akibat Kombinasi Pembebanan *Strength I*

Kombinasi pembebanan *Strength I* digunakan untuk mengevaluasi tegangan kabel pada kondisi batas ultimit (*ultimate limit state*). Kombinasi ini menghasilkan gaya tarik yang lebih besar dibandingkan kondisi *Service I*, sehingga tegangan yang terjadi pada kabel juga mengalami peningkatan. Nilai tegangan diperoleh dari hasil analisis *MIDAS Civil* pada kombinasi pembebanan *Strength I*.



Gambar 10. Distribusi Gaya Kabel pada Kombinasi Pembebanan *Strength I*

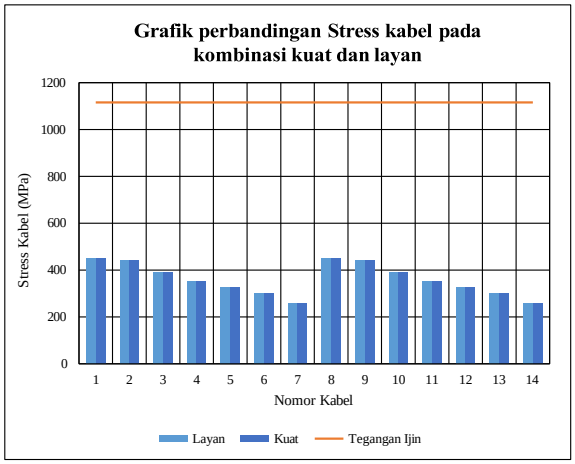
Tabel 5. Gaya Tarik Kabel akibat Kombinasi Pembebanan *Strength I*

No kabel	Elemen	Load	Stress-I (kN/m^2)	Stress-J (kN/m^2)
1	658	KUAT 1 B	445400	449700
2	659	KUAT 1 B	438200	442100
3	660	KUAT 1 B	388500	392000
4	661	KUAT 1 B	351200	354400
5	662	KUAT 1 B	323300	326200
6	663	KUAT 1 B	298400	300900
7	664	KUAT 1 B	257500	259600
8	665	KUAT 1 B	445400	449700
9	666	KUAT 1 B	438200	442100
10	667	KUAT 1 B	388500	392000
11	668	KUAT 1 B	351200	354400
12	669	KUAT 1 B	323300	326200
13	670	KUAT 1 B	298400	300900
14	671	KUAT 1 B	257500	259600

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 4.5, tegangan kabel pada kombinasi pembebanan *Strength I* mengalami peningkatan dibandingkan kondisi *Service I*. Meskipun demikian, nilai tegangan yang diperoleh masih memenuhi batas tegangan izin sehingga kabel tetap berada pada kondisi yang aman.

Perbandingan Tegangan Kabel pada Kombinasi Pembebanan *Service I* dan *Strength I*

Untuk mengetahui pengaruh kombinasi pembebanan terhadap tegangan kabel, dilakukan perbandingan hasil analisis tegangan pada kondisi *Service I* dan *Strength I*. Perbandingan ini bertujuan untuk mengevaluasi perubahan tegangan yang terjadi pada setiap kabel serta memeriksa kesesuaiannya terhadap tegangan izin yang digunakan dalam perencanaan.



Gambar 11. Grafik Perbandingan Tegangan Kabel pada Kombinasi Pembebanan *Service I* dan *Strength I*

Setelah penyajian grafik, hasil perbandingan tegangan kabel disajikan dalam bentuk tabel untuk menunjukkan besarnya perubahan tegangan pada setiap kabel.

Tabel 6. Perbandingan Tegangan Kabel

No kabel	Elemen	Load	Stress Layan (Mpa)	Stress Kuat (Mpa)	Tegangan Ijin (Mpa)	Status
1	658	LAYAN 1 B	449.5	449.7	1116	Aman
2	659	LAYAN 1 B	441.8	442.1	1116	Aman
3	660	LAYAN 1 B	391.5	392	1116	Aman
4	661	LAYAN 1 B	353.7	354.4	1116	Aman
5	662	LAYAN 1 B	325.4	326.2	1116	Aman
6	663	LAYAN 1 B	300.1	300.9	1116	Aman
7	664	LAYAN 1 B	259.2	259.6	1116	Aman
8	665	LAYAN 1 B	449.5	449.7	1116	Aman
9	666	LAYAN 1 B	441.8	442.1	1116	Aman
10	667	LAYAN 1 B	391.5	392	1116	Aman
11	668	LAYAN 1 B	353.7	354.4	1116	Aman
12	669	LAYAN 1 B	325.3	326.2	1116	Aman
13	670	LAYAN 1 B	300.1	300.9	1116	Aman
14	671	LAYAN 1 B	259.2	259.6	1116	Aman

