



**PERENCANAAN *PRESTRESSED CONCRETE GIRDER I*
JEMBATAN TUGU SUHARTO**

Skripsi

diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik Program Studi Teknik Sipil

oleh

Imam Agus Nugroho

NIM.5111419063

**TEKNIK SIPIL
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
2023**

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Nama : Imam Agus Nugroho

NIM : 5111419063

Program Studi : Teknik Sipil

Judul Skripsi : Perencanaan *Prestressed Concrete Girder I* Jembatan Tugu
Suharto

Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang panitia ujian Skripsi Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.

Semarang, 15 Mei 2023

Pembimbing,



Dr. Rini Kusumawardani, S.T., M.T., M.Sc.

NIP. 197809212005012001

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi dengan judul “**Perencanaan Prestressed Concrete Girder I Jembatan Tugu Suharto**” telah dipertahankan di depan sidang Panitia Ujian Skripsi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang pada hari Selasa tanggal 16 Mei 2023.

Oleh,

Nama : Imam Agus Nugroho

NIM : 5111419063

Program Studi : Teknik Sipil

Panitia,

Ketua Panitia



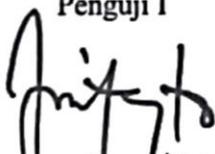
Aris Widodo, S.Pd., M.T.
NIP. 19710201199903001

Sekretaris



Dr. Rini Kusumawardani, S.T., M.T., M.Sc.
NIP. 197809212005012001

Penguji I



Arie Taveriyanto, S.T., M.T.
NIP. 196507222001121001

Penguji II



Dr. Alfa Narendra, S.T., M.T.
NIP. 197612252005011002

Penguji 3/Pembimbing



Dr. Rini Kusumawardani, S.T., M.T., M.Sc.
NIP. 197809212005012001

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang



Wawan Sumbodo, M.T.
NIP. 196601051990021002



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, DAN KEMENTERIAN RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
UNNES
FAKULTAS TEKNIK

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Imam Agus Nugroho

NIM : 5111419063

Program Studi : Teknik Sipil

Dengan ini saya menyatakan bahwa :

1. Skripsi atau tugas akhir ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (sarjana, magister, dan/atau doktor), baik di Universitas Negeri Semarang maupun di perguruan tinggi lain.
2. Karya tulis ini adalah murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan Pembimbing dan masukan Tim Penguji.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi ini.

Semarang, 15 Mei 2023

Yang membuat pernyataan,



Imam Agus Nugroho

NIM. 5111419063

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO

Penulisan skripsi dengan judul “Perencanaan *Prestressed Concrete Girder I* Jembatan Tugu Suharto” yang merupakan salah satu pengalaman dalam perjalanan hidup saya, maka saya melakukan penulisan ini penuh dengan keteguhan hati dengan motto hidup saya, **“Saya yakin, saya mampu, saya bisa.”**

Karena saya yakin bahwa **“Allah SWT tidak akan menguji hamba-Nya melainkan sesuai dengan kesanggupannya.”** (QS. Al-Baqarah 2:286)

Saya berharap bahwa jika saya yakin untuk mampu melakukan maka pasti saya bisa melakukannya. Begitu pula dengan proses penulisan skripsi yang saya jalani dengan keyakinan bahwa saya mampu melakukannya dengan baik maka pasti saya bisa mendapatkan hasil yang baik pula. **“Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan.”** (QS Al-Insyirah 94:5)

PERSEMBAHAN

Dengan bangga saya persembahkan skripsi yang berjudul “Perencanaan *Prestressed Concrete Girder I* Jembatan Tugu Suharto” ini untuk,

1. Bapak Solikin dan Ibu Sri Rahayuningsih, sebagai orang tua dengan segala dukungan luar biasa dan motivasi yang tak ternilai diberikan kepada saya sebagai anak yang kedua orang tua saya harapkan kelak dapat mengangkat derajat beliau berdua. Dengan skripsi ini saya berterima kasih atas seluruhnya yang telah kedua orang tua berikan kepada saya, semoga dengan skripsi ini menjadi hal yang dapat kedua orang tua banggakan dari anaknya yaitu saya.
2. Keluarga besar saya, Nandyani Khoirunnisa yaitu adik saya, Bapak Sunari yaitu Kakek saya, Pakdhe, Budhe, Om, Tante, Sepupu yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu dengan segala dukungan, kritik dan saran kepada saya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi sebagai syarat memperoleh gelar sarjana saya yang akan menjadi anggota keluarga dengan gelar sarjana pertama di keluarga besar saya.

3. Sahabat-sahabat saya yaitu Wulang Bagas adalah sahabat kecil saya, kemudian rekan seperbimbingan saya, yaitu Ariqo Amru An-naafi, Lintang Ayunintiyas, Silas Surya Sumirat, Ayu Ridho Febriyanti, dan Aditya Octa Prayoga yang berjuang bersama dalam menyelesaikan skripsi, kemudian teman-teman KFT, teman-teman Teknik Sipil angkatan 2019 yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu yang telah memberikan dukungan secara langsung maupun tak langsung dalam proses penulisan skripsi saya.
4. Jodoh saya, kelak di masa depan. Bukan karena dukungan, namun saya persembahkan skripsi saya sebagai cerita hidup saya yang akan saya ceritakan kepada jodoh saya kelak.

ABSTRAK

Imam Agus Nugroho
2023

Perencanaan *Prestressed Concrete Girder I* Jembatan Tugu Suharto

Skripsi

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang

Pembimbing : Dr. Rini Kusumawardani, S.T., M.T., M.Sc.

Jembatan dibutuhkan untuk akomodasi lalu lintas berupa penghubung jalan. Khususnya di Kota Semarang sendiri yang kondisi geografisnya banyak terdapat sungai yang berada atau melewati Kota Semarang. Banyaknya jembatan di Kota Semarang membutuhkan metode perawatan dan perlu dilakukan pengecekan kesehatan jembatan secara berkala. Salah satu jembatan yang berada di Kota Semarang adalah jembatan Tugu Suharto. Data awal untuk kontrol dan deteksi awal kerusakan pada jembatan menggunakan parameter dinamik yang memperkirakan kondisi terkini serta perilaku dinamik struktur jembatan. Proses mendapatkan data awal parameter dinamik dilakukan pembuatan model elemen hingga (*finite element model*) yang kemudian analisis *modal* untuk memperoleh frekuensi dan pola ragam getar (*mode shape*) beserta nilai *displacement* masing-masing pola ragam getar, dalam hal ini menjadi tujuan penulisan penelitian ini.

Proses penelitian ini dimulai dengan pembuatan 3D model elemen hingga (*3D finite element model*) jembatan, dalam hal ini objek penelitian yaitu jembatan Tugu Suharto menggunakan *software CSi Bridge version 21*. Model yang telah dibuat kemudian dilakukan analisis *modal* untuk mendapatkan frekuensi alami dan pola ragam getar (*mode shape*) beserta nilai *displacement* masing-masing *mode shape* yang dipilih sebagai sampel yang ditampilkan.

Hasil pembuatan model menunjukkan bahwa model yang dibuat dapat dianggap bisa merepresentasikan kondisi sebenarnya dari jembatan Tugu Suharto. Penyesuaian dan penyederhanaan model hanya dilakukan pada dimensi dan bentuk penampang elemen abutmen dan kepala pilar dengan tetap mengacu data penunjang dan perhitungan yang telah dilakukan. Hasil analisis *modal* pada frekuensi alami model jembatan menunjukkan bahwa frekuensi terkecil dengan periode getar terbesar yaitu 2,63689 Hz dengan 0,37923 detik pada *mode shape* ke-1 dan frekuensi terbesar dengan periode getar terkecil yaitu 18,9375 Hz dengan 0,05281 detik pada *mode shape* ke-18. Pola ragam getar yang ditampilkan berjumlah 18 *mode shape* dengan deformasi yang dominan terjadi pada arah vertikal searah sumbu Z model. Hasil analisis lanjutan didapatkan grafik hubungan dari perbandingan nilai *displacement* tiap *joint* dengan nilai *displacement* maksimum masing-masing *mode shape* terhadap letak tiap *joint* di sepanjang bentang model jembatan Tugu Suharto.

Kata kunci : *Displacement, Finite Element Model, Frekuensi, Mode Shape.*

ABSTRACT

Imam Agus Nugroho

2023

Planning of Prestressed Concrete Girder I of the Tugu Suharto Bridge

Thesis

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Semarang State University

Advisor : Dr. Rini Kusumawardani, S.T., M.T., M.Sc.

Bridges are needed to accommodate traffic in the form of connecting roads. Especially in the city of Semarang, where geographical conditions there are many rivers that are in or pass through the city of Semarang. The number of bridges in the city of Semarang requires maintenance methods and it is necessary to periodically check the health of the bridges. One of the bridges in the city of Semarang is the Tugu Suharto bridge. Preliminary data for control and early detection of damage to bridges uses dynamic parameters that estimate current conditions and the dynamic behavior of bridge structures. The process of obtaining initial data on dynamic parameters is carried out by making a finite element model which is then analyzed for modal analysis to obtain the frequency and mode shape along with the displacement value of each mode shape, in this case the aim of this research.

The research process begins with the creation of a 3D finite element model of the bridge, in this case the research object is the Tugu Suharto bridge using CSi Bridge version 21 software. The model that has been made is then subjected to modal analysis to obtain natural frequencies and mode shape along with the displacement value of each selected mode shape as the displayed sample.

The results of making the model show that the model made can be considered to represent the actual conditions of the Tugu Suharto bridge. Adjustment and simplification of the model are only carried out on the dimensions and cross-sectional shapes of the abutment elements and head pillars while still referring to the supporting data and calculations that have been carried out. The results of modal analysis on the natural frequency of the bridge model show that the smallest frequency with the largest period of vibration is 2.63689 Hz with 0.37923 seconds in the 1st mode shape and the largest frequency with the smallest period of vibration is 18.9375 Hz with 0.05281 seconds in the 18th mode shape. The vibration patterns displayed are 18 mode shapes with the dominant deformation occurring in the vertical direction along the Z axis of the model. The results of further analysis obtained a graph of the relationship from the comparison of the displacement value of each joint with the maximum displacement value of each mode shape to the location of each joint along the span of the Tugu Suharto bridge model.

Keywords: Displacement, Finite Element Model, Frequency, Shape Mode.

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul “Perencanaan *Prestressed Concrete Girder* I Jembatan Tugu Suharto”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu persyaratan meraih gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil S1 Universitas Negeri Semarang.

Penyelesaian karya tulis ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa syukur, ucapan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada :

1. Prof. Dr. S Martono, M.Si., Rektor Universitas Negeri Semarang.
2. Dr. Wirawan Sumbodo, M.T., Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.
3. Aris Widodo, S.Pd., M.T., Ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Negeri Semarang.
4. Dr. Rini Kusumawardani, S.T., M.T., M.Sc., Koordinator Program Studi Teknik Sipil Universitas Negeri Semarang.
5. Arie Taveriyanto, S.T., M.T., dosen penguji 1 yang telah memberi masukan yang sangat berharga berupa saran, ralat, perbaikan, pertanyaan, komentar, tanggapan untuk menambah bobot dan kualitas karya tulis ini.
6. Dr. Alfa Narendra, S.T., M.T., dosen penguji 2 yang telah memberi masukan yang sangat berharga berupa saran, ralat, perbaikan, pertanyaan, komentar, tanggapan untuk menambah bobot dan kualitas karya tulis ini.
7. Dr. Rini Kusumawardani, S.T., M.T., M.Sc., dosen pembimbing yang selalu memberi bimbingan, saran, serta memberi motivasi yang sangat membangun dan memudahkan segala urusan skripsi ini.
8. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang yang telah memberi bekal pengetahuan yang berharga.
9. Seluruh pihak yang telah memberi bantuan untuk karya tulis ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Sekian prakata yang dapat disampaikan penulis untuk menyampaikan rasa syukur, rasa terima kasih dan penghargaan kepada pihak yang telah disebutkan. Penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca guna

kebaikan dan kesempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis pada khususnya dan bagi semua pihak pada umumnya.

Semarang, 15 Mei 2023

Penulis,

Imam Agus Nugroho

DAFTAR ISI

PERSETUJUAN PEMBIMBING.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xix
BAB 1	1
PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	2
1.4. Pembatasan Masalah	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
BAB II.....	4
KAJIAN PUSTAKA.....	4
2.1. Landasan Teori	4
2.1.1. Jembatan	4
2.1.2. Jembatan Beton Prategang.....	7
2.1.3. Komponen Jembatan Beton Prategang.....	10
2.1.4. Pengecekan Kesehatan Struktur (<i>Structure Health Monitoring</i>).....	18

2.1.5. Frekuensi Alami dan Ragam Getar (<i>Mode Shape</i>) Struktur	20
2.1.6. Tegangan dan Regangan	21
2.1.7. Displacement	24
2.1.8. Deformasi.....	25
2.1.9. Model Elemen Hingga (<i>Finite Element Model</i>)	25
2.1.10. CSi Bridge version 21	26
BAB III	28
METODE PENELITIAN.....	28
3.1. Gambaran Umum Penelitian	28
3.2. Metode Penelitian.....	29
3.3. Deskripsi Objek Penelitian	29
3.3.1. Lokasi Jembatan Tugu Suharto.....	29
3.3.2. Data Eksisting Jembatan Tugu Suharto	30
3.4. <i>Material Properties</i> Objek Penelitian	32
3.5. Pengumpulan Data Penelitian.....	35
3.5.1. Data Primer	35
3.5.2. Data Sekunder.....	36
3.6. Bagan Alir Penelitian	36
3.7. Pengolahan Data.....	38
3.7.1. Proses Perhitungan Manual Desain Jembatan (<i>MathCad Prime</i>).....	38
3.7.2. Proses Pemodelan Jembatan (<i>CSi Bridge version 21</i>).....	50
3.7.3. Proses Analisis <i>Modal</i> Model Jembatan (<i>CSi Bridge version 21</i>).....	61
3.8. Penentuan Hasil Penelitian	64
BAB IV	65
ANALISIS DAN PEMBAHASAN	65
4.1. Detail Jembatan Tugu Suharto	65

4.1.1. Detail Bangunan Atas Jembatan (<i>Superstructure</i>).....	65
4.1.2. Detail Bangunan Bawah Jembatan (<i>Substructure</i>).....	68
4.2. Perhitungan Manual Desain Jembatan Tugu Suharto	69
4.2.1. Perhitungan Beban.....	70
4.2.2. Perhitungan Perencanaan Plat Lantai Jembatan	74
4.2.3. Perhitungan Perencanaan Gelagar	77
4.2.4. Perhitungan Perencanaan Kepala Pilar	93
4.2.5. Perhitungan Perencanaan Pilar Tunggal	96
4.3. <i>3D Finite Element Model</i> Jembatan Tugu Suharto	98
4.3.1. <i>3D Finite Element Model</i> Struktur Bangunan Atas (<i>Superstructure</i>)..	98
4.3.2. <i>3D Finite Element Model</i> Struktur Bangunan Bawah (<i>Substructure</i>)	102
4.3.3. <i>3D Finite Element Model</i> Keseluruhan Jembatan Tugu Suharto	107
4.4. Analisis <i>3D Finite Element Model</i> Jembatan Tugu Suharto	107
4.4.1. Analisis <i>Modal</i>	107
4.5. Hasil Analisis <i>3D Finite Element Model</i> Jembatan Tugu Suharto.....	108
4.5.1. Frekuensi.....	108
4.5.2. Pola Ragam Getar (<i>Mode Shape</i>).....	109
4.5.3. <i>Joint Displacement</i>	129
BAB V.....	138
KESIMPULAN	138
5.1. Kesimpulan.....	138
5.2. Saran.....	139
DAFTAR PUSTAKA	140
LAMPIRAN.....	143

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Jenis mutu beton (PUPR, 2012).....	33
Tabel 3.2. <i>Prestressing steel</i> berdasarkan ASTM (PUPR, 2012).	34
Tabel 3.3. Data primer penelitian.....	35
Tabel 3.4. Data sekunder penelitian.	36
Tabel 4. 1 Perhitungan kehilangan prategang akibat gesekan bentang tengah.	84
Tabel 4. 2 Perhitungan kehilangan prategang akibat gesekan bentang tepi.....	84
Tabel 4. 3 Perhitungan kehilangan prategang akibat <i>anchor set</i> bentang tengah. 85	
Tabel 4. 4 Perhitungan kehilangan prategang akibat <i>anchor set</i> bentang tepi.....	85
Tabel 4. 5 Perhitungan tegangan serat atas saat transfer.....	91
Tabel 4. 6 Perhitungan tegangan serat bawah saat transfer.	91
Tabel 4. 7 Perhitungan tegangan serat atas saat konstruksi.	91
Tabel 4. 8 Perhitungan tegangan serat bawah saat konstruksi.	92
Tabel 4. 9 Perhitungan tegangan serat atas kondisi layan.....	92
Tabel 4. 10 Perhitungan tegangan serat bawah kondisi layan.	92
Tabel 4.11 Hasil frekuensi dan periode tiap <i>mode shape</i>	108
Tabel 4.12 <i>Joint Displacement</i>	129
Tabel 4.13 Analisis lanjutan <i>joint displacement</i>	131

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Konsep prategang pra-tarik.	9
Gambar 2.2 Konsep prategang pasca-tarik.	10
Gambar 2.3 Gelagar I (<i>PC - I girder</i>).	12
Gambar 2.4 Gelagar kotak (<i>Box girder</i>).	12
Gambar 2.5 Gelagar T.	13
Gambar 2.6 Contoh bantalan logam.	14
Gambar 2.7 Contoh bantalan karet (<i>rubber bearing pad</i>) material elastomer.	14
Gambar 2.8 Ilustrasi posisi diafragma melintang	15
Gambar 2.9 Ilustrasi bentuk abutmen jembatan.	16
Gambar 2.10 Struktur pilar dan kepala pilar jembatan.	17
Gambar 2.11 Proses pemasangan tiang pancang untuk pondasi jembatan.	18
Gambar 2.12 Pola ragam getar jembatan beserta nilai frekuensinya.	21
Gambar 2.13 Grafik hubungan tegangan dan regangan linear.	23
Gambar 2.14 Grafik hubungan tegangan dan regangan non-linear.	23
Gambar 2.15 Grafik <i>displacement</i> balok jembatan.	24
Gambar 3.1 Tampak atas bagian kiri jembatan Tugu Suharto.	30
Gambar 3.2 Lokasi jembatan Tugu Suharto.	30
Gambar 3.3 Gambar tampak samping jembatan Tugu Suharto.	32
Gambar 3.4 Gambar potongan melintang jembatan Tugu Suharto.	32
Gambar 3.5 Posisi tendon jembatan Tugu Suharto.	34
Gambar 3.6 Pengukuran lebar trotoar.	35
Gambar 3.7 Bagan alir penelitian.	37
Gambar 3. 8 Grafik Faktor Berat Dinamis.	39
Gambar 3. 9 Nilai Beban Truk.	39
Gambar 3.10 Fitur <i>New Model</i>	50
Gambar 3.11 Fitur <i>blank template</i>	51
Gambar 3.12 Menu <i>tool Home</i>	51
Gambar 3.13 Menu <i>tool Layout</i>	52
Gambar 3.14 Fitur <i>layout line</i>	52
Gambar 3.15 Fitur <i>Lanes</i>	52
Gambar 3.16 Menu <i>tool Component</i>	53

Gambar 3.17 Fitur <i>properties</i>	53
Gambar 3.18 Fitur <i>superstructure</i>	53
Gambar 3.19 Mendefinisikan sistem plat lantai dan gelagar I.....	54
Gambar 3.20 Fitur <i>substructure</i>	54
Gambar 3.21 Mendefinisikan dimensi dan material abutmen jembatan.....	55
Gambar 3.22 Medefinisikan dimensi dan material pilar dan kepala pilar.....	55
Gambar 3.23 Menu <i>tool Loads</i>	55
Gambar 3.24 Fitur <i>vehicles</i>	56
Gambar 3.25 Mendefinisikan beban truk berdasarkan SNI 1725:2016.....	56
Gambar 3.26 Mendefinisikan beban-beban.....	56
Gambar 3.27 Mendefinisikan penyaluran beban.....	57
Gambar 3.28 Menu <i>tool Bridge</i>	57
Gambar 3.29 Fitur <i>bridge type</i>	57
Gambar 3.30 Menyesuaikan desain bentang jembatan.....	58
Gambar 3.31 Fitur <i>bridge object data</i>	58
Gambar 3.32 Menyesuaikan dan mendefinisikan ulang <i>object data</i>	59
Gambar 3.33 Fitur <i>modify/show assignment</i>	59
Gambar 3.34 Menyesuaikan abutmen model jembatan.....	59
Gambar 3.35 Menyesuaikan <i>support bent</i> model jembatan.....	60
Gambar 3.36 Menyesuaikan lokasi diafragma model jembatan.....	60
Gambar 3.37 <i>3D Finite Element Model</i> jembatan Tugu Suharto.....	60
Gambar 3.38 Menu <i>tool Analysis</i>	61
Gambar 3.39 Fitur <i>load cases</i>	61
Gambar 3.40 Fitur <i>run analysis</i> untuk menjalankan analisis model jembatan.....	61
Gambar 3.41 Fitur <i>load cases to run</i> untuk memulai analisis model jembatan.....	62
Gambar 3.42 Fitur <i>show deformed shape</i>	62
Gambar 3.43 Fitur <i>display deformed shape</i>	63
Gambar 3.44 Tampilan <i>3D deformed shape</i>	63
Gambar 3.45 Fitur <i>show tables</i>	63
Gambar 3.46 Fitur <i>choose tables for display</i>	64
Gambar 3.47 Contoh <i>output</i> tabel <i>joint displacement</i>	64
Gambar 4. 1 Gambar potongan sistem plat lantai jembatan Tugu Suharto.....	65

Gambar 4.2 Dimensi gelagar jembatan Tugu Suharto.	66
Gambar 4.3 Posisi tendon pada ujung gelagar.	67
Gambar 4.4 <i>Layout</i> tendon jembatan Tugu Suharto.	67
Gambar 4.5 Bentuk diafragma ujung dan tengah beserta penulangan diafragma.	68
Gambar 4.6 Dimensi abutmen jembatan Tugu Suharto.	68
Gambar 4.7 Kepala pilar dan pilar jembatan Tugu Suharto.....	69
Gambar 4. 8 Parameter dimensi gelagar.	78
Gambar 4. 9 Data gelagar saat transfer.	83
Gambar 4. 10 Data gelagar saat final.	83
Gambar 4. 11 Data gelagar komposit.....	84
Gambar 4.13 Pemodelan <i>deck</i> jembatan Tugu Suharto.	98
Gambar 4.14 Pemodelan <i>3D</i> gelagar jembatan Tugu Suharto.	99
Gambar 4.15 <i>Layout</i> tendon tampak samping.....	99
Gambar 4. 16 <i>Layout</i> tendon tampak atas.....	99
Gambar 4.17 Posisi tendon pada ujung gelagar.	99
Gambar 4. 18 Posisi tendon pada tengah gelagar.	99
Gambar 4.19 Model <i>3D</i> tendon jembatan Tugu Suharto.	100
Gambar 4.20 Letak diafragma pada setiap bentang jembatan Tugu Suharto.	100
Gambar 4.21 Model <i>3D</i> diafragma jembatan Tugu Suharto.....	101
Gambar 4.22 Pemodelan tumpuan sendi.....	101
Gambar 4.23 Pemodelan tumpuan rol.....	102
Gambar 4.24 Model <i>3D</i> struktur tumpuan jembatan Tugu Suharto.....	102
Gambar 4.25 Penyederhanaan dimensi model abutmen.	103
Gambar 4.26 Penyesuaian berat total abutmen model jembatan.	104
Gambar 4.27 Model <i>3D</i> abutmen jembatan Tugu Suharto.	104
Gambar 4.28 Penyederhanaan dimensi model <i>pier head</i>	105
Gambar 4. 29 Penyesuaian berat total kepala pilar model jembatan.	106
Gambar 4.30 Model <i>3D pier head</i> jembatan Tugu Suharto.....	106
Gambar 4.31 Model <i>3D pier column</i> atau pilar jembatan Tugu Suharto.....	107
Gambar 4.32 Model <i>3D</i> keseluruhan jembatan Tugu Suharto.....	107
Gambar 4.33 <i>Load case modal</i>	108
Gambar 4.34 <i>Mode shape</i> ke-1 deformasi sumbu Y (dominan).	110

Gambar 4.35 <i>Mode shape</i> ke-1 deformasi sumbu X dan Z.	110
Gambar 4.36 <i>Mode shape</i> ke-2 deformasi sumbu Y (dominan).	111
Gambar 4.37 <i>Mode shape</i> ke-2 deformasi sumbu X dan Z.	111
Gambar 4.38 <i>Mode shape</i> ke-3 deformasi sumbu Z (dominan).	112
Gambar 4.39 <i>Mode shape</i> ke-3 deformasi sumbu X dan Y.	112
Gambar 4.40 <i>Mode shape</i> ke-4 deformasi sumbu Z (dominan).	113
Gambar 4.41 <i>Mode shape</i> ke-4 deformasi sumbu X dan Y.	114
Gambar 4.42 <i>Mode shape</i> ke-5 deformasi sumbu Z (dominan).	114
Gambar 4.43 <i>Mode shape</i> ke-5 deformasi sumbu X dan Y.	115
Gambar 4.44 <i>Mode shape</i> ke-6 deformasi sumbu Z (dominan).	115
Gambar 4.45 <i>Mode shape</i> ke-6 deformasi sumbu X dan Y.	115
Gambar 4.46 <i>Mode shape</i> ke-7 deformasi sumbu Z (dominan).	116
Gambar 4.47 <i>Mode shape</i> ke-8 deformasi sumbu X dan Y.	116
Gambar 4.48 <i>Mode shape</i> ke-8 deformasi sumbu Z (dominan).	117
Gambar 4.49 <i>Mode shape</i> ke-8 deformasi sumbu X dan Y.	118
Gambar 4. 50 <i>Mode shape</i> ke-9 deformasi sumbu Z (dominan).	118
Gambar 4.51 <i>Mode shape</i> ke-9 deformasi sumbu X dan Y.	118
Gambar 4.52 <i>Mode shape</i> ke-10 deformasi sumbu Z (dominan).	119
Gambar 4.53 <i>Mode shape</i> ke-10 deformasi sumbu X dan Y.	119
Gambar 4.54 <i>Mode shape</i> ke-11 deformasi sumbu Z (dominan).	120
Gambar 4.55 <i>Mode shape</i> ke-11 deformasi sumbu X dan Y.	120
Gambar 4.56 <i>Mode shape</i> ke-12 deformasi sumbu Z (dominan).	121
Gambar 4.57 <i>Mode shape</i> ke-12 deformasi sumbu X dan Y.	121
Gambar 4.58 <i>Mode shape</i> ke-13 deformasi sumbu Z (dominan).	122
Gambar 4.59 <i>Mode shape</i> ke-13 deformasi sumbu X dan Y.	122
Gambar 4.60 <i>Mode shape</i> ke-14 deformasi sumbu Z (dominan).	123
Gambar 4.61 <i>Mode shape</i> ke-14 deformasi sumbu X dan Y.	123
Gambar 4.62 <i>Mode shape</i> ke-15 deformasi sumbu Z (dominan).	124
Gambar 4.63 <i>Mode shape</i> ke-15 deformasi sumbu X dan Y.	124
Gambar 4.64 <i>Mode shape</i> ke-16 deformasi sumbu Z (dominan).	125
Gambar 4.65 <i>Mode shape</i> ke-16 deformasi sumbu X dan Y.	125
Gambar 4.66 <i>Mode shape</i> ke-17 deformasi sumbu Z (dominan).	126

Gambar 4.67 <i>Mode shape</i> ke-17 deformasi sumbu X dan Y.	126
Gambar 4.68 <i>Mode shape</i> ke-18 deformasi sumbu Z (dominan).	127
Gambar 4.69 <i>Mode shape</i> ke-18 deformasi sumbu X dan Y.	127
Gambar 4.70 Letak titik (<i>joint</i>) sampel tengah penampang bentang model.	131
Gambar 4.71 Grafik <i>mode shape</i> ke-3.	133
Gambar 4.72 Grafik <i>mode shape</i> ke-4.	133
Gambar 4.73 Grafik <i>mode shape</i> ke-5.	134
Gambar 4.74 Grafik <i>mode shape</i> ke-7.	134
Gambar 4.75 Grafik <i>mode shape</i> ke-12.	135
Gambar 4.76 Grafik <i>mode shape</i> ke-14.	135
Gambar 4.77 Grafik <i>mode shape</i> ke-16.	136
Gambar 4.78 Grafik <i>mode shape</i> ke-17.	136

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi observasi lapangan 1.	144
Lampiran 2. Dokumentasi observasi lapangan 2.	145
Lampiran 3. Dokumentasi observasi lapangan 3.	146
Lampiran 4. Gambar jembatan Tugu Suharto.....	147
Lampiran 5. <i>Finite element model</i> jembatan Tugu Suharto.....	148

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Jembatan dibutuhkan untuk akomodasi lalu lintas berupa jalan. Khususnya di Kota Semarang sendiri yang kondisi geografisnya banyak terdapat sungai yang berada atau melewati Kota Semarang. Tercatat 46 sungai yang berada di Kota Semarang (DPU Kota Semarang, 2018). Akomodasi lalu lintas diperlukan guna memenuhi berbagai kebutuhan, maka jembatan sebagai penghubung antar jalan yang dipisahkan oleh penghalang akan sangat penting perannya. Jembatan merupakan konstruksi sebagai penghubung atau penerus jalan yang melewati suatu kondisi tertentu yang biasanya lebih rendah dari jalan atau jembatan itu sendiri. Kondisi tertentu tersebut yaitu kondisi topografi yang dapat berupa jalan air, jurang atau lereng, sungai atau juga dapat berupa konstruksi jalan lain yang lebih rendah (Hurt dan Schrock, 2016).

Di Kota Semarang terdapat 703 jembatan yang dikelola oleh Pemerintah Provinsi Jawa Tengah, Pemerintah Kota Semarang, Balai Besar Wilayah Sungai maupun Dinas Pekerjaan Umum Kota Semarang (Informasi Aktual Kota Semarang, 2017). Banyaknya jembatan di Kota Semarang membutuhkan metode perawatan dan perlu dilakukan pengecekan kesehatan jembatan secara berkala. Pemeliharaan atau pengecekan kesehatan jembatan (*Structure Health Monitoring*) harus dilakukan dengan baik karena menyangkut keamanan dan kenyamanan pengguna jalan. *Structure Health Monitoring* (SHM) dilakukan dengan berbagai teknik tergantung pada jenis pengecekan yang akan dilakukan pada suatu struktur (Caicedo, 2003). Pada umumnya, kontrol rutin dan deteksi awal kerusakan dilakukan pada struktur jembatan sebagai *baseline* terkait fungsi *serviceability*. Data awal untuk kontrol dan deteksi awal kerusakan pada jembatan umumnya menggunakan parameter dinamik yaitu dengan memperkirakan kondisi terkini serta perilaku dinamik struktur jembatan itu sendiri. Parameter-parameter dinamik dapat berupa frekuensi alami dan *mode shape* atau ragam getar (He et al., 2001). Frekuensi alami dan ragam getar dari struktur jembatan diidentifikasi menggunakan teknik identifikasi modal (Caicedo, 2003). Data parameter dinamik struktur jembatan didapat setelah melakukan analisis *modal* pada model elemen hingga

(*finite element model*) dari jembatan tersebut. Model kondisi jembatan sebenarnya dapat dibuat dengan banyak metode, salah satunya adalah metode numerik dengan model elemen hingga yang diharapkan dapat merepresentasikan kondisi jembatan sebenarnya (Chen et al., 2021). Penggunaan metode numerik model elemen hingga diharapkan dapat membantu mendapatkan representasi kondisi jembatan sebenarnya sehingga data analisis yang didapatkan lebih akurat. Salah satu *software* yang dapat digunakan untuk pembuatan *3D finite element model* dan analisis struktur jembatan adalah *software CSi Bridge*.

Dengan penjelasan diatas maka tujuan dari penulisan penelitian ini adalah melakukan identifikasi parameter dinamik jembatan Tugu Suharto dengan membuat *3D finite element model* jembatan tersebut menggunakan *software CSi Bridge version 21* yang kemudian akan dilanjutkan analisis *modal* untuk mendapatkan data parameter dinamik berupa frekuensi alami dan ragam getar (*mode shape*).

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana proses pembuatan model elemen hingga dan analisis *modal* jembatan Tugu Suharto menggunakan *software CSi Bridge version 21*.
2. Bagaimana parameter dinamik jembatan Tugu Suharto berupa nilai frekuensi alami dan ragam getar (*mode shape*) beserta nilai *joint displacement* masing-masing *mode shape* hasil analisis *modal* pada *3D finite element model* menggunakan *software CSi Bridge version 21*.

1.3. Tujuan Penelitian

Telah disebutkan dalam penjelasan diatas maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui hasil *3D finite element model* jembatan Tugu Suharto yang telah dibuat dapat merepresentasikan kondisi jembatan sebenarnya yang selanjutnya akan digunakan untuk analisis *modal* untuk mendapatkan parameter-parameter dinamik dari jembatan tersebut.

2. Bertujuan untuk mengidentifikasi parameter dinamik jembatan Tugu Suharto berupa nilai frekuensi alami dan ragam getarnya termasuk nilai *displacement* dari masing-masing ragam getar (*mode shape*).

1.4. Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah dilakukan pada penelitian ini. Maka dalam penelitian ini akan dijelaskan sebagai berikut.

1. Perhitungan dan pemodelan elemen hingga struktur jembatan menggunakan *software MathCad Prime* dan *CSi Bridge version 21* mengacu *Design Engineering Drawing* Jembatan Tugu Suharto serta berpedoman pada Peraturan Jembatan SNI 1725:2016 dan Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga Nomor 06/SE/Db/2021.
2. Data hasil analisis yang akan ditinjau hanya nilai frekuensi alami dan ragam getar (*mode shape*) beserta data *joint displacement* masing-masing *mode shape* yang dipilih sebagai sampel model Jembatan Tugu Suharto hasil dari analisis *modal* menggunakan *software CSi Bridge version 21*.

1.5. Manfaat Penelitian

Dari pembahasan yang direncanakan akan didapat manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian ini diharapkan oleh penulis bagi pembaca sebagai pengetahuan bagaimana hasil analisis berupa parameter-parameter dinamik pada jembatan.
2. Penelitian ini diharapkan oleh penulis menjadi referensi dan sumber informasi tentang parameter-parameter dinamik bagi seluruh mahasiswa program studi teknik sipil.
3. Penelitian ini diharapkan oleh penulis menjadi tambahan wawasan untuk referensi perkembangan teknologi pemodelan untuk kebutuhan pembangunan dan pemeliharaan jembatan di negara kita tercinta, Indonesia.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1. Landasan Teori

2.1.1. Jembatan

Akomodasi lalu lintas membutuhkan jaringan jalan. Jaringan jalan yang ada sering melewati atau berada di wilayah dengan kondisi topografi yang beragam. Kondisi topografi yang beragam dapat menjadi hambatan pada jaringan jalan raya. Hambatan dari kondisi topografi yang beragam dapat berupa hambatan dari alam maupun dari jaringan jalan itu sendiri yang merupakan instrumen untuk mengakomodasi lalu lintas. Hambatan-hambatan tersebut antara lain berupa sungai, danau, lereng, jurang, atau konstruksi jalan raya, jalan rel kereta api yang posisinya berada lebih rendah daripada jalan itu sendiri. Terkadang terdapat hambatan besar seperti sungai dengan bentang besar atau danau bahkan laut. Hal ini akan sangat mengganggu jaringan jalan karena hambatan yang mempengaruhi kelancaran akomodasi lalu lintas terlalu besar. Solusi dari hambatan tersebut dapat menggunakan moda transportasi air. Namun moda transportasi air akan sangat dipengaruhi oleh waktu perjalanan yang lebih lama dan cuaca yang mungkin akan mempengaruhi keadaan aliran sungai atau gelombang laut. Maka jembatan yang menjadi solusi alternatif. Jembatan akan menjadi penghubung jaringan jalan yang terhambat oleh hambatan atau rintangan yang sudah disebutkan di atas. Konstruksi jembatan dibangun melayang melewati hambatan sehingga antara ujung jaringan jalan yang terputus dapat terhubung. Jembatan menjadi solusi alternatif yang lebih baik daripada menggunakan moda transportasi air untuk melewati hambatan alam berupa sungai atau laut yang sudah disebutkan karena waktu tempuh akan lebih cepat dan cuaca tidak akan begitu berpengaruh terhadap kestabilan jembatan. Hal ini dibuktikan dibangunnya jembatan Ampera yang melewati sungai Musi di Kota Palembang dan jembatan Suramadu yang menghubungkan kota Surabaya dengan pulau Madura melewati laut atau selat Madura.

Jembatan secara umum merupakan konstruksi yang dibutuhkan untuk menyeimbang (*balancing*) sistem lalu lintas (Supriyadi, 2007). Kemudian jembatan adalah konstruksi yang digunakan untuk melalui rintangan yang berada lebih

rendah. Rintangan ini biasanya berupa jalan air atau jalan lalu lintas biasa (Struyk dan Veen, 1984). Konstruksi jembatan mengalami perkembangan dan dapat diklasifikasikan ke beberapa bentuk dan tipe (Supriyadi, 2007) yaitu sebagai berikut.

1. Jembatan Lengkung – Batu (*Stone Arch Bridge*)

Jembatan berbentuk melengkung seperti busur dengan material batu yang sudah ditemukan dan dikonstruksikan pada masa Babylonia.

2. Jembatan Rangka (*Truss Bridge*)

Jembatan yang terdiri dari rangka yang disusun. Rangka dapat terbuat dari kayu atau logam (baja).

3. Jembatan Gantung (*Suspension Bridge*)

Jembatan yang konstruksinya menggantung memanfaatkan kabel-kabel baja.

4. Jembatan Beton (*Concrete Bridge*)

Jembatan beton konvensional yang di masa sekarang sering digunakan karena kemajuan teknologi beton.

5. Jembatan *Haubans / Cable Stayed*

Merupakan jembatan kombinasi penggunaan kabel dan dek beton prategang. Kedua material dikombinasikan untuk mengatasi kebutuhan jembatan dengan bentang yang sangat panjang.

Kemudian secara garis besar berdasarkan materialnya jembatan dibagi menjadi beberapa jenis adalah sebagai berikut.

1. Jembatan Kayu

Jembatan dengan material kayu biasanya adalah jembatan sederhana. Jembatan dengan material kayu dapat dibangun tanpa bantuan alat dengan teknologi maju. Jembatan kayu dapat dikatakan dikenal pertama kali oleh manusia karena dsbanding dengan material lain teknologi konstruksi dengan kayu ada terlebih dahulu. Kayu menjadi material utama untuk menghubungkan sungai pada masa dahulu. Cukup menggunakan pohon yang tumbang atau sengaja ditumbang menjadi asal mula kayu digunakan untuk membangun sebuah jembatan (Caicedo, 2003). Seperti peradaban Cina zaman dahulu menggunakan bambu untuk membuat jembatan. Walaupun teknologi bahan bangunan sudah semakin maju, terkadang material kayu masih digunakan untuk

jembatan. Di masa sekarang jembatan dengan material kayu biasanya adalah jembatan darurat atau jembatan tidak/semi-permanen. Jembatan darurat dibuat untuk kebutuhan cepat dan mendesak. Maka dipilihlah kayu karena dibanding dengan material lainnya yang sudah ada, aplikasi kayu untuk jembatan lebih mudah dan tidak membutuhkan waktu yang lama. Jembatan tersebut sifatnya hanya sementara atau sebagai pengganti jembatan *existing* yang rusak atau jembatan permanen yang akan dibangun di lokasi yang berdekatan. Namun jika untuk jembatan permanen, material kayu sudah mulai ditinggalkan, sebanding dengan kebutuhan dan kapasitas yang diperlukan karena kapasitas jembatan dengan material kayu akan lebih rendah dibandingkan dengan jembatan material beton atau baja yang mempunyai kapasitas yang mumpuni untuk kebutuhan akomodasi lalu lintas di masa sekarang.

2. Jembatan Beton

Jembatan beton adalah jembatan dengan material yang umum digunakan di zaman sekarang. Kemajuan teknologi bahan bangunan berupa campuran beton mempengaruhi pemilihan material yang digunakan untuk konstruksi. Begitu halnya dengan konstruksi jembatan sangat banyak yang menggunakan beton sebagai material utama untuk komponen-komponen jembatan. Berawal dari manusia menggunakan material batu sebagai bahan baku jembatan pada masa Babylonia yang berkembang seiring dengan waktu menjadi campuran beton. Mengingat campuran beton yang terdiri dari semen *portland*, agregat halus, agregat kasar, dan air dengan atau tanpa zat tambahan yang membentuk masa padat (SNI 03-2847-2022) dimana batu sebagai agregat kasar yang berupa kerikil atau batu pecah dengan ukuran tertentu (SNI 1969-2008). Jembatan dengan material beton dapat dikonstruksikan secara konvensional *cast in-site* dan *precast off-site*.

3. Jembatan Baja

Baja juga dikembangkan menjadi salah satu material untuk konstruksi struktur jembatan. Di suatu waktu dengan kebutuhan konstruksi jembatan dengan bentang panjang, rangka baja menjadi solusi yang lebih baik daripada penggunaan beton. Jembatan dengan rangka baja adalah struktur yang terdiri dari rangkaian batang-batang baja yang dihubungkan satu dengan yang lainnya

(Asiyanto, 2008). Penggunaan baja pada struktur jembatan dengan bentang yang panjang akan lebih menguntungkan dari segi volume material yang digunakan lebih sedikit ketimbang menggunakan beton. Jika bentang semakin panjang sebanding pula dengan volume beton yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan kapasitasnya. Dengan kapasitas tarik yang lebih baik, baja membutuhkan volume material yang lebih sedikit daripada menggunakan beton pada jembatan dengan bentang yang panjang. Tapi dalam pelaksanaannya, aplikasi baja pada struktur jembatan membutuhkan teknologi yang canggih. Penggunaan prasarana penunjang *monitoring* pemasangan rangka baja akan sangat berpengaruh pada waktu pelaksanaan. Sumber daya manusia (SDM) yang melakukannya juga dituntut untuk menguasai pada semua aspek pemasangan rangka baja mengingat konstruksi berupa rangka yang pasti terdapat banyak *joint* atau sambungan.

2.1.2. Jembatan Beton Prategang

Jembatan beton prategang menggunakan jenis beton dengan tulangan bajanya ditarik atau ditegangkan terhadap beton. Penarikan atau tegangan tersebut dapat menghasilkan kesetimbangan pada tegangan dalam (tekan pada beton dan tarik pada baja) yang akan meningkatkan kapasitas beton menahan beban luar (Supriyadi, 2007). Beton merupakan material dengan kapasitas tekan yang tinggi tetapi mempunyai kapasitas tarik yang relatif lebih rendah. Sebaliknya, material baja mempunyai kuat tarik yang sangat tinggi. Kombinasi antara beton dan baja pada struktur akan didapatkan kondisi setimbang dimana tegangan tekan akan dipikul material beton dan tegangan tarik akan dipikul material baja. Namun pada kasus tertentu seperti pada jembatan beton dengan bentang yang lebih panjang dari biasanya struktur beton bertulang biasa tidak cukup untuk memikul tegangan lentur, geser dan puntir yang besar. Kemampuan beton dalam menahan beban luar dapat ditingkatkan dengan pemberian pratekan atau prategang (Collins dan Mitchell, 1991). Dengan pemberian sistem prategang pada struktur beton bertulang dapat mengatasi persoalan pada struktur seperti jembatan dengan bentang yang lebih panjang dari biasanya. Jembatan yang menggunakan beton prategang atau yang disebut *prestressed concrete bridge*. *Prestressed concrete bridge* merupakan jenis jembatan dengan material menggunakan beton prategang dimana terdapat kabel

baja dengan kualitas tinggi atau yang biasa disebut *tendon* di dalam beton untuk memberikan tegang awal yaitu tegangan tarik akibat karakteristik beton yang tidak dapat menahan tegangan tarik. Kabel baja dengan kualitas tinggi yang dimaksud adalah sistem kabel yang meliputi kumpulan kabel baja (*strand*), selongsong dan angkur (Trianida, 2016).

Penggunaan beton prategang pada jembatan memiliki banyak keunggulan antara lain (Lin dan Burns, 2000),

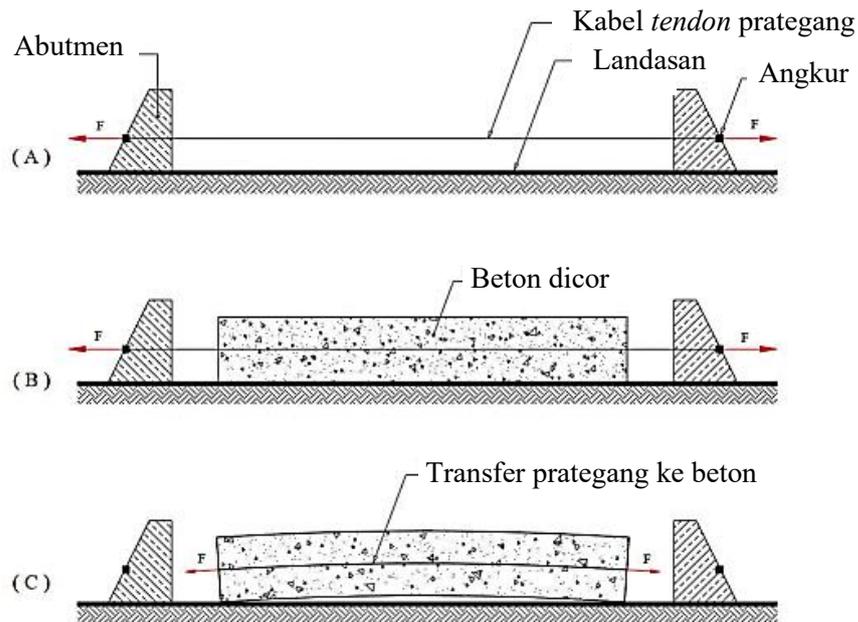
1. Dapat menanggung lebih banyak beban yang lebih besar dari beton bertulang biasa,
2. Penampang struktur beton akan lebih ramping dikarekan total luas penampang dirancang lebih untuk digunakan,
3. Berat total baja pratekan yang digunakan akan lebih sedikit disbanding dengan tulangan baja biasa,
4. Kemungkinan retakan di area tarik dapat dihindari sehingga akan lebih tahan pada korosi,
5. Dapat digunakan pada lebih banyak peregangan pada panjang bentang struktur dengan menyesuaikan defleksinya,
6. Ketahanan geser dan torsinya akan meningkat dengan pemberian sistem prategang,

Kabel pada beton prategang dapat ditegangkan dengan dua metode, yaitu metode pratarik (*pre-tensioned prestressed concrete*) dan metode pascatarik (*post-tensioned prestressed concrete*) (Yolanda, 2017). Penjelasan prinsip dari kedua metode diatas sebagai berikut,

1. Prategang Pratarik (*Pre-tensioned Prestressed Concrete*)

Pada prinsip atau metode ini, prategang pratarik dilakukan di pabrik tempat fabrikasi beton prategang. Tulangan atau kabel *strand* ditarik dengan alat bantu *jacking* sebelum campuran beton dicetak dalam bekisting. Kabel yang ditarik akan menghasilkan gaya prategang, kemudian beton dicetak pada bekisting. Kabel ditahan untuk mempertahankan gaya prategang hingga beton mencapai kekuatan yang dibutuhkan. Setelah itu tegangan kabel dapat dilepaskan secara perlahan dan pada ujung-ujung kabel dipasang angkur. Metode ini adalah

metode sederhana dengan meregangkan tulangan berupa kabel, mengikat pada ujung dinding penahan mencetak dan memadatkan beton kedalam bentuk yang diinginkan hingga beton mencapai kekuatan yang dibutuhkan. Ketika beton telah mencapai kekuatan sesuai rancangan, kabel dilepaskan dan dipotong dari dinding penahan maka gaya prategang diteruskan ke beton (Apriadi, 2001). Berikut adalah gambaran metode *pre-tensioned prestressed concrete*.