Berdasarkan Gambar 11 dan Tabel 6, tegangan kabel pada kombinasi pembebanan *Strength I* menunjukkan nilai yang lebih besar dibandingkan kombinasi *Service I*. Hal ini dipengaruhi oleh peningkatan gaya tarik akibat penggunaan faktor pembebanan yang lebih besar. Namun demikian, seluruh nilai tegangan masih berada di bawah tegangan izin sebesar 1116 MPa, sehingga kabel memenuhi persyaratan keamanan berdasarkan kriteria yang digunakan dalam penelitian. Hasil analisis tegangan ini selanjutnya menjadi dasar dalam pembahasan mengenai regangan kabel pada Subbab berikutnya.

Analisis Regangan Kabel Stay

Analisis regangan kabel dilakukan untuk mengetahui besarnya deformasi relatif yang terjadi pada setiap kabel *stay cable* akibat kombinasi pembebanan *Service I* dan *Strength I*. Nilai regangan tidak diperoleh secara langsung dari hasil keluaran (*output*) perangkat lunak *MIDAS Civil*, melainkan dihitung berdasarkan hasil analisis tegangan menggunakan hubungan elastis material sesuai Persamaan (2).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

dengan:

ε= regangan kabel,

σ= tegangan kabel (MPa),

E= modulus elastisitas kabel (195000 MPa).

Hasil perhitungan regangan digunakan untuk mengevaluasi respons deformasi kabel terhadap perubahan kombinasi pembebanan serta hubungan antara gaya tarik, tegangan, dan regangan pada sistem *cable stayed*.

Regangan Kabel Akibat Kombinasi Pembebanan *Service I*

Regangan kabel pada kombinasi pembebanan *Service I* dihitung berdasarkan nilai tegangan hasil analisis menggunakan perangkat lunak *MIDAS Civil*. Nilai regangan diperoleh dengan membagi tegangan kabel terhadap modulus elastisitas material sehingga diperoleh deformasi relatif yang terjadi pada masing-masing kabel dalam kondisi layan.

Tabel 7. Regangan Kabel akibat Kombinasi Pembebanan *Service I*

No kabel	Elemen	Strain Layan (Mpa)	Modulus Elastisitas (Mpa)	Strain Layan (Mpa)
1	658	449.5	195000	0.002305
2	659	441.8	195000	0.002266
3	660	391.5	195000	0.002008
4	661	353.7	195000	0.001814
5	662	325.4	195000	0.001669
6	663	300.1	195000	0.001539
7	664	259.2	195000	0.001329
8	665	449.5	195000	0.002305
9	666	441.8	195000	0.002266
10	667	391.5	195000	0.002008
11	668	353.7	195000	0.001814
12	669	325.3	195000	0.001668
13	670	300.1	195000	0.001539
14	671	259.2	195000	0.001329

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 7, regangan pada setiap kabel memiliki nilai yang berbeda mengikuti besarnya tegangan yang bekerja pada masing-masing kabel. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin besar tegangan yang diterima kabel, maka semakin besar pula regangan yang terjadi. Pada kondisi *Service I*, seluruh nilai regangan masih berada dalam daerah elastis material sehingga deformasi yang terjadi masih memenuhi kondisi layan.

Regangan Kabel Akibat Kombinasi Pembebanan *Strength I*

Regangan kabel pada kombinasi pembebanan *Strength I* dihitung menggunakan metode yang sama, yaitu berdasarkan hasil analisis tegangan kabel yang diperoleh dari *MIDAS Civil*. Nilai regangan dihitung menggunakan hubungan elastis antara tegangan dan modulus elastisitas material sehingga diperoleh deformasi relatif pada setiap kabel akibat pembebanan ultimit.