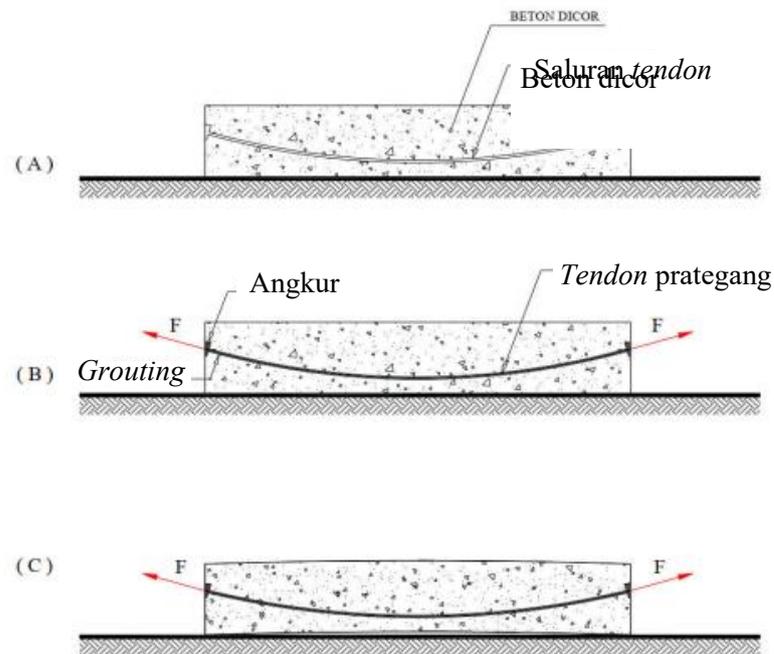


Gambar 2.1 Konsep prategang pra-tarik (Soetoyo, 2002).

2. Prategang Pascatarik (*Post-tensioned Prestressed Concrete*)

Berbeda dengan metode diatas, metode prategang pascatarik atau *post-tensioned prestressed concrete* beton dicetak terlebih dahulu. Setelah beton mencapai kekuatan yang dibutuhkan, kabel baru akan ditarik untuk mendapatkan gaya prategang. Kabel atau *tendon* dimasukkan ke dalam selubung yang sudah disiapkan pada bagian dalam beton. Proses memasukkan kabel menggunakan alat bantu *jacking* pada salah satu ujung hingga kabel mencapai ujung struktur beton. Setelah itu kabel akan ditarik dari ujung-ujungnya menggunakan dua alat bantu *jacking* dan kemudian dipasang angkur. Gaya prategang akan diteruskan ke beton melewati angkur ketika kabel diberi gaya prategang (Apriadi, 2001). Umumnya metode ini dilakukan langsung di lokasi proyek

karena beton sudah difabrikasi sebelumnya. Berikut adalah gambaran metode *post-tensioned prestressed concrete*.



Gambar 2.2 Konsep prategang pasca-tarik (Soetoyo, 2002).

Dari penjelasan dua metode di atas pada dasarnya prinsip kerja beton prategang yaitu pada *tendon* yang ditegangkan dengan cara ditarik untuk memberikan tegangan tekan pada penampang beton sebelum adanya beban yang bekerja pada struktur. Besarnya gaya tarik yang diberikan pada *tendon* saat *jacking* untuk mendapatkan gaya prategang yang cukup harus disesuaikan beban *limit* atau batas sehingga tegangan tarik tidak bekerja pada penampang beton saat menerima beban (Yolanda, 2017). Proses penegangan *tendon* dan beberapa faktor lain menimbulkan kehilangan gaya prategang awal pada struktur beton prategang. Sisa gaya prategang yang masih ada disebut gaya prategang efektif (Yolanda, 2017). Gaya prategang efektif ini adalah gaya prategang yang akan memikul beban saat masa layan struktur jembatan dengan menggunakan beton prategang.

2.1.3. Komponen Jembatan Beton Prategang

Bangunan atas jembatan (*superstructure*) dan bangunan bawah jembatan (*substructure*) secara umum adalah dua bagian utama jembatan. Kedua bagian utama tersebut terdiri dari beberapa komponen dengan fungsinya masing-masing. Bangunan atas jembatan (*superstructure*) merupakan bagian jembatan yang mentransfer beban dari lantai jembatan ke arah perletakan (Siswanto, 1993). Beban yang bekerja langsung pada lantai jembatan akan dipikul oleh komponen-komponen pada *superstructure* jembatan yang selanjutnya akan dipindahkan ke arah perletakan komponen *superstructure*. Dilihat dari posisi komponen-komponennya yang berada di atas perletakan atau tumpuan maka bangunan atas jembatan beton prategang pada umumnya terdiri dari gelagar-gelagar induk, struktur perletakan, struktur lantai jembatan (*slab*) (Siswanto, 1993). Pada bangunan atas jembatan juga terdapat komponen tambahan seperti *railing*, trotoar, lapisan perkerasan seperti aspal dan diafragma jembatan.

Berikut penjelasan komponen-komponen utama bangunan atas jembatan beton prategang (*superstructure*),

1. Plat Lantai Jembatan

Plat lantai jembatan merupakan elemen horizontal struktur yang memikul beban mati maupun beban hidup untuk disalurkan ke kerangka vertikal dari sistem struktur (Sudarmoko, 1996). Pada plat lantai jembatan juga terdapat komponen tambahan seperti lapis perkerasan, *railing*, dan trotoar. Biasanya komponen-komponen tambahan di atas menjadi satu kesatuan dengan plat lantai jembatan dengan tambahan lapisan *surface* untuk perkerasan. Lapis perkerasan pada jembatan umumnya menggunakan *flexible pavement* yaitu aspal yang berada di atas plat lantai jembatan.

2. Balok Gelagar (*Girder*)

Balok *girder* atau balok gelagar berupa balok memanjang sebagai komponen utama struktur atas jembatan. Gelagar bisa terbuat dari beton bertulang, baja maupun kayu yang fungsinya sebagai balok tumpuan plat lantai jembatan. Balok gelagar dari beton bertulang terdiri dari beberapa jenis seperti gelagar I, gelagar *box*, gelagar T dan lain-lain (Supriyadi, 2007).

Berikut adalah deskripsi dari jenis-jenis balok gelagar yang biasa digunakan pada jembatan,

1. Gelagar I (*I-Girder*)

Sesuai dengan namanya, gelagar I difabrikasi menggunakan cetakan berbentuk huruf I atau biasa disebut *precast concrete I girder* (PC-I Girder). Penampang berbentuk huruf I pada bagian tengah biasanya akan lebih ramping daripada bagian pinggir gelagar (Manalip, 2018).



Gambar 2.3 Gelagar I (*PC - I girder*) (PT Wijaya Karya Persero Tbk, 2021).

2. Gelagar Kotak (*Box Girder*)

Box girder adalah balok gelagar *longitudinal* dengan *slab* di atas dan di bawah yang berbentuk rongga (*hollow*) atau gelagar kotak. Tipe gelagar ini digunakan untuk jembatan bentang-bentang panjang (Supriyadi, 2007).



Gambar 2.4 Gelagar kotak (*Box girder*) (PT Jaya Beton Indonesia, 2016).

3. Gelagar T (*T-Girder*)

Kembali dilihat dari jenisnya, gelagar ini memiliki bentuk penampang berbentuk huruf T. Pada gelagar jenis ini tumpuan *slab* jembatan akan lebih besar karena bentuk penampang seperti huruf T. Sesuai kebutuhan perancangan jembatan umumnya gelagar T dapat diaplikasikan secara tunggal, ganda maupun majemuk.



Gambar 2.5 Gelagar T (PT Waskita Karya Persero Tbk, 2019).

3. Tumpuan/Perletakan (*Bearing Pad*)

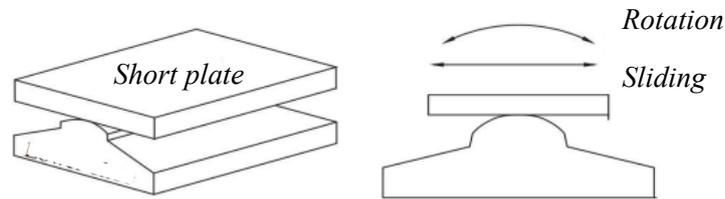
Pada suatu tumpuan struktur terdapat enam kemungkinan derajat kebebasan independen yang terdiri dari tiga komponen translasi dan tiga sudut rotasi. Sebuah bantalan atau tumpuan dapat mengizinkan gerakan salah satu dari enam derajat kebebasan independen yang mungkin terjadi. Pada umumnya struktur tumpuan jembatan berada pada *substructure* di atas penyangga berupa abutmen atau kepala kolom (*pier head*) jembatan. Saat perancangan jembatan, setiap titik tumpuan akan didesain seideal mungkin dengan cara tertentu untuk memenuhi asumsi bahwa tumpuan dapat mengizinkan salah satu gerakan derajat kebebasan

Terdapat dua jenis material bantalan atau tumpuan jembatan yang biasa digunakan di masa sekarang yaitu bantalan logam dan bantalan karet. Deskripsi material bantalan atau tumpuan jembatan sebagai berikut,

1. Bantalan Logam

Bantalan ini menggunakan material dasar berupa logam dengan bentuk tertentu. Berbagai bentuk atau jenis bantalan logam dikembangkan sesuai syarat perencanaan dengan mempertimbangan ketahanan dan pemeliharaannya (Weiwei & Yoda, 2017). Macam-macam bentuk bantalan

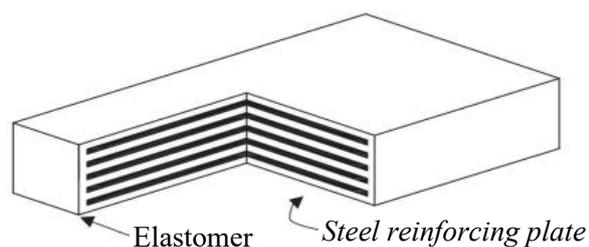
logam antara lain adalah bantalan garis, bantalan pesawat, bantalan pin, bantalan rol.



Gambar 2.6 Contoh bantalan logam (Weiwei & Yoda, 2017).

2. Bantalan Karet

Bantalan ini sesuai dengan jenisnya merupakan bantalan yang menggunakan material dasar karet. Bantalan karet atau umumnya disebut *rubber isolator* memungkinkan bangunan atas untuk bergerak memutar dan menahan beban tertentu dengan arah *longitudinal*, *transversal* dan vertikal. Karet yang digunakan pada bantalan jembatan di zaman sekarang umumnya adalah karet *elastomer*. Bantalan *elastomer* adalah suatu elemen jembatan yang terbuat dari karet alam atau karet sintetis yang berfungsi untuk meneruskan beban dari bangunan atas ke bangunan bawah (SNI 3967 : 2008). Penggunaan bantalan *elastomer* sendiri memiliki beberapa modifikasi untuk menyesuaikan kebutuhan jembatan yang dirancang seperti bantalan *elastomer* berlapis baja, bantalan *elastomer* laminasi, *lead elastomer rubber bearing*, dan *base isolation elastomer bearing*.



Gambar 2.7 Contoh bantalan karet (*rubber bearing pad*) dengan material elastomer (Weiwei & Yoda, 2017).

Penggunaan bantalan biasanya disesuaikan dengan kebutuhan dan ukuran jembatan. Biaya, ketahanan material, dan kemudahan perawatan adalah beberapa faktor yang harus diperhatikan sesuai dengan apa yang dikemukakan Lin Weiwei dan Teruhiko Yoda dalam dalam buku berjudul

“*Bridge Engineering: Classification, Design Loading and Analysis Methods*” yang terbit tahun 2017.

4. Diafragma Jembatan

Posisi letak diafragma jembatan melintang pada arah jembatan sebagai penghubung balok atau gelagar utama (Supriyadi, 2007). Dari pernyataan di atas diafragma dapat digunakan untuk mengikat dan mengunci balok atau gelagar utama menjadi kesatuan sehingga tidak terjadi pergerakan posisi antar gelagar utama jembatan.



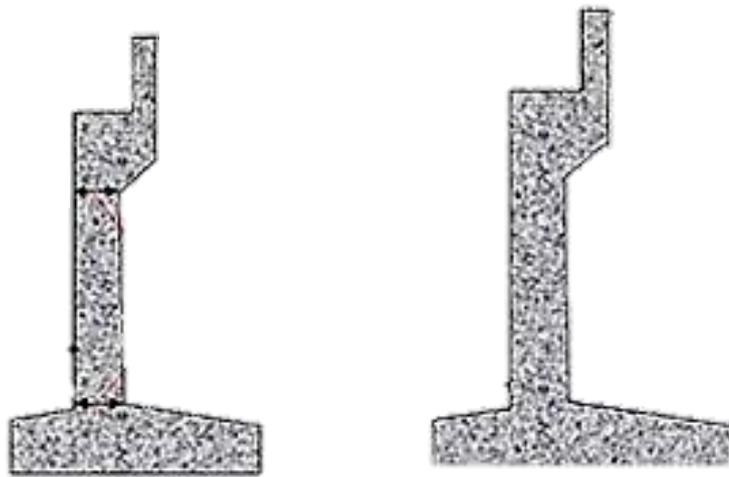
Gambar 2.8 Ilustrasi posisi diafragma melintang (PT Wijaya Karya Persero Tbk, 2021).

Telah dijelaskan di atas terkait bangunan atas jembatan (*superstructure*) beserta komponen-komponen utamanya. Bangunan atas sebagai akan menyalurkan beban yang diterima ke bangunan bawah jembatan (*substructure*). Bangunan bawah jembatan atau *substructure* berada di bagian bawah bangunan atas jembatan dihubungkan oleh struktur tumpuan. Fungsi bangunan bawah jembatan sendiri untuk memikul beban yang ditransfer oleh bangunan atas jembatan yang akan disalurkan ke bagian paling bawah yaitu pondasi jembatan. Tekanan tumpuan akibat dari berat sendiri jembatan, beban dinamis dan dari gaya tambahan lainnya seperti beban gaya rem, gesekan dan sebagainya diterima oleh pangkal atau bagian bawah jembatan dan pondasi pancang. (Struyk & Veen, 1984). Komponen-komponen utama *substructure* jembatan umumnya terdiri dari abutmen jembatan, pilar (*pier*), dan pondasi jembatan.

Berikut adalah deskripsi komponen-komponen utama bangunan bawah jembatan beton prategang (*substructure*),

1. Abutmen Jembatan

Abutmen merupakan struktur penyangga tumpuan yang dirancang untuk mentransfer beban dari bangunan atas baik beban mati dan beban hidup jembatan ke pondasi. Pada umumnya abutmen di bangun berada di tiap-tiap ujung bentang jembatan. Karena berada di ujung jembatan maka peninjauan jenis dan daya dukung tanah dilakukan terlebih dahulu. Hal ini dapat mendeskripsikan abutmen juga berfungsi sebagai dinding penahan tanah. Berikut adalah salah satu ilustrasi dari struktur abutmen jembatan,



Gambar 2.9 Ilustrasi bentuk abutmen jembatan (Utami, 2021).

2. Pilar Jembatan (*Pier*)

Pada dasarnya fungsi pilar jembatan sama dengan abutmen jembatan yaitu sebagai struktur penyangga tumpuan yang dirancang untuk mentransfer beban dari bangunan atas baik beban mati dan beban hidup jembatan ke pondasi. Namun penggunaan pilar pada struktur jembatan biasanya dikarenakan bentang gelagar pada jembatan yang dibutuhkan terlalu panjang untuk melewati halangan. Biasanya pilar digunakan pada struktur jembatan yang melewati sungai atau kondisi alam lain berupa air yang bentangnya terlalu panjang jika hanya menggunakan satu *span* gelagar saja. Seperti apabila *pier* jembatan digunakan pada jembatan yang melewati sungai, maka pertama-tama yang harus dipertimbangkan adalah merancang bentuk pilar (*pier*) yang seefektif mungkin karena hubungannya akan mempengaruhi arus sungai. Pilar dapat dikonstruksikan secara tunggal maupun majemuk tergantung jumlah gelagar dan

lebar jembatan keseluruhan. Nantinya struktur atas jembatan akan menumpu pada kepala pilar sebagai penyangga struktur tumpuan. Berikut adalah salah satu ilustrasi struktur pilar beserta kepala pilarnya,



Gambar 2.10 Struktur pilar dan kepala pilar jembatan (PT Wijaya Karya Persero Tbk, 2022).

3. Pondasi Jembatan

Pondasi sebagai pendukung konstruksi yang dirancang menumpu pada tanah. Pondasi adalah komponen dari sistem rekayasa yang meneruskan beban yang ditopang oleh pondasi dan beratnya sendiri ke dalam tanah dan batuan yang terletak dibawahnya (Bowles, 1998). Pondasi pada jembatan yang merupakan sebuah mega struktur biasanya menggunakan pondasi dalam dengan daya dukung yang tinggi. Pondasi yang digunakan dapat berupa pondasi tiang pancang atau pondasi sejenis dengan daya dukung yang relatif sama. Secara umum pondasi tiang pancang adalah komponen struktur yang memikul beban secara vertikal dan horizontal ke arah tanah. Lebih dari itu pondasi tiang pancang dapat berfungsi untuk menyelesaikan banyak masalah (Rahardjo, 2000) antara lain,

1. Memikul beban bangunan atas,
2. Menahan gaya angkat ke atas pada pondasi di bawah permukaan air,
3. Memperlambat penurunan,
4. Memperkuat daya dukung tanah sehingga mengurangi frekuensi alami dan amplitudi getaran sistem struktur,

5. Untuk menambah lapisan keamanan tambahan terutama pada bagian bawah jembatan,
6. Sebagai *soldier piles* untuk menahan longsor.

Pondasi terdiri dari dua jenis yaitu pondasi dangkal dan pondasi dalam. Pondasi dalam yaitu pondasi tiang pancang dan pondasi tiang bor. Berikut adalah ilustrasi salah satu pondasi pada jembatan.



Gambar 2.11 Proses pemasangan tiang pancang untuk pondasi jembatan (PT Wijaya Karya Persero Tbk, 2022).

2.1.4. Pengecekan Kesehatan Struktur (*Structure Health Monitoring*)

Pengecekan kesehatan struktur perlu dilakukan untuk mengetahui kondisi terkini struktur. Dalam bidang teknik sipil sistem pengecekan kesehatan struktur dimotivasi oleh kondisi kenyataan bahwa struktur teknik sipil seperti gedung, jembatan, bendungan, jaringan pipa dan lain-lain mengalami penurunan kekuatan yang tidak bisa dihindari, baik akibat usia struktur atau faktor-faktor lain seperti bencana. Deteksi kerusakan secara dini akan mencegah kerugian materi atau korban jiwa yang mungkin akan terjadi. Jika suatu struktur penting runtuh maka terjadi kerugian finansial yang akan besar, karena kegiatan ekonomi dapat terhenti. (Arfiadi, 2007).

Umumnya pengecekan kesehatan struktur didasarkan pada pemeriksaan langsung oleh manusia. Namun pada kondisi tertentu, suatu struktur yang bersifat sangat besar dan khusus pemeriksaan secara langsung mungkin akan kurang praktis

dan efektif. Selain itu, terkadang kerusakan struktur sering terletak pada titik yang tersembunyi atau sulit dijangkau oleh pemeriksa. Melihat keadaan ini pengecekan kesehatan struktur secara otomatis diperlukan agar mendapatkan hasil pemeriksaan yang lebih akurat. Kemajuan teknologi sensor memungkinkan dilakukannya pemeriksaan kesehatan struktur secara otomatis. Hal ini memunculkan istilah konsep sistem pengecekan kesehatan struktur (*Structure Health Monitoring System*). Dengan sistem ini maka kondisi terkini pada struktur akan dapat diketahui sehingga diharapkan terus dapat melayani kebutuhan pengguna infrastruktur. Sistem pengecekan kesehatan struktur didasarkan pada metode analisis dinamik (Arfiadi, 2007) sehingga pengetahuan mengenai metode analisis dinamik merupakan hal yang penting untuk diketahui.

Teknik pengecekan kesehatan struktur dapat dikategorikan ke dalam *level* identifikasi (Arfiadi, 2007). Beberapa *level* identifikasi pada sistem pengecekan kesehatan struktur adalah sebagai berikut,

1. *Level 1* : Mengidentifikasi apakah terdapat kerusakan pada struktur.
2. *Level 2* : Mengidentifikasi adanya kerusakan dan lokasi titik kerusakan.
3. *Level 3* : Mengidentifikasi adanya kerusakan, lokasi dan menilai tingkat kerusakan.
4. *Level 4* : Mengidentifikasi adanya kerusakan, lokasi, tingkat kerusakan dan memperkirakan sisa usia atau masa layan struktur.

Teknologi sensor pada sistem pengecekan kesehatan struktur memegang peranan penting karena pengukuran secara otomatis bergantung pada hasil dari sensor. Hasil pengukuran yang baik dapat menghasilkan kesimpulan yang tepat dan akurat (Arfiadi, 2007). Dilihat dari fungsinya ada berbagai jenis sensor yang digunakan pada sistem pengecekan kesehatan struktur tergantung dengan kebutuhannya. Dalam bidang dinamika struktur seperti,

1. Sensor Perpindahan

Sensor perpindahan digunakan untuk frekuensi sinyal rendah dan amplitudo yang lebih besar (Arfiadi, 2007).

2. Sensor Kecepatan

Sensor kecepatan lebih cocok digunakan untuk mengukur pada frekuensi yang lebih tinggi dari sensor perpindahan. Namun terdapat kekurangan pada hasil pengukuran yang cenderung *noisy* atau kurang jernih (Arfiadi, 2007).

3. Sensor Percepatan

Untuk sensor untuk mengukur percepatan banyak dipakai dalam pengukuran dinamik pada suatu sistem struktur (Arfiadi, 2007). Pada sensor percepatan didesain dapat mengkonsumsi daya yang relatif kecil dan menggunakan teknologi *low noise characteristic* (Paek et al., 2007).