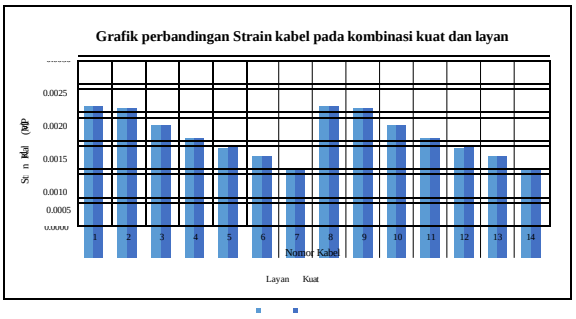
Tebel 8. Regangan Kabel akibat Kombinasi Pembebanan *Strength I*

No kabel	Elemen	Strain Kuat (Mpa)	Modulus Elastisitas (Mpa)	Strain Kuat (Mpa)
1	658	449.7	195000	0.002306
2	659	442.1	195000	0.002267
3	660	392	195000	0.002010
4	661	354.4	195000	0.001817
5	662	326.2	195000	0.001673
6	663	300.9	195000	0.001543
7	664	259.6	195000	0.001331
8	665	449.7	195000	0.002306
9	666	442.1	195000	0.002267
10	667	392	195000	0.002010
11	668	354.4	195000	0.001817
12	669	326.2	195000	0.001673
13	670	300.9	195000	0.001543
14	671	259.6	195000	0.001331

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 8, regangan kabel pada kombinasi pembebanan *Strength I* mengalami peningkatan dibandingkan kondisi *Service I*. Peningkatan tersebut sejalan dengan bertambahnya tegangan akibat penggunaan faktor pembebanan yang lebih besar. Meskipun demikian, nilai regangan yang diperoleh masih menunjukkan bahwa kabel bekerja dalam daerah elastis material.

Perbandingan Regangan Kabel pada Kombinasi Pembebanan *Service I* dan *Strength I*

Untuk mengetahui pengaruh kombinasi pembebanan terhadap regangan kabel, dilakukan perbandingan hasil perhitungan regangan pada kondisi *Service I* dan *Strength I*. Perbandingan ini bertujuan untuk mengevaluasi perubahan deformasi relatif yang terjadi pada setiap kabel sebagai akibat dari perbedaan kombinasi pembebanan.



Gambar 12. Grafik Perbandingan Regangan Kabel pada Kombinasi Pembebanan *Service I* dan *Strength I*

Gambar 9. Perbandingan Regangan Kabel

No Kabel	Elemen	Load	Stress Kuat (Mpa)	Load	Stress Layan (Mpa)	Selisih	Kenaikan (%)
1	658	KUAT 1 B	449.700	LAYAN 1 B	449.500	0.200	0.044
2	659	KUAT 1 B	442.100	LAYAN 1 B	441.800	0.300	0.068
3	660	KUAT 1 B	392.000	LAYAN 1 B	391.500	0.500	0.128
4	661	KUAT 1 B	354.400	LAYAN 1 B	353.700	0.700	0.198
5	662	KUAT 1 B	326.200	LAYAN 1 B	325.400	0.800	0.245
6	663	KUAT 1 B	300.900	LAYAN 1 B	300.100	0.800	0.266
7	664	KUAT 1 B	259.600	LAYAN 1 B	259.200	0.400	0.154
8	665	KUAT 1 B	449.700	LAYAN 1 B	449.500	0.200	0.044
9	666	KUAT 1 B	442.100	LAYAN 1 B	441.800	0.300	0.068
10	667	KUAT 1 B	392.000	LAYAN 1 B	391.500	0.500	0.128
11	668	KUAT 1 B	354.400	LAYAN 1 B	353.700	0.700	0.198
12	669	KUAT 1 B	326.200	LAYAN 1 B	325.300	0.900	0.276
13	670	KUAT 1 B	300.900	LAYAN 1 B	300.100	0.800	0.266
14	671	KUAT 1 B	259.600	LAYAN 1 B	259.200	0.400	0.154

Keterangan :

Selisih : F kuat – F layan..... (3)

Kenaikan (%) : $\frac{F\ kuat\ -\ F\ layan}{F\ kuat}$ x 100..... (4)