Teknologi sensor di atas biasanya digunakan untuk mendapatkan data berupa nilai frekuensi alami dari struktur. *Structure health monitoring* (SHM) yang menggunakan data frekuensi alami dapat digunakan untuk mendeteksi kondisi terkini dan kerusakan dari struktur (Caicedo, 2003). SHM juga didefinisikan sebagai penginderaan tak rusak dan analisa karakter struktur termasuk respon struktur untuk mendeteksi perubahan yang mengindikasikan adanya penurunan kemampuan struktur (Nababan, 2008).

2.1.5. Frekuensi Alami dan Ragam Getar (*Mode Shape*) Struktur

Parameter dinamik hasil uji dapat digunakan untuk menilai kondisi kesehatan struktur, termasuk dapat mengidentifikasi adanya kerusakan pada struktur (Alampalli, 2000). Parameter dinamik dapat berupa nilai frekuensi alami (*natural frequency*) dan pola ragam getar (*mode shape*) (Zwolski dan Bien, 2007). Frekuensi sendiri adalah jumlah getaran yang terjadi setiap satuan waktu. Dalam hal ini frekuensi alami menjadi acuan terkait kemungkinan terjadinya resonansi akibat beban dari luar. Resonansi pada struktur apabila nilai frekuensi yang berasal dari beban luar mendekati atau sama dengan frekuensi alami dari struktur (Indarto et al., 2017). Frekuensi natural dapat dinyatakan sebagai berikut,

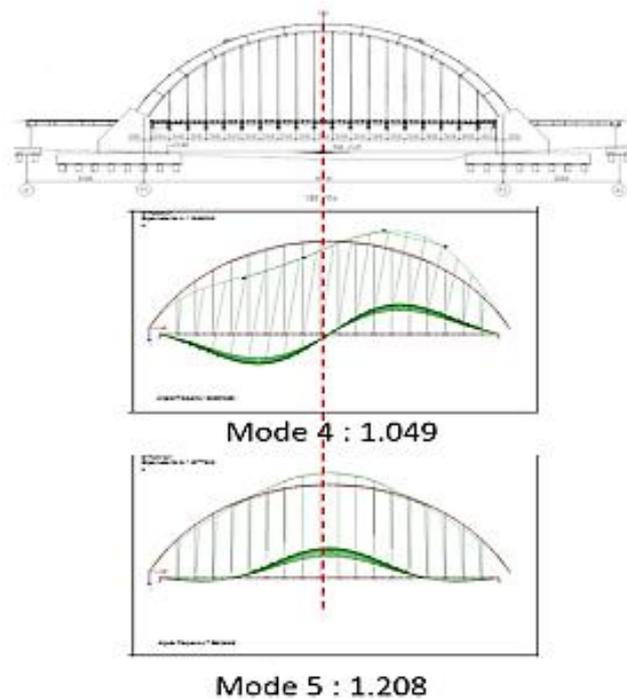
$$f_n = \frac{1}{T_n} = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \left[\text{Hz atau } \frac{\text{cycle}}{\text{time}} \right] \dots \dots \dots (1)$$

Dimana, 2π sebagai panjang gelombang, k adalah kekakuan (*stiffness*) struktur dan m adalah massa dari struktur. Kemudian waktu yang dibutuhkan oleh

suatu hal melakukan sekali getaran adalah periode getar atau T_n yang berhubungan langsung dengan nilai frekuensi alami ω_n , dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} [\text{sec}] \dots \dots \dots (2)$$

Untuk mendapatkan nilai frekuensi teoritis, dilakukan pemodelan struktur jembatan (Santoso, 2020). Dari hasil analisis juga didapatkan pola ragam getar (*mode shape*). Sesuai istilahnya, ragam getar (*mode shape*) sendiri merupakan pola atau jenis gerakan atau goyangan dari suatu struktur. Ragam getar struktur merupakan representasi deformasi yang terjadi pada struktur pada frekuensi yang spesifik (Indarto et al., 2017).



Gambar 2.12 Pola ragam getar jembatan beserta nilai frekuensinya (Santoso, 2020).

2.1.6. Tegangan dan Regangan

Sistem kinerja struktur beton bertulang dalam penggunaannya bertujuan untuk mengatasi beban-beban yang terjadi pada masa *serviceability*. Beban yang bekerja pada struktur akan mempengaruhi kondisi fisik material struktur. Perubahan yang terjadi dapat berupa perubahan ukuran atau dimensi (deformasi) akibat beban yang terjadi. Pada masa layannya, komponen-komponen jembatan

beton bertulang seperti balok gelagar dan pilar akan mengalami tegangan dan regangan. Tegangan yang terjadi pada struktur beton bertulang adalah komparasi dari gaya atau beban yang terjadi pada struktur beton bertulang dibandingkan dengan luas keseluruhan penampang struktur beton bertulang tersebut. Maka persamaan yang dapat digunakan pada tegangan atau besar ukuran intensitas beban (P) atau reaksi yang terjadi per satuan luas (A) (Singer, 1995) adalah sebagai berikut,

$$\sigma = \frac{P}{A} [MPa] \dots\dots\dots(3)$$

Dimana σ merupakan tegangan pada struktur beton bertulang yang merupakan perbandingan beban (P) per satuan luas penampang (A). Tegangan normal biasanya akan diasumsikan positif apabila tegangan merupakan suatu *tensile* (tarikan) dan akan diasumsikan negative apabila merupakan suatu *compression* (tekanan).

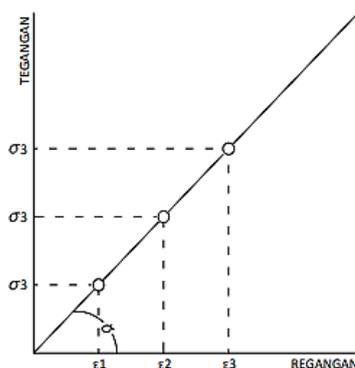
Sedangkan regangan merupakan ukuran yang berubah dari satuan awal yang disebabkan gaya atau beban yang menekan atau menarik struktur beton bertulang. Pembagian antara perubahan ukuran panjang struktur ($I-I_0$) dengan panjang awal struktur (I_0) akan mendapatkan nilai regangan atau deformasi pada struktur beton bertulang (Singer, 1995). Berikut rumus regangan,

$$\varepsilon = \frac{I-I_0}{I_0} \dots\dots\dots(4)$$

Dimana yang sudah dijelaskan di atas bahwa ε yang merupakan regangan yang dihasilkan dari pembagian ukuran panjang yang berubah ($I-I_0$) dengan panjang mula-mula struktur (I_0). Jika struktur mengalami regangan tarik akan menunjukkan perpanjangan dimensi material struktur. Sedangkan apabila mengalami regangan tekan maka dimensi material struktur akan semakin pendek.

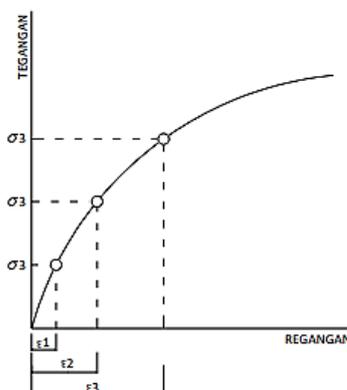
Antara tegangan dan regangan yang terjadi pada struktur beton bertulang di atas dapat dianalisis bahwa tegangan dan regangan saling berhubungan. Grafik dapat merepresentasikan hubungan tegangan dengan regangan dimana nilai keduanya dinyatakan dalam suatu garis lurus hingga ada kesebandingan antara ukuran regangan akibat tegangan yang terjadi pada struktur. Karena dapat

dinyatakan dengan suatu garis lurus sesuai dengan hipotesis Bernoulli dimana penampang struktur akan tetap sama saat belum mengalami lentur dan akan tegak lurus terhadap garis netral setelah mengalami lentur. Adanya kesebandingan hubungan antara tegangan dan regangan bahwa keduanya dapat dipetakan kedalam titik dalam satu garis lurus maka dapat ditampilkan grafik hubungan linear (Hukum Hooke). Berikut grafik hubungan tegangan dan regangan linear,



Gambar 2.13 Grafik hubungan tegangan dan regangan linear (Iqbal, 2017).

Hubungan yang linear bahwa regangan berbanding lurus dengan tegangan yang terjadi. Namun dalam kondisi sebenarnya, tegangan dan regangan tidak akan selalu sebanding. Pada kondisi batas tegangan tekan pada beton tidak akan sebanding dengan regangannya (Lu et al., 2015). Dari tidak sebandingnya hubungan antara tegangan dan regangan merupakan hubungan non-linear. Berikut grafik hubungan tegangan dan regangan yang tidak linear.



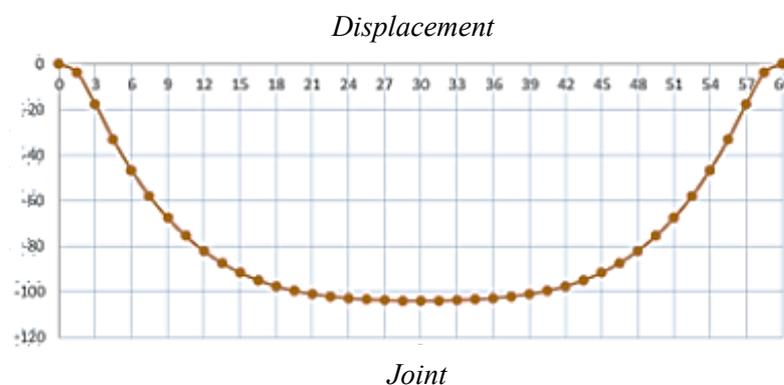
Gambar 2.14 Grafik hubungan tegangan dan regangan non-linear (Iqbal, 2017).

Penurunan nilai pada grafik diakibatkan kondisi beton sendiri. Pada saat pengujian kuat tekan pada sampel beton berbentuk silinder akan *fracture* saat titik dimana tegangan maksimum. Lendutan terjadi karena beban yang ditahan melampaui kapasitas kuat tekan beton (Ibrahim dan MacGregor, 1997).

Pada gelagar (*girder*) jembatan sebagai balok memanjang yang menahan gaya beban dapat mengakibatkan terjadi momen lentur dan regangan (deformasi) lentur. Pada saat terjadi momen lentur positif dimana perpanjangan dimensi material terjadi, regangan tekan akan terjadi di bagian atas balok gelagar dan regangan tarik terjadi pada bagian bawah balok gelagar dan dipisahkan oleh garis netral.

2.1.7. Displacement

Sebuah struktur dibangun untuk memenuhi kebutuhan tertentu dimana fungsi sebuah struktur adalah mengakomodasi kebutuhan dan menahan beban. Beban yang bekerja pada sebuah struktur memungkinkan terjadinya perpindahan atau pergeseran pada struktur tersebut. Perpindahan (*displacement*) atau defleksi adalah gerakan dari struktur secara horizontal maupun vertikal yang diakibatkan oleh beban yang bekerja pada struktur (Kono dan Osumi, 2021). *Displacement* juga dinyatakan sebagai perubahan posisi suatu titik pada elemen struktur ke lokasi titik yang berbeda akibat beban yang bekerja pada elemen struktur tersebut (Alaydrus et al., 2015). *Displacement* dapat diukur dengan mengetahui jarak perpindahan titik-titik pada elemen yang sudah ditentukan. Berikut contoh grafik analisis *displacement*,



Gambar 2.15 Grafik *displacement* balok jembatan (Alantia, 2022).

Perpindahan (*displacement*) yang berarah horizontal (defleksi lateral) dan berarah vertikal (defleksi aksial) dipengaruhi oleh beban yang bekerja, tumpuan, jenis material dan kekakuan (*stiffness*) bahan bangunan yang digunakan pada struktur (Kono dan Osumi, 2021). Kekakuan struktur dapat merepresentasikan kekuatan bahan bangunan yang digunakan pada struktur untuk menahan tegangan atau beban tanpa menjadikan bentuk struktur berubah (deformasi) atau terjadi defleksi lateral maupun aksial.

2.1.8. Deformasi

Deformasi merupakan salah satu metode kontrol kestabilan dari suatu elemen terhadap tingkat kekuatannya. Pada umumnya deformasi dapat direpresentasikan sebagai perubahan bentuk elemen dari struktur dalam bentuk melengkung dan perubahan berupa perpindahan posisi dari titik pada elemen ke lokasi yang berbeda (*displacement*) yang disebabkan oleh beban yang bekerja pada elemen struktur tersebut (Alaydrus et al., 2015).

2.1.9. Model Elemen Hingga (*Finite Element Model*)

Metode elemen hingga atau biasa disebut *finite element methods* (FEM) adalah prosedur numeris yang dapat dipakai untuk menyelesaikan masalah bidang rekayasa seperti analisa tegangan pada struktur, frekuensi alami beserta ragam getarnya, perpindahan panas, elektromagnetis dan aliran fluida (Song et al., 2020). Pada umumnya metode ini digunakan apabila solusi yang pasti atau solusi hasil analisa tidak dapat menjawab masalah pada rekayasa. Inti FEM berdasarkan istilahnya adalah membagi suatu benda atau rekayasa yang akan dianalisis menjadi banyak bagian dengan jumlah tertentu (*finite*). Bagian- bagian ini biasa disebut elemen yang setiap elemen yang dibuat atau terbagi akan dihubungkan satu sama lain dengan node (*node*). Kemudian dapat dibuat persamaan matematis yang akan merepresentasikan rekayasa tersebut secara utuh. Representasi secara utuh ini biasa disebut model elemen hingga (*finite element model*). Model elemen hingga dapat dibuat menggunakan berbagai perangkat lunak (*software*) yang sudah banyak tersedia di zaman sekarang, tentunya menyesuaikan kebutuhan rekayasa model yang ingin dibuat.

2.1.10. CSi Bridge version 21

Menurut kemajuan teknologi di zaman sekarang, sudah banyak berkembang perangkat lunak (*software*) yang digunakan untuk pembuatan model elemen hingga (*finite element model*). Dalam penelitian ini yang berfokus dalam pembuatan model elemen hingga dari struktur jembatan maka peneliti menggunakan *software CSi Bridge*.

CSi Bridge menggunakan pendekatan pemodelan dengan berbasis objek parametrik saat mengembangkan sistem jembatan. Hal ini memungkinkan perancang untuk menentukan komposisi jembatan sebagai elemen objek (*superstructure* jalan raya, *substructure*, abutmen, pilar, sistem pondasi, dll). Sebelum *SAPFire*® *Analysis Engine*, yang terintegrasi dengan Perangkat Lunak CSI, secara otomatis memindahkan model berbasis objek ke dalam model berbasis perhitungan matematis. model elemen hingga dengan menyatukan asal material dan menetapkan properti dari material yang digunakan. Pendekatan berorientasi objek ini menyederhanakan dan mempercepat proses pemodelan, yang secara langsung menentukan, menghubungkan, membatasi, dan menyatukan semua volume material. Terdapat keuntungan dalam penggunaan *CSi Bridge* yaitu perancang dapat mentransfer data model yang dibuat dari perangkat lunak lain yang berformat Dwg/Dwf, IGES, CIS/2 STEP, dan XML (*CSiAmerica, 2022*).

Setelah proses pemodelan, *CSi Bridge* menyediakan pilihan untuk memasukan kasus beban dan kombinasinya. Beban kendaraan, seismik, dan angin dihasilkan menurut aturan pada bangunan (AASHTO LRFD, Kanada, dll.) dan ditetapkan menurut dimensi model. Serangkaian contoh standar untuk menetapkan dan menyelubungi kondisi beban membuat *CSi Bridge* lebih intuitif dan praktis untuk digunakan dalam pemodelan elemen hingga. Setelah model berbasis objek mendekati kondisi asli telah diterjemahkan ke dalam model elemen hingga dan diberikan beban kasus dan kombinasi, proses analisis secara otomatis mengikuti. Kemampuan analisis melampaui kinerja elastis ke dalam penilaian perilaku inelastik pada suatu struktur. Ketidaklinieran geometris dan material memberikan pengetahuan tentang kekuatan, dan ukuran kinerja lain yang penting untuk respons di bawah beban yang sangat besar. Analisis *static-pushover* dan dinamis (*steady-*

state, response-spectrum, dan time-history) memberikan pengetahuan lebih lanjut tentang ketahanan pada gempa. Properti pada sambungan *substructure* dapat direncanakan. Fasilitas analisis tambahan dapat menjelaskan perilaku muai dan penyusutan, pasca-tarik dengan penarikan kabel otomatis, tahapan efek konstruksi yang tertuju pada konstruksi segmental, tekuk, *camber*, dan penemuan bentuk (*CSiAmerica, 2022*).

Proses desain otomatis dengan prosedur analisis berguna untuk mengoptimalkan pengubahan dimensi komponen jembatan. Untuk sistem beton bertulang, *CSi Bridge* mengoptimalkan dimensi tulangan dengan prosedur yang sebanding. *Data report* dapat disesuaikan untuk menyajikan analisis dan detail desain dalam berbagai format berupa data dan diagram momen, geser, dan respons aksial dalam tampilan 2D dan 3D, kapasitas perpindahan seismik, rasio permintaan-kapasitas, peringkat beban setiap klasifikasi, plot permukaan, pengaruh untuk perpindahan, reaksi, dan kerangka cangkang, padat, atau respons yang tertautan dalam pilihan fitur untuk menyajikan *data output* (*CSiAmerica, 2022*).

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Gambaran Umum Penelitian

Pada penelitian ini membahas bagaimana membuat dan menganalisa *3D finite element model* dari suatu jembatan beton prategang. Analisa yang akan dilakukan pada *3D finite element model* yang telah dibuat menggunakan teknik analisis *modal* untuk mengetahui parameter dinamik pada jembatan tersebut. Parameter dinamik pada jembatan yang akan ditinjau hanya berupa nilai frekuensi alami dan ragam getar (*mode shape*) dari jembatan. Hasil analisis tersebut akan ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik untuk meninjau lebih lanjut tentang frekuensi alami dan ragam getar (*mode shape*) dari suatu jembatan beton prategang.

Pembuatan dan analisis *3D finite element model* akan menggunakan *software CSi Bridge version 21*. Pada proses pembuatan *finite element model* jembatan beton prategang akan dilakukan perhitungan cek rancangan dengan dibantu *software MathCad Prime*. Perhitungan akan berdasar pada SNI 1725 : 2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan, Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga Nomor 06/SE/Db/2021 mengacu pada data *design engineering drawing* jembatan. Hasil pembuatan model menggunakan *software CSi Bridge version 21* berupa bentuk 3 dimensi jembatan dengan rincian tiap-tiap komponen jembatan yang dibuat semirip mungkin dengan kondisi sebenarnya menggunakan fitur-fitur yang telah disediakan mengacu pada data *design engineering drawing* jembatan tersebut. Setelah memodelkan jembatan, kemudian akan dijalankan analisis *modal* untuk mendapatkan *output* data nilai frekuensi alami dan ragam getar (*mode shape*). Data *output* tersebut nantinya akan berguna sebagai *baseline* data untuk proses pengecekan kesehatan struktur (*structure health monitoring*) dimana dapat mengidentifikasi kondisi terkini struktur jembatan sebagai acuan kelayakan dan menentukan sisa masa layan struktur jembatan, namun hal ini tidak akan ditinjau lebih lanjut pada penelitian ini. Penelitian ini akan berfokus pada identifikasi parameter dinamik dari suatu jembatan berupa hasil *output* nilai frekuensi alami dan ragam getar saja.

3.2. Metode Penelitian

Metode penelitian pada skripsi yang berjudul "Analisis *Finite Element Model* dan Identifikasi *Dynamic Properties* Jembatan Tugu Suharto Menggunakan *Software CSi Bridge version 21*" ini adalah sebagai berikut,

1. Pengumpulan data dan mutu material yang digunakan, standar desain, dimensi struktur jembatan Tugu Suharto,
2. Perhitungan manual rancangan jembatan mengacu SNI 1725 : 2016, Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga Nomor 06/SE/Db/2021 dan data *design engineering drawing* (DED) jembatan Tugu Suharto menggunakan *software MathCad Prime* sebagai pengetahuan dan kebutuhan penyesuaian model.
3. Pembuatan *3D finite element model* struktur jembatan Tugu Suharto menggunakan *software CSi Bridge version 21* mengacu data perhitungan manual dan data *design engineering drawing* jembatan Tugu Suharto,
4. Analisis *modal* struktur untuk mendapatkan data *output* nilai frekuensi alami dan ragam getar (*mode shape*) menggunakan *software CSi Bridge version 21*,
5. Pengolahan data *output* dari hasil analisis *modal* menggunakan *CSi Bridge version 21*,
6. Mendeskripsikan dan menampilkan data *output* yang telah diolah dalam bentuk data tabel dan grafik yang telah dianalisis,
7. Kesimpulan.

3.3. Deskripsi Objek Penelitian

Objek dari penelitian pada skripsi yang berjudul "Analisis *Finite Element Model* dan Identifikasi *Dynamic Properties* Jembatan Tugu Suharto Menggunakan *Software CSi Bridge version 21*" ini adalah jembatan Tugu Suharto di Kota Semarang.

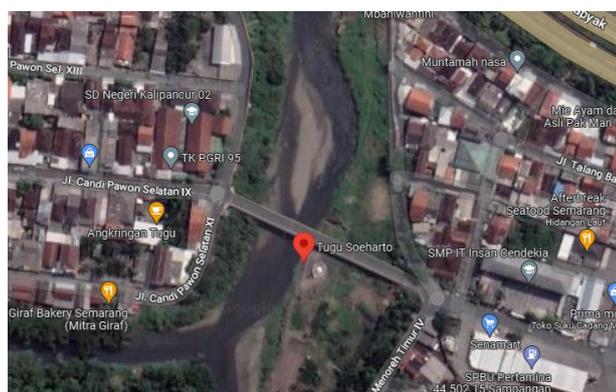
3.3.1. Lokasi Jembatan Tugu Suharto

Jembatan Tugu Suharto adalah salah satu jembatan yang aktif digunakan dari banyak jembatan yang ada di Kota Semarang. Jembatan Tugu Suharto berlokasi di Jl. Menoreh Raya, Bendan Duwur, Kecamatan Gajahmungkur, Kota Semarang, Jawa Tengah. Jembatan terletak di kordinat 110,387686(x) dan -7,016954(y) (DPU Kota Semarang, 2022). Jembatan mempunyai panjang jalan 93,8 m dengan rincian

bentang jembatan total 87,4 m. Lebar jalan di jembatan Tugu Suharto adalah 5,3 m dan tinggi jembatan 9,5 m. Jembatan Tugu Suharto menghubungkan jalan melewati atas sungai Kaligarang. Jembatan Tugu Suharto dibangun pada tahun 2013 dengan kode nomor jembatan 33.74.09.037.001, dan jika jembatan ditutup untuk lalu lintas maka pengguna jalan harus menempuh 6 km untuk alternatif jalan (DPU Kota Semarang, 2022).



Gambar 3.1 Tampak atas bagian kiri jembatan Tugu Suharto (DPU Kota Semarang, 2022).



Gambar 3.2 Lokasi jembatan Tugu Suharto (maps.google.com/JembatanTuguSuharto).

3.3.2. Data Eksisting Jembatan Tugu Suharto

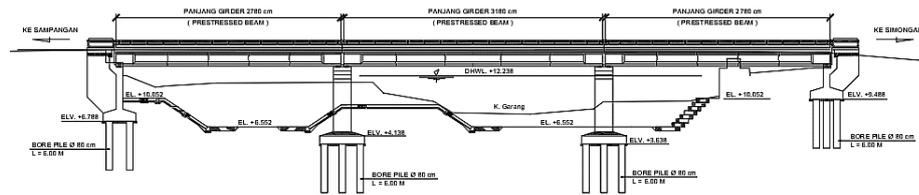
Jembatan Tugu Suharto merupakan struktur jembatan beton prategang. Jembatan Tugu Suharto menggunakan gelagar I (*PC-I Girder*) sebagai gelagar utamanya. Kemudian data-data dimensi digunakan untuk dasar pembuatan *3D finite element model*. Data berupa jenis, bentuk dan dimensi seluruh komponen jembatan. Data diperoleh dari observasi secara langsung di lokasi struktur Jembatan Tugu

Suharto oleh peneliti dan didukung oleh data *design engineering drawing* dari DPU Kota Semarang. Berikut rincian data tersebut,

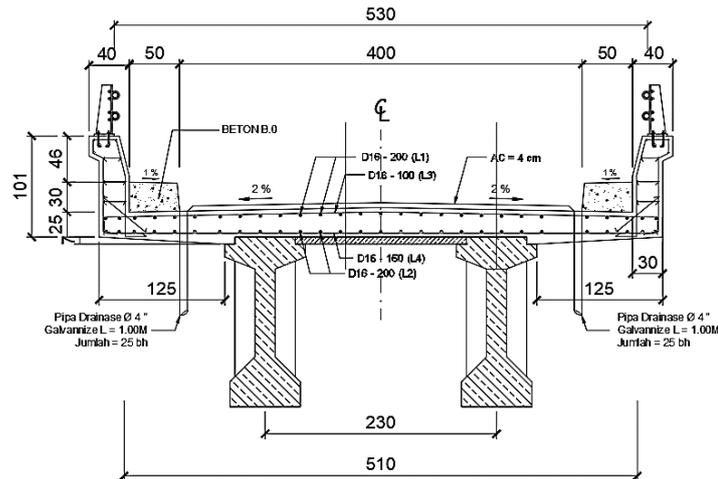
A. Panjang Jalan Total	: 93,8 m
B. Panjang Bentang Total	: 87,4 m
C. Panjang Bentang Antar Pilar	: 31,8 m
D. Jumlah Bentang	: 3 bentang
E. Panjang Bentang Ujung	: 27,8 m
F. Lebar Bentang Total	: 6 m
G. Lebar Plat Lantai	: 5,3 m
H. Tebal Plat Lantai Jembatan	: 0,32 m
I. Lebar Jalan Total	: 4 m
J. Tebal Perkerasan Aspal	: 0,04 m
K. Lebar Trotoar	: 0,5 m x 2
L. Tinggi Trotoar	: 0,3 m
M. Tinggi Jembatan	: 9,5 m
N. Tinggi <i>Railing</i>	: 1 m

Didapatkan pula data pendukung berupa jenis dan mutu material yang digunakan pada struktur jembatan Tugu Suharto oleh DPU Kota Semarang. Berikut rincian jenis dan mutu material yang digunakan,

A. Beton Plat Lantai	: $f'c$ 35 MPa
B. Beton Gelagar I	: $f'c$ 50 MPa
C. Beton Abutmen	: $f'c$ 35 MPa
D. Beton Kepala Pilar	: $f'c$ 35 MPa
E. Beton Pilar	: $f'c$ 35 MPa
F. Baja Tulangan	: Baja mutu U-32
G. Kawat <i>Strand</i>	: <i>Seven wire strand</i> diameter 12,7 mm
H. <i>Bearing Pad</i>	: <i>Elastomer bearing</i>



Gambar 3.3 Gambar tampak samping jembatan Tugu Suharto (DPU Kota Semarang, 2013).



Gambar 3.4 Gambar potongan melintang jembatan Tugu Suharto (DPU Kota Semarang, 2013).

3.4. *Material Properties* Objek Penelitian

Material yang digunakan pada jembatan Tugu Suharto yang merupakan struktur jembatan beton prategang adalah beton, tulangan baja dan elastomer sebagai tumpuan jembatan. Sebagai material utama, beton yang digunakan beragam seperti beton dengan mutu tinggi hingga beton yang bermutu rendah. Mutu beton dengan mutu tinggi yang digunakan pada jembatan dapat meningkatkan efisiensi dalam penggunaannya. Peningkatan penggunaan yang efisien beton dengan mutu tinggi dikombinasikan dengan baja tulangan dengan mutu tinggi pula, dalam hal ini adalah pemberian prategang. Pada umumnya pemberian prategang menggunakan kawat (*wire*), untaian atau gabungan kawat (*strand*) atau menggunakan batang (*bar*) tarik. Pemberian prategang pada jembatan yang sering dipakai adalah menggunakan untaian atau gabungan kawat (*strand*) dengan konfigurasi 7 buah kawat atau yang dikenal *seven wire strand* sebagai tendon pada beton prategang

jembatan. Kemudian beton dengan mutu sedang hingga rendah digunakan pada komponen jembatan lainnya seperti plat lantai, diafragma, trotoar dan lain-lain.

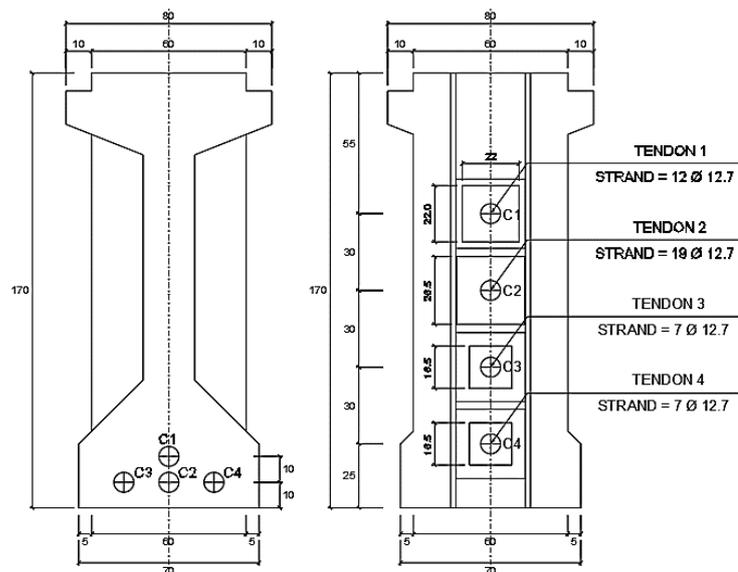
Tabel 3.1. Jenis mutu beton (PUPR, 2012).

Jenis Beton	f_c' (MPa)	σ'_{bk} (Kg/cm ²)	Keterangan
Mutu Tinggi	35 - 65	400 - 800	Pada umumnya digunakan untuk beton prategang seperti gelagar beton prategang, plat beton prategang dan sejenisnya.
Mutu Sedang	20 - < 35	250 - < 400	Pada umumnya digunakan untuk beton bertulang seperti plat lantai jembatan, diafragma, pilar dan sebagainya.
Mutu Rendah	15 - < 20	175 - < 250	Pada umumnya digunakan untuk struktur beton tanpa tulangan seperti beton trotoar dan pasangan batu kosong yang diisi campuran beton.
	10 - > 15	125 - < 175	Pada umumnya sebagai lantai kerja atau penimbunan kembali dengan beton.

Jenis kawat yang digunakan pada jembatan Tugu Suharto adalah *seven-wire strand*. *Strand* terbuat dari 7 untaian kawat dengan diameter tertentu yang terdiri 6 kawat yang membentuk lapisan mengelilingi 1 kawat inti yang berada ditengah. Pada 6 kawat luar sebagai pelapis dilakukan puntiran dalam *helical strand* masing-masing membentuk spiral arah sumbu memanjang *strand*. Jika dibandingkan dengan *single wire*, kurva perpanjangan *strand* pada *seven-wire strand* akan lebih besar. Hal ini akan berdampak pada tipikal modulus elastisitas yang lebih kecil hingga terjadi pengurangan kekakuan (*stiffness*) material kawat jenis *seven-wire strand* yang digunakan pada tendon jembatan (PUPR, 2012).

Tabel 3.2. *Prestressing steel* berdasarkan ASTM (PUPR, 2012).

<i>Prestressing Steel</i>	<i>ASTM type or grade</i>	<i>Nominal Dimension</i>		<i>Minimum tensile strength (f_{pu})</i>
		<i>Diameter (mm)</i>	<i>Area (mm²)</i>	<i>MPa</i>
<i>Stress-relieved wires (ASTM A421)</i>	WA, f BA, f	4,88	18,7	1725
	WA	4,98	19,4	1725
	BA	4,98	19,4	1653
	WA, BA	6,35	31,6	1655
	WA	7,01	38,7	1622
<i>Stress-relieved 7-wires strands (ASTM A416)</i>	<i>Grade 250</i>	6,35	23,22	1725
		7,94	37,42	
		9,53	51,61	
		11,11	69,68	
		12,54	92,90	
	<i>Grade 270</i>	9,53	54,84	1860
		11,11	74,19	
		12,54	98,17	
		14,29	123,97	
		15,24	139,35	



Gambar 3.5 Posisi tendon jembatan Tugu Suharto (DPU Kota Semarang, 2013).

3.5. Pengumpulan Data Penelitian

3.5.1. Data Primer

Proses pembuatan *3D finite element model* menggunakan *software CSi Bridge version 21* membutuhkan data primer berupa data dimensi komponen jembatan beserta mutu bahan yang digunakan. Peneliti mendapatkan data dimensi komponen jembatan melalui observasi dengan metode pengukuran langsung di lapangan. Rincian data yang didapat adalah sebagai berikut,

Tabel 3.3. Data primer penelitian.

No.	Data	Sumber Data
1	Dimensi <i>superstructure</i> (Plat Lantai, trotoar, <i>railing</i> , perkerasan aspal, gelagar, diafragma, tumpuan)	Hasil observasi (pengukuran) secara langsung
2	Dimensi <i>substructure</i> (abutmen, pilar, kepala pilar)	Hasil observasi (pengukuran) secara langsung

Observasi yang dilakukan oleh peneliti dilaksanakan pada rentang bulan Januari hingga Maret. Peneliti menggunakan alat ukur berupa meteran roda dan meteran *roll* untuk mengukur dimensi komponen jembatan Tugu Suharto. Berikut salah satu dokumentasi observasi yang telah dilaksanakan,



Gambar 3.6 Pengukuran lebar trotoar (Hasil observasi, 2023).

3.5.2. Data Sekunder

Sebagai pendukung, data sekunder dibutuhkan untuk melengkapi data-data yang diperlukan untuk pembuatan dan analisa *3D finite element model* jembatan Tugu Suharto. Data sekunder yang dibutuhkan berupa uraian struktur jembatan, dalam hal ini adalah uraian struktur jembatan Tugu Suharto.

Tabel 3.4. Data sekunder penelitian.

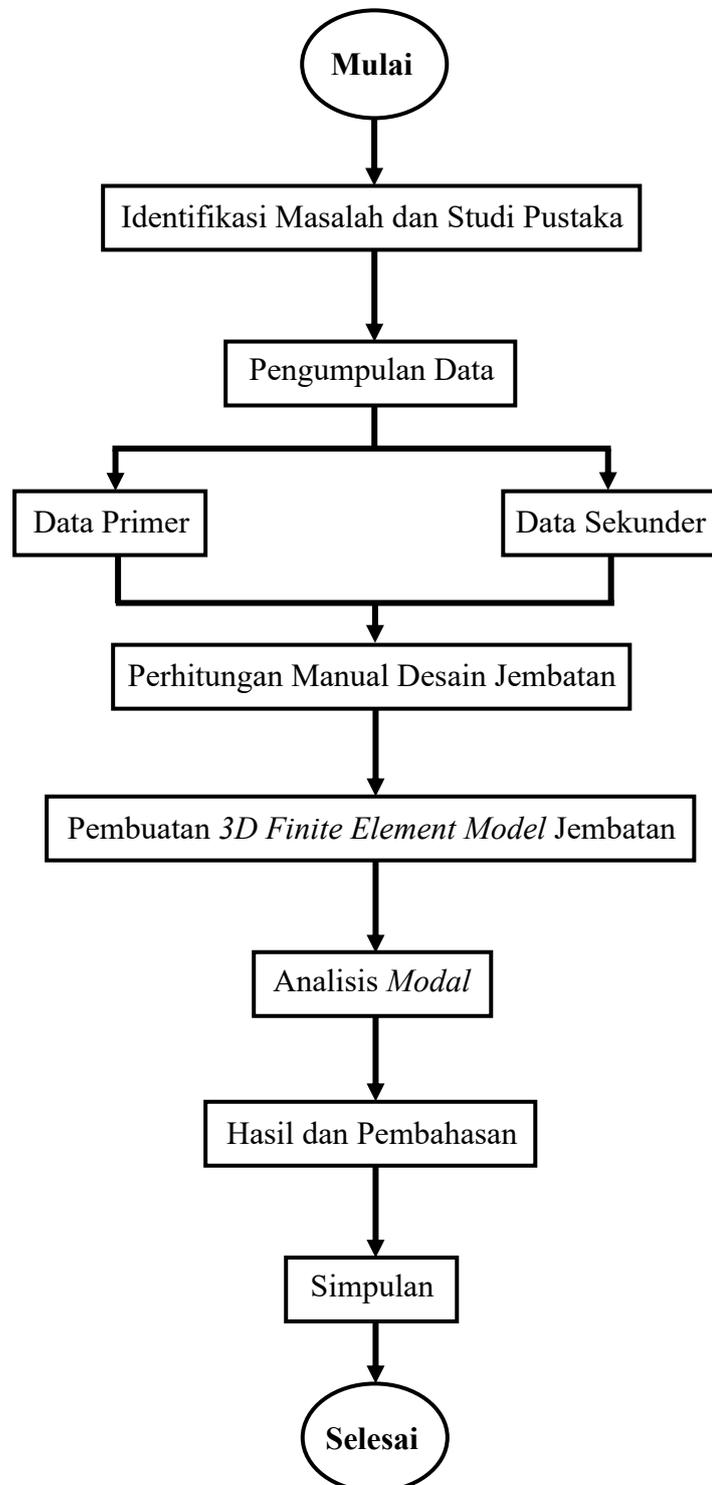
No.	Data	Sumber Data
1	Gambar desain jembatan Tugu Suharto (<i>Design engineering drawing</i>)	DPU Kota Semarang
2	Laporan Pemeriksaan Inventaris Jembatan Tugu Suharto	DPU Kota Semarang

Pada penelitian ini mengacu data *design engineering drawing* Jembatan Tugu Suharto sebagai data sekunder bersumber dari DPU Kota Semarang. Data diatas mayoritas berupa gambar lengkap dengan keterangan sebagai pendukung untuk menterjemahkan menjadi rincian spesifikasi struktur.

3.6. Bagan Alir Penelitian

Dalam penelitian pembuatan dan analisa *finite element model* jembatan Tugu Suharto untuk diidentifikasi parameter dinamikanya akan lebih mudah jika dalam proses penelitiannya digunakan metodologi dengan langkah-langkah penelitian yang telah direncanakan dan terarah. Langkah penelitian diawali dengan identifikasi persoalan yang terjadi. Data yang telah lengkap dapat mempermudah proses pembuatan dan analisis *3D finite element model* menggunakan *software CSi Bridge version 21*. Diawali dengan perhitungan manual dengan dasar SNI 1725 : 2016 serta didukung acuan Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga Nomor 06/SE/Db/2021. Dilanjut pembuatan *3D finite element model*. Setelahnya akan dianalisis menggunakan teknik analisis *modal* untuk mendapat parameter dinamik berupa nilai frekuensi alami dan ragam getar (*mode shape*). Hasil analisis *modal* berupa *output* nilai frekuensi alami dan ragam getar kemudian dioleh secara analitis. Dari pembahasan dapat ditarik kesimpulan dan dapat ditambahkan saran

untuk memperbaiki penelitian serupa di masa yang akan datang. Berikut alur metode penelitian yang disajikan dalam bentuk diagram alir,



Gambar 3.7 Bagan alir penelitian.

3.7. Pengolahan Data

Data yang diproses dan diolah oleh peneliti dengan serangkaian proses pemodelan 3D struktur jembatan dengan analisisnya. Cara yang ditempuh oleh peneliti dipermudah dengan *software* yang digunakan peneliti yaitu *software MathCad Prime* pada perhitungan manual desain jembatan sebagai data tambahan dan *software CSi Bridge version 21* sebagai *software* utama yang digunakan pada pembuatan dan analisis 3D *finite element model* jembatan. Data hasil analisis *modal* pada 3D *finite element model* jembatan juga didapatkan menggunakan fitur analisis pada *software CSi Bridge version 21*. Data *output* dapat dipindahkan ke dalam format data tabel pada *software Microsoft Excel* untuk mempermudah pengolahan data yang akan ditampilkan.

3.7.1. Proses Perhitungan Manual Desain Jembatan (*MathCad Prime*)

Perhitungan mengacu pada SNI 1725:2016, Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga Nomor 06/SE/Db/2021 dan data *design engineering drawing* (DED) jembatan Tugu Suharto menggunakan *software MathCad Prime*.

1. Beban Mati Sendiri dan Beban Mati Tambahan

$$\text{Beban Mati Sendiri total } (W_{MS1}) = W_s + W_{rcp} + W_g$$

$$(W_{MS2}) = W_{dp_mid}$$

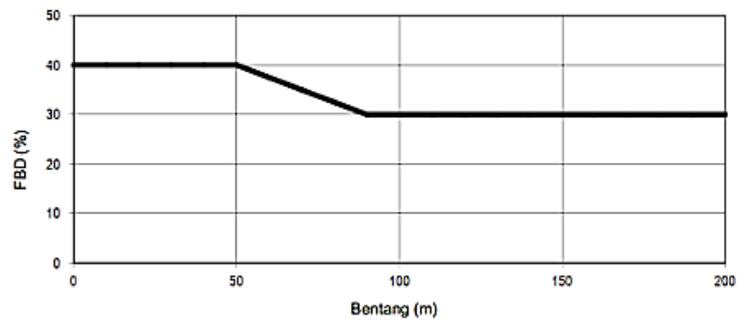
$$(W_{MS3}) = W_{dp_end}$$

$$\text{Beban Mati Tambahan total } (W_{MA}) = \frac{W_{bar} + W_k + W_a}{n_g}$$

2. Beban Hidup

$$\text{Beban Terbagi Rata } (q_{BTR}) = 9 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Beban BTR yang bekerja } (W_{BTR}) = q_{BTR} \times S_g$$

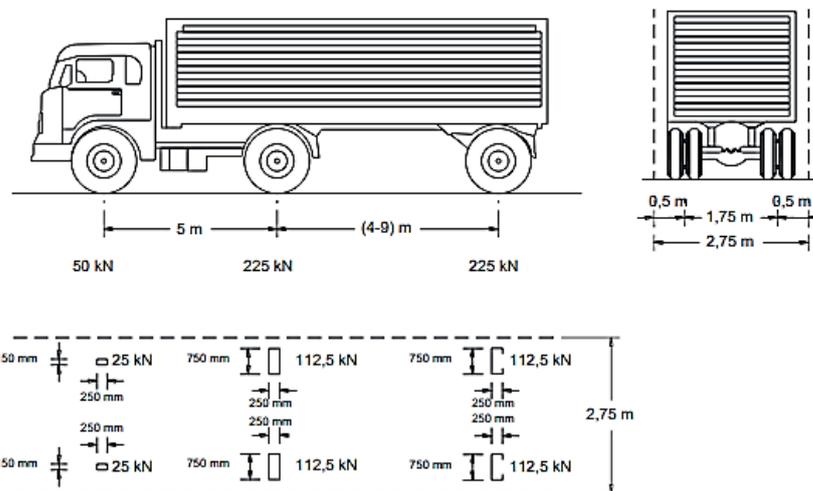


Gambar 3. 8 Grafik Faktor Berat Dinamis (SNI, 2016).

$$\text{Faktor Beban Dinamis (FBD)} = 0.4$$

$$\text{Beban Garis Terpusat (BGT)} = 49 \text{ kN/m (SNI 1725:2016)}$$

$$\text{Beban BGT yang bekerja (P}_{\text{BGT}}) = (1 + \text{FBD}) \times \text{BGT} \times S_g$$



Gambar 3. 9 Nilai Beban Truk (SNI, 2016).

$$\text{Faktor Beban Dinamis Truk (FBD}_{\text{T}}) = 0.3$$

$$\text{Beban 1 Roda Depan (P}_1) = 25 \text{ kN}$$

$$\text{Beban Roda Depan Truk (P}_{\text{T1}}) = (1 + \text{FBD}) \times P_1$$

$$\text{Beban 1 Roda Belakang (P}_2) = 112.5 \text{ kN}$$

$$\text{Beban Roda Belakang Truk (P}_{\text{T2}}) = (1 + \text{FBD}) \times P_2$$

$$\text{Total Beban Truk (ToT)} = P_{\text{T1}} + P_{\text{T2}}$$

$$\text{Beban Pejalan Kaki (W}_{\text{TP}}) = 5 \text{ kN/m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Beban Pejalan Kaki yang bekerja (TP)} &= W_{TP} \times b_{tr} \times n_{tr} \\ \text{Beban Pejalan Kaki tiap Gelagar (W}_p) &= \frac{TP}{ng} \\ \text{Total Beban Pejalan Kaki (ToP)} &= W_p \times Lb \times n_{tr} \\ \text{Total Beban Hidup (TBH)} &= ToT + ToP + P_{BGT} \end{aligned}$$

3. Perencanaan Plat Lantai Jembatan

Gaya Beban dan Momen

$$\begin{aligned} \text{Total Beban Plat Lantai } (\Sigma W_{DL}) &= W_{slab} + W_{asphalt} + W_{water} \\ \text{Total Beban Tambahan } (\Sigma W_{DL_add}) &= W_{asphalt} + W_{water} + W_{bar} \\ \text{Momen Tumpuan = Lapangan } (M_{lap}) &= \left(\frac{1}{10}\right) \times \Sigma W_{DL} \times Sg^2 \\ \text{Momen Lebar Strip Ekuivalen } (M_{MS}) &= \left(\frac{1}{8}\right) \times W_{slab} \\ \text{Momen Lebar Strip Ekuivalen } (M_{MA}) &= \left(\frac{1}{8}\right) \times \Sigma W_{DL_add} \\ \text{Momen Rencana Lebar Strip Eku. } (M_{LL}) &= \frac{M_T}{2} \\ \text{Momen Ultimit Plat Lantai } (M_{UDL}) &= (1.3 \times M_{MS}) + (2 \times M_{MA}) + (1.8 \times M_{LL}) \end{aligned}$$

Tulangan Plat Lantai

$$\begin{aligned} \text{Luas Tulangan Minimum } (A_{S_{req}}) &= \frac{M_{UDL}}{\phi f \times fy \times (0.85 \times de)} \\ \text{Luas Tulangan dibutuhkan } (A_{S_{use}}) &= \left(\frac{b}{ss}\right) \times \left(\frac{1}{4}\right) \times 3.14 \times Ds^2 \\ \text{Momen Nominal Plat Lantai } (M_n) &= A_{S_{use}} \times fy \times \left(de - \frac{a}{2}\right) \\ \text{Momen Tahanan Plat Lantai } (M_r) &= \phi f \times M_n \\ \text{Momen Retak Penampang } (M_{cr}) &= fr \times Y_1 \times Y_3 \times \left(\frac{I_g}{yt}\right) \\ \text{Luas Tulangan digunakan } (A_{S_{usedP}}) &= \left(\frac{b}{ssp}\right) \times \left(\frac{1}{4}\right) \times 3.14 \times Ds^2 \end{aligned}$$