Berdasarkan Tabel 9 dan Gambar 11, regangan kabel pada kombinasi pembebanan *Strength I* secara umum lebih besar dibandingkan kondisi *Service I*. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan faktor pembebanan pada kondisi ultimit menyebabkan bertambahnya tegangan sehingga regangan kabel juga meningkat sesuai hubungan elastis material. Pada kolom selisih digunakan pengurangan Service I − Strength I, sehingga nilai selisih yang bernilai negatif menunjukkan bahwa regangan pada kondisi *Strength I* lebih besar dibandingkan kondisi *Service I*. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa distribusi regangan kabel dipengaruhi oleh perubahan kombinasi pembebanan, namun masih mengikuti perilaku elastis material sesuai Hukum Hooke.

Pembahasan

Hasil analisis menunjukkan bahwa distribusi gaya pada kabel *stay cable* berbeda pada setiap kabel untuk kombinasi pembebanan *Service I* maupun *Strength I*. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh posisi kabel, panjang kabel, dan mekanisme distribusi beban pada struktur *cable stayed*. Meskipun besar gaya berbeda, pola distribusi pada kedua kombinasi pembebanan relatif sama, dengan nilai gaya pada *Strength I* lebih besar dibandingkan *Service I* akibat penggunaan faktor pembebanan ultimit.

Peningkatan gaya tarik menyebabkan meningkatnya tegangan pada kabel sesuai dengan hubungan $\sigma = P/A$. Hasil analisis menunjukkan bahwa distribusi tegangan mengikuti pola distribusi gaya, sehingga kabel yang menerima gaya tarik lebih besar juga mengalami tegangan yang lebih tinggi. Seluruh nilai tegangan yang diperoleh masih berada di bawah tegangan izin sebesar 1116 MPa, sehingga kabel memenuhi persyaratan keamanan.

Regangan kabel dihitung berdasarkan Hukum Hooke menggunakan persamaan $\varepsilon = \sigma/E$ dengan modulus elastisitas kabel sebesar 195.000 MPa. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa regangan meningkat seiring bertambahnya tegangan, sehingga distribusi regangan memiliki pola yang sama dengan distribusi tegangan. Nilai regangan yang diperoleh masih berada pada daerah elastis, sehingga tidak menunjukkan adanya deformasi permanen pada material kabel.

Secara keseluruhan, kombinasi pembebanan *Strength I* menghasilkan gaya, tegangan, dan regangan yang lebih besar dibandingkan *Service I*. Meskipun demikian, seluruh hasil analisis masih berada dalam batas yang diizinkan, sehingga sistem kabel pada jembatan *cable stayed* tipe *H-Pylon* mampu memenuhi persyaratan kekuatan dan keamanan berdasarkan kombinasi pembebanan yang dianalisis.

Pengaruh Kombinasi Pembebanan terhadap Gaya Kabel

Hasil analisis menunjukkan bahwa kombinasi pembebanan memberikan pengaruh terhadap besarnya gaya tarik yang terjadi pada kabel *stay cable*. Berdasarkan hasil analisis menggunakan *MIDAS Civil*, kombinasi pembebanan *Strength I* menghasilkan gaya tarik yang lebih besar dibandingkan dengan kombinasi pembebanan *Service I* pada seluruh kabel. Peningkatan tersebut disebabkan oleh penggunaan faktor pembebanan ultimit pada kombinasi *Strength I*, sehingga beban yang bekerja pada struktur menjadi lebih besar dibandingkan kondisi layan.

Distribusi gaya tarik pada setiap kabel tidak menunjukkan nilai yang seragam. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh posisi kabel terhadap pylon, panjang kabel, sudut kemiringan, serta mekanisme distribusi beban dari gelagar menuju sistem kabel. Kabel yang menerima gaya tarik lebih besar akan berperan lebih dominan dalam menopang beban struktur dibandingkan kabel lainnya. Meskipun demikian, pola distribusi gaya pada kedua kombinasi pembebanan relatif sama, sehingga peningkatan gaya yang terjadi lebih dipengaruhi oleh perubahan kombinasi pembebanan daripada perubahan mekanisme kerja struktur.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa sistem kabel mampu mendistribusikan beban secara efektif pada kedua kombinasi pembebanan yang dianalisis. Meskipun gaya tarik pada kondisi *Strength I* mengalami peningkatan dibandingkan *Service I*, distribusi gaya antar kabel tetap konsisten sehingga menunjukkan bahwa sistem *stay cable* bekerja secara stabil dalam menyalurkan beban dari struktur atas menuju pylon.