Geser Plat Lantai

$$\text{Gaya Geser Terfaktor (Vu)} = LF \times (1 + FBD_T) \times P_{T1}$$

$$\text{Kuat Geser Nominal (Vn)} = (0.17 + \frac{0.33}{\beta_c}) \times \sqrt{f'_c \times MPa} \times U \times de_e$$

$$\text{Syarat Geser Nominal (Sv}_n) = 0.33 \times \sqrt{f'_c \times MPa} \times U \times de_e$$

Maka, $V_n < S_{V_n}$

4. Perencanaan Gelagar Jembatan

Gaya Beban dan Momen

$$\text{Momen Gelagar (M}_{MSG}) = \frac{Wg \times Lg^2}{8}$$

$$\text{Momen Diafragma (M}_{MSD}) = \frac{W_{MS2} \times Lg^2}{8}$$

$$\text{Momen RC Plat (M}_{MSRCP}) = \frac{Wrcp \times Lg^2}{8}$$

$$\text{Momen } \textit{Barrier} \text{ (M}_{MAB}) = \frac{Wbar \times Lg^2}{8}$$

$$\text{Momen Aspal (M}_{MAA}) = \frac{Wa \times Lg^2}{8}$$

$$\text{Geser Gelagar (V}_{MSG}) = \frac{Wg \times Lg}{2}$$

$$\text{Geser Diafragma (V}_{MSD}) = \frac{W_{MS2} \times Lg}{2}$$

$$\text{Geser RC Plat (V}_{MSRCP}) = \frac{Wrcp \times Lg}{2}$$

$$\text{Geser } \textit{Barrier} \text{ (V}_{MAB}) = \frac{Wbar \times Lg}{2}$$

$$\text{Geser Aspal (V}_{MAA}) = \frac{Wa \times Lg}{2}$$

Tendon

$$\text{Tegangan Tarik Serat Bawah (fb}_{serv}) = M_{MS_SB} + M_{MA_SB}$$

$$\text{Tegangan Izin Beban Servis (f}_{tserv}) = 0.5 \times \sqrt{fcg \times MPa}$$

$$\begin{aligned}
\text{Tegangan Pratekan Bawah } (f_{pb}) &= f_{b_{serv}} - f_{t_{serv}} \\
\text{Gaya Tegang Efektif Bentang } (P_e) &= \frac{f_{pb} \times S_{b_{nc}} \times A_g}{S_{b_{nc}} + e_c \times A_g} \\
\text{Gaya Tegang Akhir } Strand \text{ } (P_{e_s}) &= A_{strand} \times f_{pbt} \times (1 - losses) \\
\text{Jumlah } Strand \text{ dibutuhkan } (n_{strand}) &= \frac{P_e}{P_{e_s}} \\
\text{Eksentrisitas Rata-rata Tengah } (E_{c_{mid}}) &= \frac{A_{ps1} \times E_{c1} + A_{ps2} \times E_{c2} + A_{ps3} \times E_{c3} + A_{ps4} \times E_{c4}}{A_{p_{stot}}} \\
\text{Eksentrisitas Rata-rata Tengah } (E_{c_{end}}) &= \frac{A_{ps1} \times E_{pe1} + A_{ps2} \times E_{pe2} + A_{ps3} \times E_{pe3} + A_{ps4} \times E_{pe4}}{A_{p_{stot}}} \\
\text{Jarak Pusat Pen. Tendon ke Bawah } (y_{mid}) &= \frac{A_{ps1} \times c1 + A_{ps2} \times c2 + A_{ps3} \times c3 + A_{ps4} \times c4}{A_{p_{stot}}} \\
\text{Jarak Pusat Pen. Tendon ke Bawah } (y_{end}) &= \frac{A_{ps1} \times ce1 + A_{ps2} \times ce2 + A_{ps3} \times ce3 + A_{ps4} \times ce4}{A_{p_{stot}}} \\
\text{Kehilangan Prategang saat Transfer} & \\
\text{Rasio Mod. Elastisitas Baja-Beton } (n_i) &= E_{ps} / E_{cig} \\
\text{Jarak Sb. Netral ke Serat Bawah } (y_{bti}) &= Y_{cg} \\
\text{Jarak Sb. Netral ke Serat Atas } (y_{tti}) &= h_g - y_{bti} \\
\text{Momen Inersia Pen. Gelagar Trans. } (I_{ti}) &= \Sigma I_0 + \Sigma A(y_i - y_{cg})^2 \\
\text{Modulus Elastisitas Pen. Bawah } (S_{bti}) &= \frac{I_{ti}}{y_{bti}} \\
\text{Modulus Elastisitas Pen. Atas } (S_{tti}) &= \frac{I_{ti}}{y_{tti}} \\
\text{Modulus Elastisitas Atas Eksentris } (e_{ti}) &= y_{bti} - y_{mid} \\
\text{Kehilangan Prategang saat Final} & \\
\text{Rasio Mod. Elastisitas Baja-Beton } (n_f) &= E_{ps} / E_{cg} \\
\text{Jarak Sb. Netral ke Serat Bawah } (y_{btf}) &= Y_{cg}
\end{aligned}$$

$$\text{Jarak Sb. Netral ke Serat Atas } (y_{tf}) = h_g - y_{btf}$$

$$\text{Momen Inersia Pen. Gelagar Trans. } (I_{tf}) = \Sigma I_0 + \Sigma A(y_i - y_{cg})^2$$

$$\text{Modulus Elastisitas Pen. Bawah } (S_{btf}) = \frac{I_{tf}}{y_{btf}}$$

$$\text{Modulus Elastisitas Pen. Atas } (S_{ttf}) = \frac{I_{tf}}{y_{ttf}}$$

$$\text{Modulus Elastisitas Atas Eksentris } (e_{tf}) = y_{btf} - y_{mid}$$

Kehilangan Prategang Komposit Transformasi

$$\text{Rasio Mod. Elastisitas Baja-Beton } (n_c) = E_{cg}/E_{cd}$$

$$\text{Jarak Sb. Netral ke Serat Bawah } (y_{bct}) = Y_{cg}$$

$$\text{Jarak Sb. Netral ke Serat Atas } (y_{tct}) = h_g - y_{bct}$$

$$\text{Momen Inersia Pen. Gelagar Trans. } (I_{ct}) = \Sigma I_0 + \Sigma A(y_i - y_{cg})^2$$

$$\text{Modulus Elastisitas Pen. Bawah } (S_{bct}) = \frac{I_{ct}}{y_{bct}}$$

$$\text{Modulus Elastisitas Pen. Atas } (S_{tct}) = \frac{I_{ct}}{y_{tct}}$$

$$\text{Modulus Elastisitas Atas Eksentris } (e_{tc}) = y_{bct} - y_{mid}$$

$$\text{Kehilangan Prategang akibat Gesekan } (\Delta f_{pf}) = f_{pj} \times [1 - e^{-(Kx + \mu\alpha)}]$$

Kehilangan Prategang akibat *Anchorage Set*

$$\text{Panjang Gelagar akibat Geser Angkur } (L_{PA}) = \sqrt{\frac{ES \times \Delta L \times L_{pf}}{\Delta F_{pf}}}$$

$$\text{Tegangan akibat Geser Angkur } (\Delta f) = \frac{2 \times \Delta F_{pf} \times L_{PA}}{L_{pf}}$$

$$\text{Kehilangan Prategang akibat Geser Angkur } (\Delta F_{PA}) = \Delta f \times \left(1 - \frac{L_g}{L_{PA}}\right)$$

Kehilangan Prategang akibat Perpendekan Elastis

$$\text{Gaya Prategang Awal (P}_i) = F_{pi} \times A_{pstot}$$

$$\text{Tegangan Beton pada Level Baja (F}_{cgp}) = \frac{P_i}{Ag} + \frac{P_i \times E_c}{I_{gnc}} - \frac{M_{MSG} \times E_c}{I_{gnc}}$$

$$\text{Kehilangan Prategang Perpendekan Elastis (\Delta f}_{pES}) = \frac{Nps-1}{2 \times Nps} \times \frac{Eps}{Eci_g} \times F_{cgp}$$

Kehilangan Prategang akibat Susut

$$\text{Regangan Susut Gelagar Awal (\epsilon}_{bid}) = k_s \times k_{hs} \times k_f \times k_{tdai} \times 0.48 \times 10^{-3}$$

$$\text{Koefisien Rangkak Gelagar Final (\Psi}_{tfi}) = 1.9 \times k_s \times k_{hc} \times k_f \times k_{tdfi} \times ti^{-0.118}$$

$$\text{Koefisien Penampang Transform (k}_{id}) = \frac{1}{1 + \frac{Eps}{Eci_g} \times \frac{A_{pstot}}{A_{gnc}} \times \left(1 + \frac{Ag \times Ec^2}{I_{gnc}}\right) \times (1 + 0.7 \times \Psi_{tfi})}$$

$$\text{Kehilangan Prategang akibat Susut (\Delta f}_{pSR}) = \epsilon_{bid} \times Eps \times k_{id}$$

Kehilangan Prategang akibat Rangkak

$$\text{Tegangan Beton pada Level Tendon (f}_{cspi}) = \left| \frac{-P_i}{Ag_{ti}} - \frac{P_i \times E_{ti}}{I_{ti}} + \frac{M_{MSG} \times E_{ti}}{I_{ti}} \right|$$

$$\text{Koef. Rangkak Gelagar Transfer (\Psi}_{tdti}) = 1.9 \times k_s \times k_{hc} \times k_f \times k_{tdai} \times ti^{-0.118}$$

$$\text{Kehilangan Prategang akibat Rangkak (\Delta f}_{pCR}) = \frac{Eps}{Eci_g} \times f_{cspi} \times \Psi_{tdti} \times k_{id}$$

Kehilangan Prategang Final akibat Susut

$$\text{Regangan Susut Gelagar Trans. (\epsilon}_{bif}) = k_s \times k_{hs} \times k_f \times k_{tdfd} \times 0.48 \times 10^{-3}$$

$$\text{Regangan Susut Gelagar Final (\epsilon}_{bdf}) = \epsilon_{bif} - \epsilon_{bid}$$

$$\text{Koefisien Rangkak Transform. (k}_{df}) = \frac{1}{1 + \frac{Eps}{Eci_g} \times \frac{A_{pstot}}{A_{gnc}} \times \left(1 + \frac{Ag \times Ec^2}{I_{cg}}\right) \times (1 + 0.7 \times \Psi_{tfi})}$$

$$\text{Kehilangan Prategang Final akibat Susut (\Delta f}_{pSD}) = \epsilon_{bdf} \times Eps \times k_{df}$$

Kehilangan Prategang Final akibat Rangkak

$$\text{Koef. Rangkak Gelagar Final (\Psi}_{tfd}) = 1.9 \times k_s \times k_{hc} \times k_f \times k_{tdfd} \times ti^{-0.118}$$

$$\text{Kehilangan Prategang Final Rangkak } (\Delta f_{pCD}) = \frac{Eps}{Eci_g} \times f_{cgpi} \times (\Delta\psi) \times k_{df} +$$

$$\left(\frac{Eps}{Ecg} \times \Delta f_{cd} \times \psi_{tftd} \times k_{df} \right)$$

Tambahan Prategang akibat Susut Plat

$$\text{Regangan Susut Plat Final } (\epsilon_{ddf}) = k_{sd} \times k_{hsd} \times k_{fd} \times k_{tdaf} \times 0.48 \times 10^{-3}$$

$$\text{Koef. Rangkak Plat Final } (\Psi_{tftdd}) = 1.9 \times k_{sd} \times k_{hc} \times k_{fd} \times k_{tdaf} \times ti^{-0.118}$$

$$\text{Rangkak Plat } (\Delta f_{cfd}) = \frac{\epsilon_{daf} \times A_{da} \times E_{cd}}{1 + 0.7 \times \psi_{tftdd}} \times \left(\frac{1}{A_{cg}} - \frac{ecg \times ed}{I_{cg}} \right)$$

$$\text{Gaya Prategang Tambahan } (\Delta f_{pSS}) = \left\| \frac{Eps}{Ecg} \times \Delta f_{cfd} \times k_{df} \times (1 + 0.7 \times \psi_{tftdd}) \right\|$$

Total Kehilangan Prategang

$$\text{Kehilangan Seketika} = \Delta f_{pa} + \Delta f_{pf} + \Delta f_{pES}$$

$$\text{Kehilangan Berdasarkan Waktu } (\Delta f_{pLT}) = \Delta f_{pSR} + \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pR1} + \Delta f_{pSD} +$$

$$\Delta f_{pR1} + \Delta f_{pCD} + \Delta f_{pSS}$$

$$\text{Total } (\Delta f_{pT}) = \Delta f_{pa} + \Delta f_{pf} + \Delta f_{pES} + \Delta f_{pLT}$$

Gaya Prategang Efektif Final

$$\text{Prategang Final Efektif } (f_{peMax}) = 0.8 \times f_{py}$$

$$\text{Tegangan Prategang Efektif Aktual } (f_{pe}) = 0.75 \times f_{pu} - \Delta f_{pT}$$

$$\text{Cek } (f_{pe}) \leq (f_{peMax})$$

$$\text{Maka, Gaya Prategang Efektif } (P_{ef}) = A_{pstot} \times f_{pe}$$

Pemeriksaan Tegangan

$$\text{Tegangan Serat Atas Transfer } (ft_i) = \frac{-P_{trans}}{Ag_{nc}} + \frac{P_{trans} \times E_c}{St_{nc}} + \frac{-M_{MSG}}{St_{nc}}$$

$$\text{Tegangan Serat Bawah Transfer } (fb_i) = \frac{-P_{trans}}{Ag_{nc}} + \frac{-P_{trans} \times E_c}{Sb_{nc}} + \frac{-M_{MSG}}{Sb_{nc}}$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan Serat Atas Konstruksi (ft}_c) &= \frac{-P_{trans}}{Ag_{nc}} + \frac{-P_{trans} \times E_c}{St_{nc}} + \\ &\frac{(-M_{MSS}) + (-M_{MSG}) + (-M_{MSD}) + (-M_{MSRCP})}{St_{nc}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan Serat Bawah Konstruksi (fb}_c) &= \frac{-P_{trans}}{Ag_{nc}} + \frac{-P_{trans} \times E_c}{Sb_{nc}} + \\ &\frac{(-M_{MSS}) + (-M_{MSG}) + (-M_{MSD}) + (-M_{MSRCP})}{Sb_{nc}} \end{aligned}$$

$$\text{Tegangan Serat Atas Layan (ft}_s) = ft_{sPS1} + ft_{sL1}$$

$$\text{Tegangan Serat Bawah Layan (fb}_s) = ft_{sPS2} + ft_{sL2}$$

$$\text{Tegangan Serat Bawah Plat Layan (ft}_{ss}) = \frac{(-M_{MAB} - M_{MAA}) - M_{LL}}{S_{tcd} \times n_t}$$

$$\text{Tegangan Serat Atas Plat Layan (fb}_{ss}) = \frac{(-M_{MAB} - M_{MAA}) - M_{LL}}{S_{bcd} \times n_t}$$

Kapasitas Lentur

$$\text{Kapasitas Lentur Nom. Penampang (M}_n) = A_{ps} \times f_{ps} \times (dp - \frac{a}{2})$$

$$\text{Momen Tahanan Nom. Penampang (M}_r) = \phi f \times M_n$$

$$\begin{aligned} \text{Momen Ultimit Nom. Penampang (M}_u) &= 1.2(M_{MSG} + M_{MSD}) + \\ &1.3(M_{MSS} + M_{MSRCP}) + 1.4(M_{MAB} + M_{MAA}) + 1.8(M_{LL}) \end{aligned}$$

Pemeriksaan Tulangan Minimum

$$\text{Tegangan Tekan Beton akibat Prategang Efektif (f}_{cpe}) = \frac{P_e}{Ag_{nc}} + \frac{P_e \times E_c}{Sb_{nc}}$$

$$\text{Momen Kristis Nom. Penampang (M}_{cr}) = y_3 \times (y_1 \times f_r + y_2 \times f_{cpe}) \times S_{bcg} - M_{dnc}$$

Kapasitas Geser Penampang

$$\text{Gaya Prategang pada Ketahanan Geser (V}_p) = P_{ef} \times \frac{(y_{end} - y_{mid})}{r}$$

$$\text{Kuat Geser Beton (V}_c) = 0.083 \times \beta \times \sqrt{f_{cg}} \times MPa \times bv \times dv$$

$$\text{Kuat Geser Tulangan (V}_s) = \frac{Av \times f_{yv} \times Dv \times \cot(\theta)}{Sv}$$

$$\text{Kuat Geser Nominal (V}_{n1}) = V_c + V_s + V_p$$

$$\text{Kuat Geser Nominal (V}_{n2}) = 0.25 \times f_{cg} \times bv \times Dv + V_p$$

5. Perencanaan Kepala Pilar

Tulangan Atas Kepala Pilar

$$\text{Luas Tulangan diperlukan (A}_{sreqP}) = \frac{M_u}{\phi f \times f_{yp} \times 0.85 \times de_p}$$

$$\text{Luas Tulangan Minimum (A}_{smin1}) = \frac{\sqrt{f_c \times MPa}}{4 \times f_{yp}} \times b_b \times de_p$$

$$\text{Luas Tulangan Minimum (A}_{smin2}) = \frac{1.4}{\frac{f_y}{MPa}} \times b_b \times de_p$$

$$\text{Luas Tulangan dibutuhkan (A}_{snP}) = \frac{4}{3} \times A_{sreqP}$$

$$\text{Luas Tulangan digunakan (A}_{susedP}) = A_{stulP} \times n_{tulP}$$

Kapasitas Lentur Kepala Pilar

$$\text{Momen Nominal Penampang (M}_{nP}) = A_{susedP} \times f_y \times (de_p - \frac{a_p}{2})$$

$$\text{Kapasitas Momen Nominal (M}_{nC}) = \phi f \times M_{nP}$$

$$\text{Momen Kritis/Retak (M}_{crP}) = Y_3 \times Y_1 \times f_r \times \frac{I_{gp}}{y_t}$$

Tulangan Bawah Kepala Pilar

$$\text{Luas Tulangan diperlukan (A}_{sreqPb}) = \frac{M_u}{\phi f \times f_{yp} \times 0.85 \times de_p}$$

$$\text{Luas Tulangan Minimum (A}_{smin1b}) = \frac{\sqrt{f_c \times MPa}}{4 \times f_{yp}} \times b_t \times de_p$$

$$\text{Luas Tulangan Minimum (A}_{smin2b}) = \frac{1.4}{\frac{f_y}{MPa}} \times b_t \times de_p$$

$$\text{Luas Tulangan dibutuhkan (A}_{snPb}) = \frac{4}{3} \times A_{sreqPb}$$

$$\text{Luas Tulangan digunakan (A}_{susedPb}) = A_{stulPb} \times n_{tulPb}$$

Kapasitas Lentur Balok Kepala Pilar

$$\text{Momen Nominal Penampang } (M_{nPb}) = A_{susedPb} \times fy \times (de_p - \frac{a_{pb}}{2})$$

$$\text{Kapasitas Momen Nominal } (M_{nCb}) = \phi f \times M_{nPb}$$

$$\text{Momen Kritis/Retak } (M_{crPb}) = Y_3 \times Y_1 \times fr_p \times \frac{I_{gp}}{yt_p}$$

Tulangan Geser Kepala Pilar

$$\text{Kuat Geser Beton } (V_{cP}) = \frac{1}{6} \times \sqrt{fc \times MPa} \times b_t \times de_p$$

$$\text{Kuat Geser Tulangan Geser } (V_{sP}) = \frac{Vu}{\phi v} - V_{cP}$$

$$\text{Luas Tulangan Geser Minimum } (A_{vminS}) = 0.083 \times \sqrt{fc \times \frac{b_b}{fy}}$$

Korbel Terhadap Geser

$$\text{Geser Friksi Ultimit } (V_{nkor}) = \frac{V_{ukor}}{\phi v}$$

$$\text{Tulangan Geser Friksi } (A_{vfkor}) = \frac{0.05 \times A_{cvk}}{fy}$$

$$\text{Gaya Dalam Korbel } (N_{uKkor}) = 0.2 \times V_{ukor}$$

$$\text{Momen Ultimit Korbel } (M_{ukor}) = V_{ukor} + N_{uKkor} \times 50mm$$

$$\text{Gaya Tarik Langsung } (A_n) = \frac{N_{uKkor}}{\phi c \times fy}$$

$$\text{Geser Nominal Interior } (V_{ni}) = 0.125 \times 1 \times \sqrt{fc \times MPa} \times b_{o1} \times de_k$$

$$\text{Geser Nominal Eksterior } (V_{ne}) = 0.125 \times 1 \times \sqrt{fc \times MPa} \times b_{o2} \times de_k$$

Tulangan *Hanger*

$$\text{Luas Tulangan tiap Jarak } (A_{hr1}) = \frac{V_{nkor} - 0.063 \times \sqrt{fc \times MPa} \times 6500mm \times de_k}{fy \times (W_{pad} + 2 \times de_k)}$$

$$\text{Luas Tulangan tiap Jarak } (A_{hr2}) = \frac{V_{nkor}}{fy \times 6500mm}$$

$$\text{Luas Tulangan yang digunakan (A}_{shr}) = \min (A_{hr1}, A_{hr2})$$

Desain Kuat Tumpuan

$$\text{Tahanan Bearing Nominal (P}_n) = 0.85 \times f_c \times A_{bp1}$$

$$\text{Tahanan Aksial Terfaktor (P}_r) = \phi_c \times P_n$$

6. Perencanaan Pilar Tunggal

Indeks Stabilitas Struktur

$$\text{Arah Longitudinal (Q}_{long}) = \frac{P_{u1} \times \Delta o_1}{V_{u1} \times H_{pt}}$$

$$\text{Arah Transversal (Q}_{trans}) = \frac{P_{u2} \times \Delta o_2}{V_{u2} \times H_{pt}}$$

Periksaan Kelangsingan dan Pembesaran Momen

$$\text{Arah Longitudinal} = \frac{ky \times H_{pt}}{r_{gpt}} \leq 34 - \left(12 \times \frac{M1_{long}}{M2_{long}}\right)$$

$$\text{Arah Transversal} = \frac{kx \times H_{pt}}{r_{gpt}} \leq 34 - \left(12 \times \frac{M1_{trans}}{M2_{trans}}\right)$$

$$\text{Rasio Aksial} = \frac{0.4 \times E_c \times I_{pt}}{1 + \beta d}$$

$$\text{Beban Tekuk Euler (P}_e) = \frac{\pi^2 \times E I}{(ky \times H_{pt})^2}$$

Tulangan Lentur Kaki Pilar

$$\text{Luas Tulangan (A}_{gp}) = \pi \times r_{pt}^2$$

$$\text{Beban Terpusat (P}_{nmax}) = 0.8 \times (0.85 \times f_c \times (A_{gp} - A_{s_t}) + f_{y_p} \times A_{s_t})$$

$$\text{Lentur Murni (M}_{No}) = A_{s_t} \times f_y \times \left(d - \frac{a_m}{2}\right)$$

$$\text{Compression Control (C}_c) = 0.85 \times f_c \times D \times a_m' \times 10^{-3}$$

$$\text{Tension Control (T}_c) = 0.85 \times f_c \times D \times a_m'' \times 10^{-3}$$

Tulangan Geser Kaki Pilar

$$\text{Momen Plastis Longitudinal } (M_{pLong}) = M_{nLong} \times f_s$$

$$\text{Kapasitas Geser Longitudinal } (V_{kapLong}) = \frac{M_{pLong}}{H_{pt}}$$

$$\text{Momen Plastis Transversal } (M_{pTrans}) = M_{nTrans} \times f_s$$

$$\text{Kapasitas Geser Transversal } (V_{kapTans}) = \frac{M_{pTrans}}{H_{pt}}$$

$$\text{Confinement } (hc_{Long}) = H_{pt} - 2 \times dc$$

$$\text{Confinement } (hc_{Trans}) = r_{pt} - 2 \times dc$$

$$\text{Luas Inti Pilar } (Ac) = hc_{Long} \times hc_{Trans}$$

$$\text{Luas Penampang Longitudinal } (Ash_{Long}) = 0.12 \times s_s \times hc_{Long} \times \frac{f_c}{f_y}$$

$$\text{Luas Penampang Transversal } (Ash_{Long}) = 0.12 \times s_s \times hc_{Trans} \times \frac{f_c}{f_y}$$

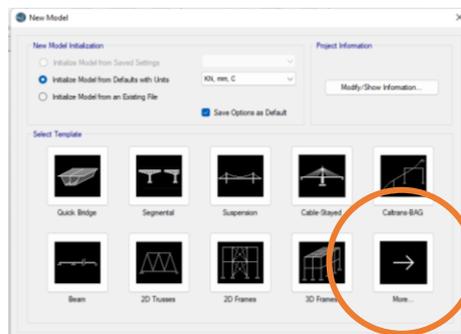
$$\text{Luas Tulangan Geser } (AV_{Long}) = Ash_{Long}$$

$$\text{Luas Tulangan Geser } (AV_{Trans}) = Ash_{Trans}$$

3.7.2. Proses Pemodelan Jembatan (CSi Bridge version 21)

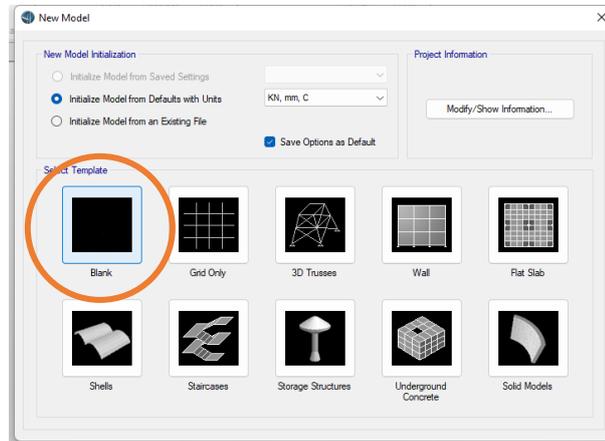
1. New Model

Menggunakan menu *File* dan memilih fitur *New* untuk membuat model baru. Memastikan menggunakan satuan yang konsisten pada saat pemodelan. Memilih *template* jembatan yang tersedia.