Hubungan Gaya, Tegangan, dan Regangan Kabel

Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan gaya tarik pada kabel diikuti oleh peningkatan tegangan dan regangan. Hubungan tersebut sesuai dengan persamaan tegangan $\sigma = P/A$dan Hukum Hooke $\varepsilon = \sigma/E$, sehingga semakin besar gaya yang bekerja, semakin besar pula tegangan dan regangan yang terjadi pada kabel.

Distribusi tegangan dan regangan mengikuti pola distribusi gaya, di mana kabel dengan gaya tarik terbesar menghasilkan tegangan dan regangan terbesar. Kondisi ini menunjukkan bahwa respons mekanis kabel masih berada pada daerah elastis, sehingga peningkatan pembebanan pada kombinasi *Strength I* tidak menyebabkan perilaku material melampaui batas elastis.

Evaluasi Kinerja Kabel terhadap Tegangan Izin

Hasil analisis menunjukkan bahwa tegangan maksimum pada seluruh kabel *stay cable* masih berada di bawah tegangan izin sebesar 1116 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa kabel masih memenuhi persyaratan kekuatan pada kombinasi pembebanan *Service I* maupun *Strength I*. Selain itu, nilai regangan yang diperoleh masih berada pada daerah elastis sehingga tidak mengindikasikan terjadinya deformasi permanen pada material kabel.

Secara keseluruhan, sistem kabel pada jembatan *cable stayed* tipe *H-Pylon* mampu memberikan kinerja yang baik dalam menahan beban yang bekerja. Meskipun kombinasi pembebanan *Strength I* menghasilkan gaya, tegangan, dan regangan yang lebih besar dibandingkan *Service I*, seluruh nilai yang diperoleh masih berada dalam batas yang diizinkan sehingga struktur kabel dinilai aman berdasarkan hasil analisis.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis menggunakan *MIDAS Civil*, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Distribusi gaya kabel pada kombinasi pembebanan *Strength I* lebih besar dibandingkan *Service I*, dengan pola distribusi yang relatif sama pada setiap kabel.
2. Tegangan dan regangan kabel meningkat seiring bertambahnya gaya tarik, sehingga menunjukkan hubungan yang sesuai dengan teori mekanika material.
3. Seluruh nilai tegangan masih berada di bawah tegangan izin sebesar 1116 MPa dan regangan masih berada pada daerah elastis, sehingga sistem kabel dinyatakan memenuhi persyaratan kekuatan dan keamanan.

DAFTAR PUSTAKA

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). AASHTO LRFD bridge design specifications (9th ed.). Washington, DC: AASHTO.

Badan Standardisasi Nasional. (2016). SNI 1725:2016 Pembebanan untuk jembatan. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 2847:2019 Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. (2020). SNI 1726:2019 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Chopra, A. K. (2017). Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering (5th ed.). Pearson.

Gimsing, N. J., & Georgakis, C. T. (2012). Cable supported bridges: Concept and design (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Leonhardt, F. (1987). Bridges: Aesthetics and design. MIT Press.

MIDAS Information Technology Co., Ltd. (2022). MIDAS Civil user manual. Seongnam, South Korea: MIDAS IT.

Nilson, A. H., Darwin, D., & Dolan, C. W. (2010). Design of concrete structures (14th ed.). McGraw-Hill.

Podolny, W., Jr., & Scalzi, J. B. (1976). Construction and design of cable-stayed bridges. John Wiley & Sons.

Salmon, C. G., Johnson, J. E., & Malhas, F. A. (2009). Steel structures: Design and behavior (5th ed.). Pearson.

Timoshenko, S. P., & Gere, J. M. (1972). Mechanics of materials. Van Nostrand Reinhold.

Wang, C. K., Salmon, C. G., & Pincheira, J. A. (2007). Reinforced concrete design (7th ed.). John Wiley & Sons.