Gambar 3.10 Fitur *New Model*.

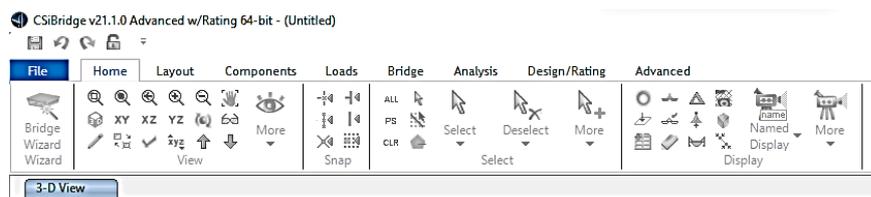
Memilih *More* untuk melanjutkan pada menu *template* jembatan selanjutnya. Kemudian memilih *template* kosong (*blank*). Memilih *blank* untuk menampilkan halaman kosong sehingga dapat membuat model jembatan sesuai dengan data yang diperoleh.



Gambar 3.11 Fitur *blank template*.

2. *Toolbar - Home*

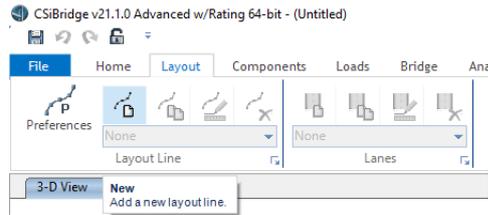
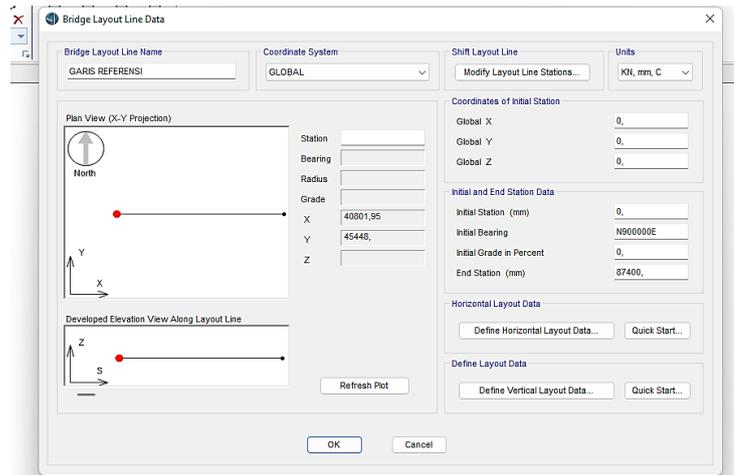
Mengenali dan menggunakan *toolbar* yang tersedia secara berurutan dalam proses pemodelan jembatan. *Toolbar* yang tersedia mulai dari *home*, *layout*, *component*, *loads*, *bridge*, *analysis*, dan seterusnya. Menggunakan *tool Home* dengan berbagai fitur seperti *zoom in*, *zoom out*, *pan* dan sebagainya. Menggunakan fitur-fitur tersebut untuk membantu navigasi saat membuat model jembatan.



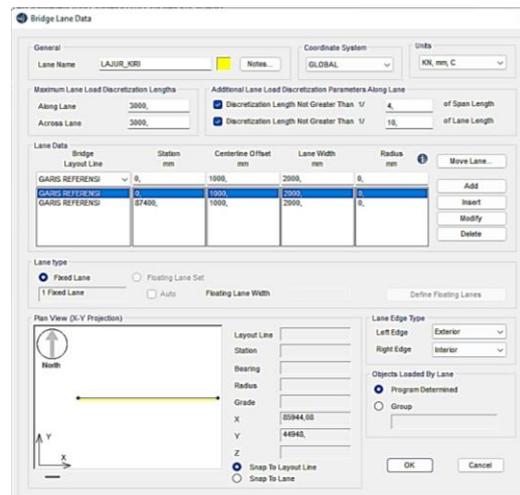
Gambar 3.12 Menu *tool Home*.

3. *Layout - Layout Line - Lanes*

Memilih *tool Layout* untuk memilih fitur *layout line* untuk membuat garis referensi model. Membuat garis referensi sebagai acuan posisi model jembatan pada tampilan *software CSi Bridge version 21*.

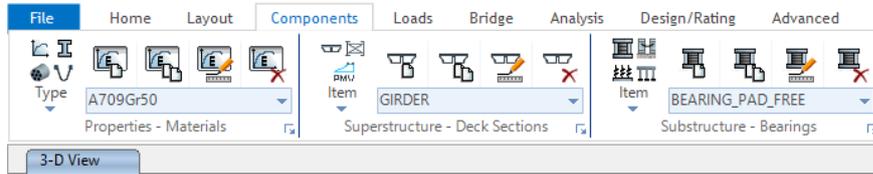
Gambar 3.13 Menu *tool Layout*.Gambar 3.14 Fitur *layout line*.

Menggunakan fitur *lanes* untuk membuat rencana jumlah beserta dimensi jalur dan lajur pada model jembatan. Membuat 2 jalur dengan masing-masing 1 lajur. Membuat masing-masing jalur dengan lebar 2 meter sesuai dengan pengukuran dimensi komponen jembatan di lapangan. Melakukan penyesuaian *lanes* yang telah dibuat pada definisi garis *lanes* untuk *exterior* dan *interior* mengacu model yang akan dibuat.

Gambar 3.15 Fitur *Lanes*.

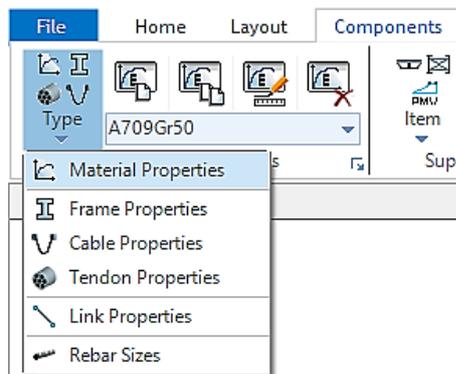
4. Component – Properties – Superstructure – Substructure

Memilih *tool Component* untuk menggunakan fitur *properties*, *superstructure*, dan *substructure*.



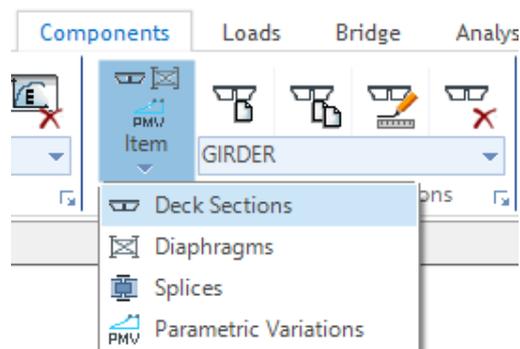
Gambar 3.16 Menu *tool Component*.

Menggunakan fitur *properties* untuk mendefinisikan properti dari material, penampang, dan sebagainya yang akan digunakan untuk membuat komponen jembatan.

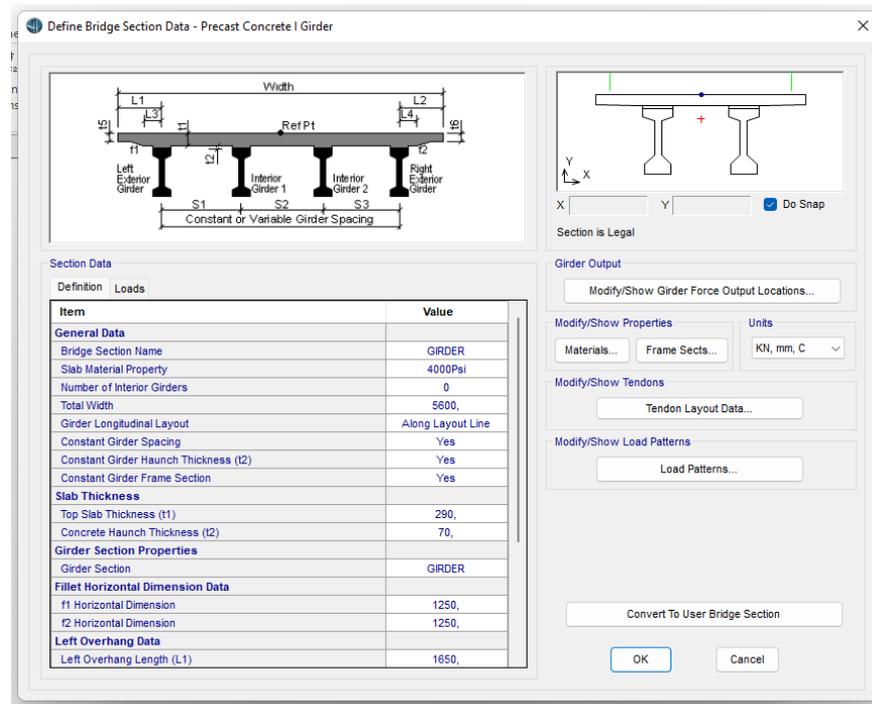


Gambar 3.17 Fitur *properties*.

Menggunakan fitur *superstructure* untuk mendefinisikan dimensi dan material yang digunakan pada komponen bangunan atas jembatan. Mendefinisikan dimensi dan material plat lantai beserta gelegar, dan diafragma jembatan. Menyesuaikan definisi dimensi dan mutu material berdasarkan data yang telah diperoleh.

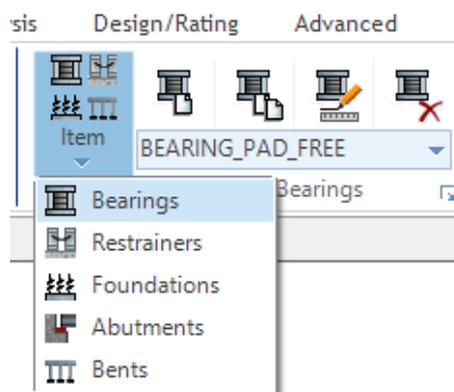


Gambar 3.18 Fitur *superstructure*.

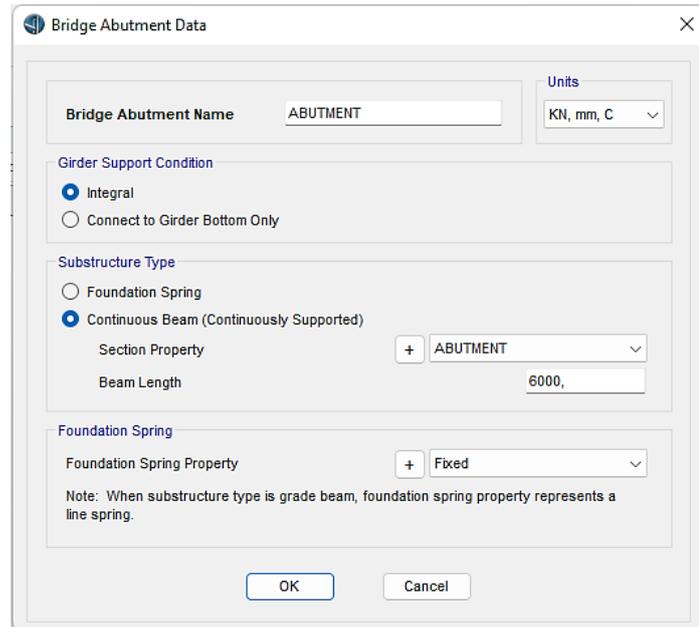


Gambar 3.19 Mendefinisikan sistem plat lantai dan gelagar I.

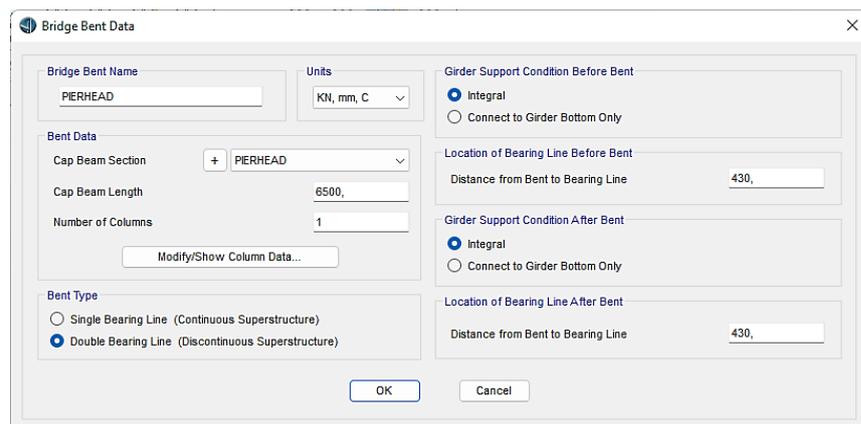
Menggunakan fitur *substructure* untuk mendefinisikan dimensi dan material yang digunakan pada komponen bangunan bawah jembatan. Mendefinisikan dimensi dan material abutmen, pilar beserta kepala pilar, dan *bearing* (tumpuan).



Gambar 3.20 Fitur *substructure*.



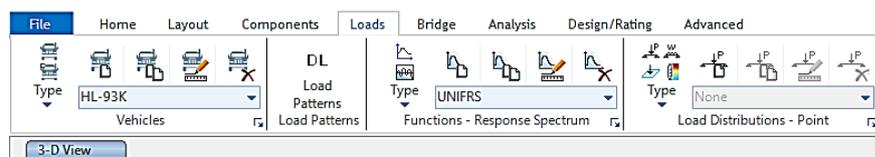
Gambar 3.21 Mendefinisikan dimensi dan material abutmen jembatan.



Gambar 3.22 Medefinisikan dimensi dan material pilar dan kepala pilar.

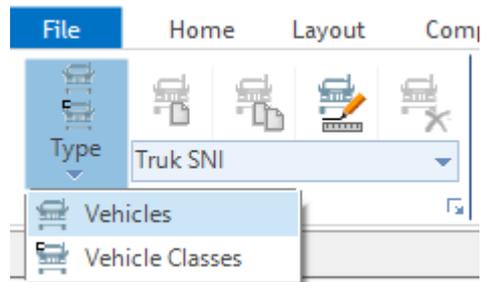
5. Loads – Vehicles – Load Patterns – Load Distributions

Menggunakan *tool Loads* untuk menggunakan fitur *vehicles*, *load patterns*, *load distributions*. Menggunakan fitur-fitur tersebut untuk mendefinisikan beban-beban yang akan bekerja pada model jembatan.

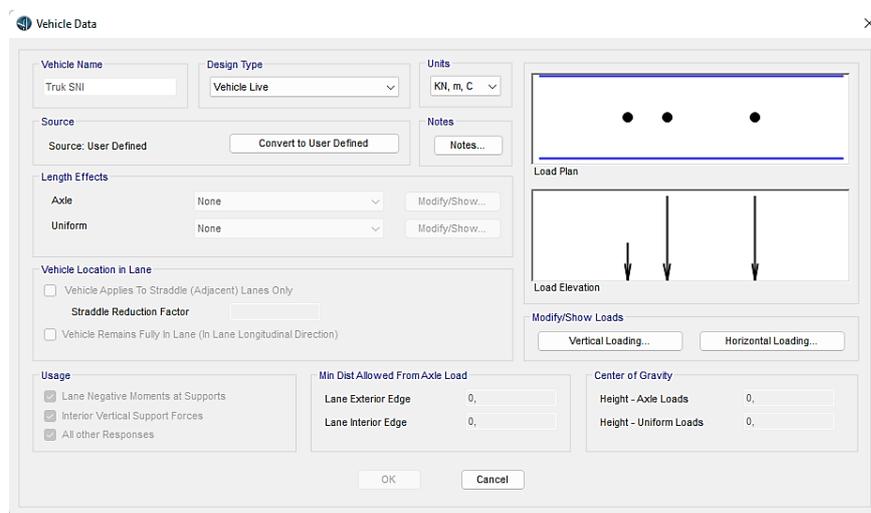


Gambar 3.23 Menu *tool Loads*.

Menggunakan fitur *vehicles* untuk mendefinisikan beban hidup kendaraan. Menyesuaikan beban hidup kendaraan pada ketentuan SNI 1725 : 2016.

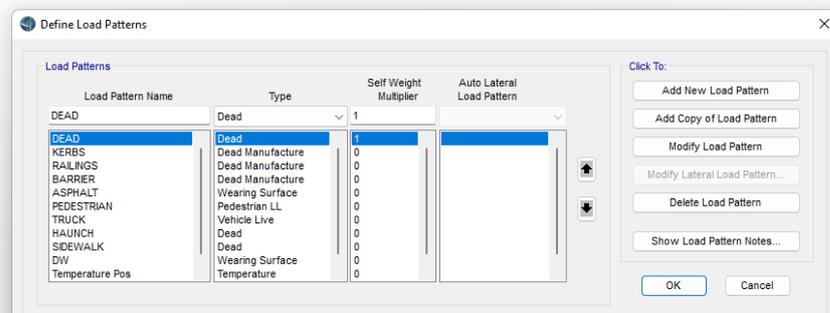


Gambar 3.24 Fitur *vehicles*.



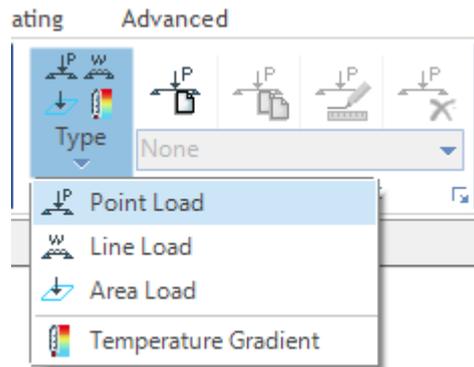
Gambar 3.25 Mendefinisikan beban truk berdasarkan SNI 1725:2016.

Menggunakan fitur *load patterns* untuk mendefinisikan beban-beban yang akan bekerja dan disimulasikan pada model jembatan. Menyesuaikan beban-beban dengan jumlah dan jenis komponen jembatan.



Gambar 3.26 Mendefinisikan beban-beban.

Mendefinisikan penyaluran beban-beban yang akan bekerja pada model jembatan. Mendefinisikan *point load* (beban terpusat), *line load* (beban segaris), dan *area load* (beban merata pada luasan tertentu).



Gambar 3.27 Mendefinisikan penyaluran beban.

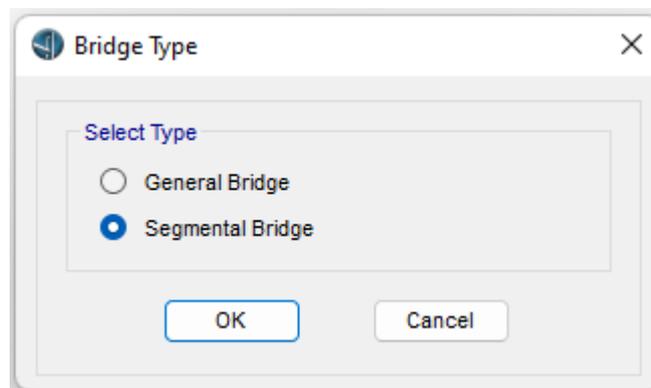
6. Bridge

Menggunakan *tool Bridge* untuk membuat 3D model jembatan menggunakan properti dan beban yang telah didefinisikan.



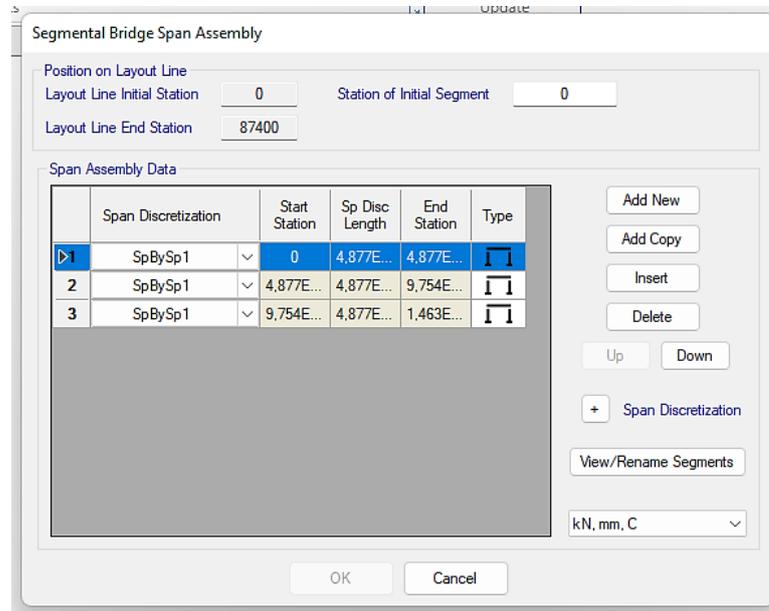
Gambar 3.28 Menu *tool Bridge*.

Membuat model *segmental* jembatan dengan 3 bentang *span* menyesuaikan dengan data pengukuran dan *design engineering drawing*.



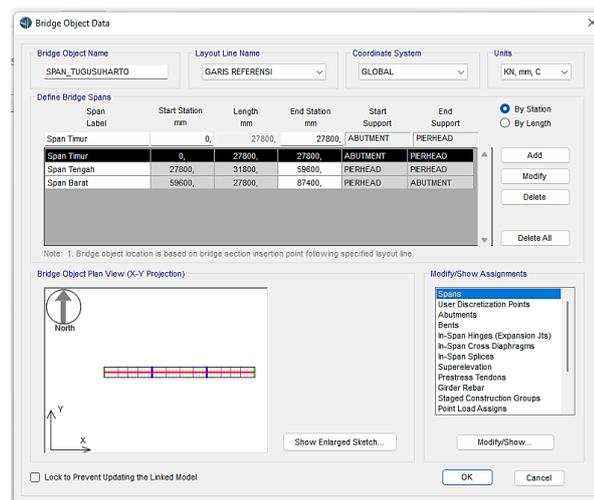
Gambar 3.29 Fitur *bridge type*.

Menyesuaikan posisi awal dan akhir jembatan berdasarkan panjang total jembatan. Menyesuaikan dimensi dan desain bentang *span* model jembatan dengan data yang telah diperoleh.



Gambar 3.30 Menyesuaikan desain bentang jembatan.

Menggunakan fitur *bridge object data* untuk menyesuaikan detail komponen-komponen jembatan disesuaikan data pengukuran dan *design engineering drawing* yang telah diperoleh.



Gambar 3.31 Fitur *bridge object data*.

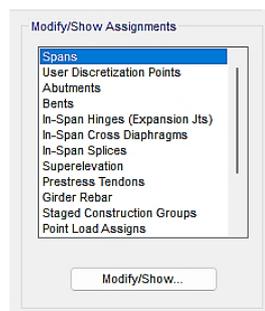
Mendefinisikan dan menyesuaikan ulang nama model, garis referensi yang digunakan, sistem kordinat tampilan dan konsistensi satuan. Mendefinisikan dan

menyesuaikan ulang *span* jembatan mulai dari panjang bentang hingga *support* tiap bentang.

Span Label	Start Station mm	Length mm	End Station mm	Start Support	End Support
Span Timur	0	27800	27800	ABUTMENT	PIERHEAD
Span Tengah	27800	31800	59600	PIERHEAD	PIERHEAD
Span Barat	59600	27800	87400	PIERHEAD	ABUTMENT

Gambar 3.32 Menyesuaikan dan mendefinisikan ulang *object data*.

Mendefinisikan detail komponen-komponen jembatan mulai dari komponen bentang, abutmen, pilar, diafragma dan lainnya. Menampilkan dan menyesuaikan detail komponen dan *assignment* beban yang akan bekerja pada model jembatan.



Gambar 3.33 Fitur *modify/show assignment*.

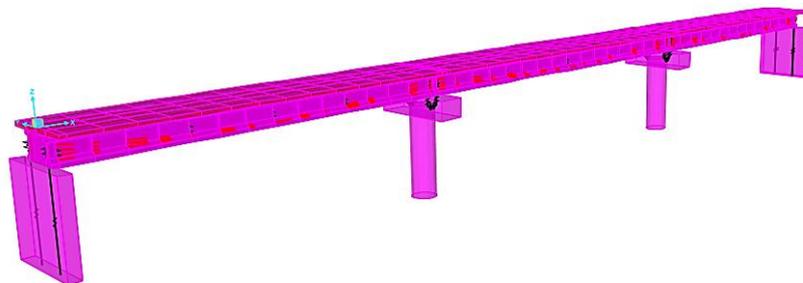
Gambar 3.34 Menyesuaikan abutmen model jembatan.

Gambar 3.35 Menyesuaikan *support bent* model jembatan.

Span	Diaphragm Property	Location	Bearing	Distance	Ref Line
Span Timur	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	400	Layout Line
Span Timur	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	8125	Layout Line
Span Timur	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	13900	Layout Line
Span Timur	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	19675	Layout Line
Span Timur	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	27400	Layout Line
Span Tengah	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	400	Layout Line
Span Tengah	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	8100	Layout Line
Span Tengah	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	15900	Layout Line
Span Tengah	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	23700	Layout Line
Span Tengah	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	31400	Layout Line
Span Barat	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	400	Layout Line
Span Barat	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	8125	Layout Line
Span Barat	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	13900	Layout Line
Span Barat	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	19675	Layout Line
Span Barat	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	27400	Layout Line

Gambar 3.36 Menyesuaikan lokasi diafragma model jembatan.

Menyelesaikan pembuatan model jembatan dengan memeriksa ulang model yang telah dibuat sesuai dengan data-data pendukung yang telah diperoleh.

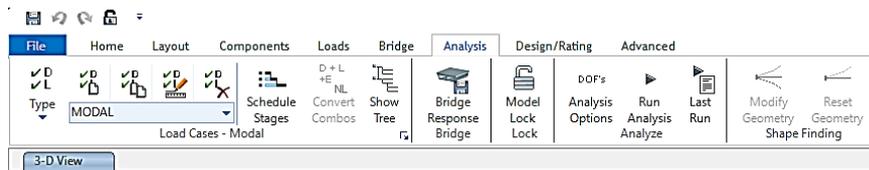


Gambar 3.37 3D *Finite Element Model* jembatan Tugu Suharto.

3.7.3. Proses Analisis *Modal* Model Jembatan (*CSI Bridge version 21*)

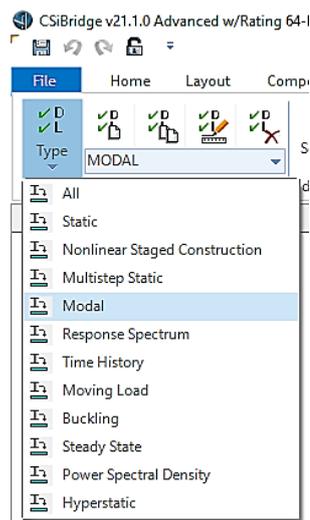
1. *Analysis*

Menggunakan *tool Analysis* dengan fitur-fitur seperti *load cases*, *analyze* dan *shape finding* untuk melakukan persiapan dan menjalankan *analysis* terhadap model jembatan Tugu Suharto yang telah dibuat.



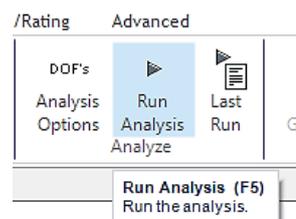
Gambar 3.38 Menu *tool Analysis*.

Menggunakan fitur *load cases* untuk mempersiapkan proses analisis *modal* pada model jembatan.



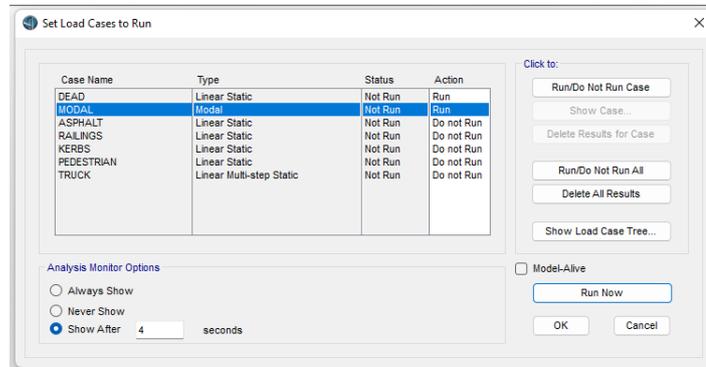
Gambar 3.39 Fitur *load cases*.

Menjalankan analisis *modal* pada model jembatan setelah selesai menyesuaikan *load cases*. Menggunakan fitur *analyze* untuk memulai atau menjalankan analisis pada model jembatan Tugu Suharto yang telah dibuat.



Gambar 3.40 Fitur *run analysis* untuk menjalankan analisis pada model jembatan.

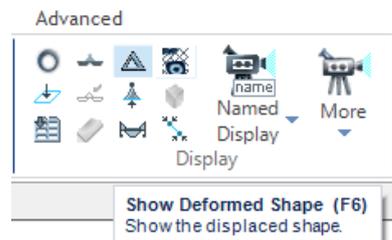
Memulai analisis setelah memilih *load cases* yang akan disimulasikan yaitu *dead* dan *modal*. Memilih fitur *run now* untuk menjalankan analisis *load case* oleh *software CSi Bridge version 21*.



Gambar 3.41 Fitur *load cases to run* untuk memulai analisis terhadap model jembatan

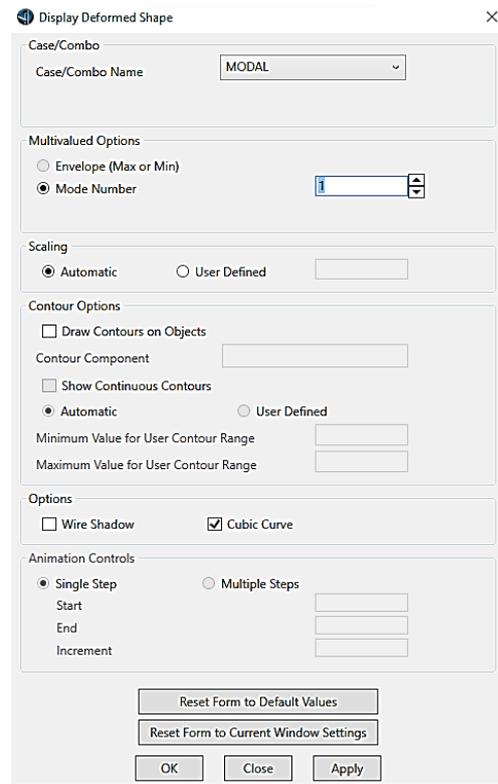
2. Output

Menggunakan *tool Home* pada fitur *display* untuk menampilkan hasil *output* analisis yang ingin ditinjau. Memilih fitur *show deformed shape* untuk menampilkan bentuk model yang telah terdeformasi akibat *load case*.

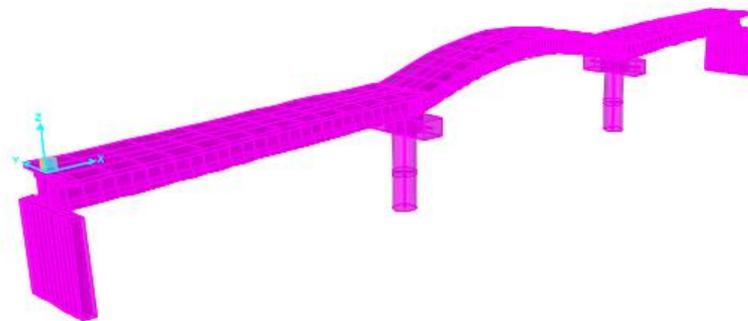


Gambar 3.42 Fitur *show deformed shape*.

Memilih *case/combo name* untuk menampilkan hasil deformasi akibat *load case* yang ingin ditinjau. Memilih *modal* pada *case/combo name* untuk menampilkan hasil analisis *modal* pada model jembatan. Memilih *mode number* untuk menampilkan bentuk deformasi yang kesekian sesuai dengan yang ingin ditinjau. Menyesuaikan tampilan hasil analisis sesuai dengan kebutuhan seperti *scaling*, *countour* pada objek, opsi tampilan dan pengaturan animasi deformasi.



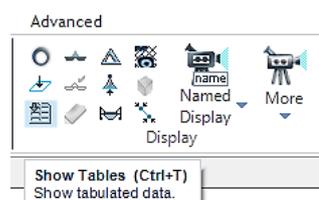
Gambar 3.43 Fitur *display deformed shape*.



Gambar 3.44 Tampilan *3D deformed shape*.

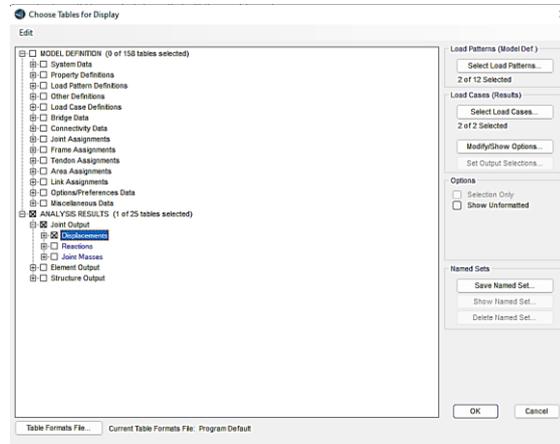
3. Data Tables

Menggunakan *tool Menu* pada fitur *show tables* untuk menampilkan data tabel hasil analisis *load cases* pada model jembatan yang ingin ditinjau.



Gambar 3.45 Fitur *show tables*.

Memilih tabel data yang ingin ditampilkan. Memilih data tabel *analysis result* pada *joint output* di bagian *displacement* untuk menampilkan *displacement* yang terjadi pada *joint-joint* model jembatan yang telah dibuat dan dianalisis *modal*.



Gambar 3.46 Fitur *choose tables for display*.

Joint Text	OutputCase	CaseType Text	StepType Text	StepNum Unitless	U1 mm	U2 mm	U3 mm	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
2	DEAD	LinStatic			-1,539093	0,002057	0,029088	-0,00017	-0,000659	0,000517
2	MODAL	LinModal	Mode	1	0,118968	-0,010813	-0,009345	-2,348E-06	9,42E-06	-5,5E-05
2	MODAL	LinModal	Mode	2	0,241913	-0,023632	-0,024567	-9,900E-06	2,7E-05	-0,000113
2	MODAL	LinModal	Mode	3	0,033383	0,000135	-0,008274	-1,561E-06	1,2E-05	1,899E-06
2	MODAL	LinModal	Mode	4	-0,617047	0,001692	0,153165	1,5E-05	-0,000361	-1,2E-05
2	MODAL	LinModal	Mode	5	-0,191739	0,001325	0,048794	3,164E-06	-0,000139	-2,779E-07
2	MODAL	LinModal	Mode	6	-0,193252	0,020583	0,038581	2,4E-05	-4,4E-05	9,3E-05
2	MODAL	LinModal	Mode	7	-0,028661	-0,002315	0,005631	7,28E-06	6,3E-05	-1,1E-05
2	MODAL	LinModal	Mode	8	0,429427	-0,041407	-0,184272	-0,000131	0,000205	-0,000209
2	MODAL	LinModal	Mode	9	0,228111	-0,018474	-0,159978	-0,000118	0,000176	-0,000111
2	MODAL	LinModal	Mode	10	0,036579	-0,019258	0,207602	0,000163	-0,000221	-1,9E-05
2	MODAL	LinModal	Mode	11	-0,456774	0,076298	-0,132657	-0,000115	0,000124	0,000231
2	MODAL	LinModal	Mode	12	0,229779	-8,9E-05	-0,081444	-2,8E-05	0,000131	1,3E-05
2	MODAL	LinModal	Mode	13	0,533524	-0,087917	0,049835	5,1E-05	-2,9E-05	-0,000272
2	MODAL	LinModal	Mode	14	0,86228	-0,001302	-0,378512	-0,000146	0,000606	5,6E-05
2	MODAL	LinModal	Mode	15	0,046733	-0,002434	-0,079102	-6,2E-05	7,6E-05	-2E-05

Gambar 3.47 Contoh *output* tabel *joint displacement*.

3.8. Penentuan Hasil Penelitian

Dalam menentukan dan menyajikan hasil penelitian berupa hasil analisis *modal* untuk mengidentifikasi parameter dinamik dari struktur jembatan diawali pada proses analisis menggunakan *software CSi Bridge version 21*. Hasil *output* data dipindahkan pada *software Microsoft Excel* untuk diolah secara analitis. Data hasil analisis ini akan ditampilkan dalam bentuk data tabel dan data grafik hubungan yang akan mendeskripsikan maksud penelitian, dalam hal ini adalah parameter dinamik berupa nilai frekuensi alami dan ragam getar (*mode shape*) struktur jembatan Tugu Suharto.

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

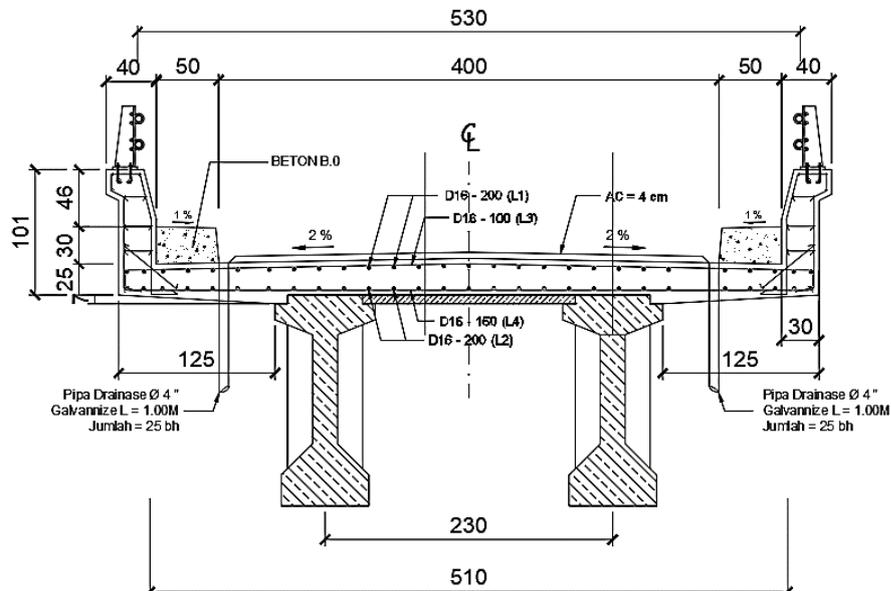
4.1. Detail Jembatan Tugu Suharto

Dalam pembuatan model elemen hingga atau *3D finite element model* jembatan Tugu Suharto dibutuhkan data detail dan spesifikasi struktur dari jembatan Tugu Suharto. Data detail struktur yang berupa gambar kerja jembatan Tugu Suharto diperoleh dari Dinas Pekerjaan Umum Kota Semarang. Gambar kerja yang digunakan untuk acuan pembuatan model merupakan *design engineering drawing* (DED) jembatan Tugu Suharto. Gambar *design engineering drawing* (DED) dikombinasikan dengan data observasi yaitu hasil pengukuran langsung pada elemen-elemen jembatan Tugu Suharto sebagai acuan pembuatan model yang lebih presisi.

4.1.1. Detail Bangunan Atas Jembatan (*Superstructure*)

1. Plat Lantai

Plat lantai jembatan Tugu Suharto menggunakan material beton bertulang dengan mutu $f'c$ sebesar 35 MPa yang akan menahan beban lalu lintas oleh kendaraan dan pejalan kaki.

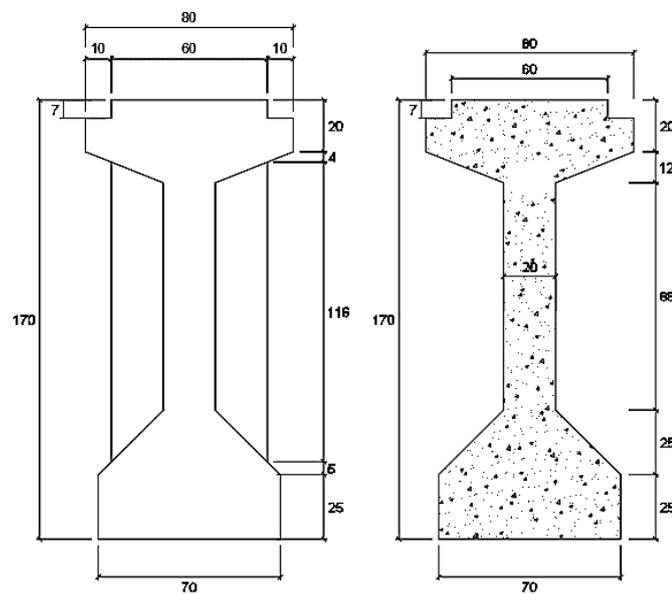


Gambar 4. 1 Gambar potongan sistem plat lantai jembatan Tugu Suharto (DPU Kota Semarang, 2013).

Berdasarkan gambar di atas plat lantai juga termasuk beberapa komponen seperti trotoar, *railing*, dan lapis perkerasan aspal menjadi satu kesatuan sistem plat lantai jembatan Tugu Suharto.

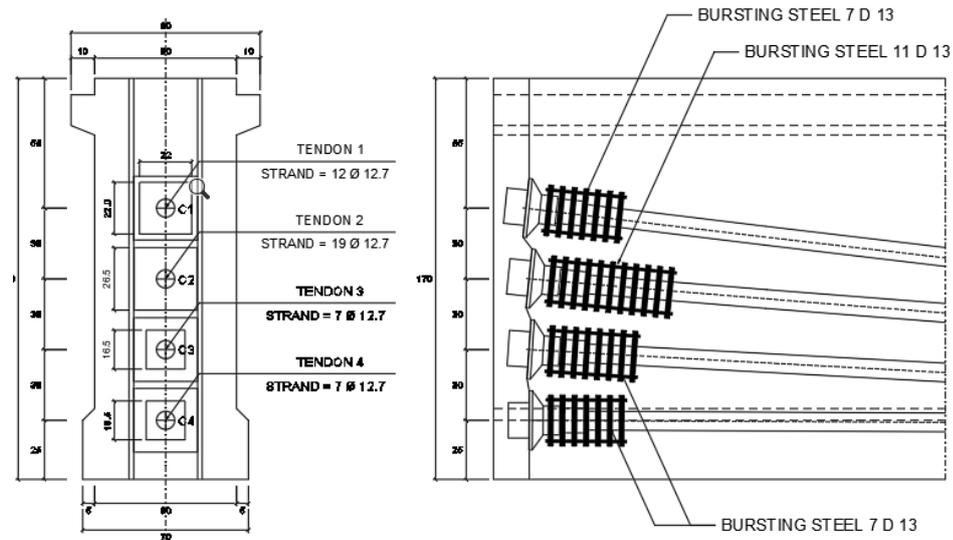
2. Gelagar

Gelagar pada jembatan Tugu Suharto merupakan balok gelagar beton prategang dengan bentuk I atau yang umum disebut PC-I (*prestressed concrete – I girder*). Gelagar berjumlah dua buah pada setiap bentang dengan tipe *post-tension segmental* pada setiap gelagarnya. Jarak antar gelagar 2,3 m dengan tinggi gelagar 1,7 m.



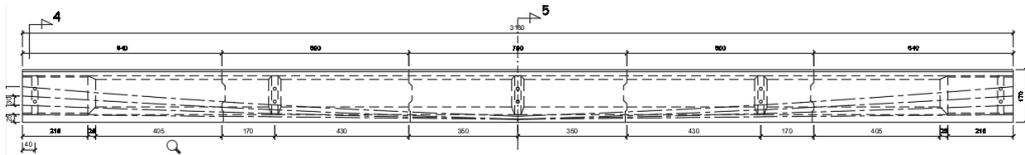
Gambar 4.2 Dimensi gelagar jembatan Tugu Suharto (DPU Kota Semarang, 2013).

Karena merupakan balok beton prategang, di dalam gelagar diberi sistem prategang dengan menggunakan tendon atau kawat yang dililit atau yang disebut kabel *strand*. Dalam satu buah gelagar pada jembatan Tugu Suharto terdapat empat buah tendon yang di pasang untuk sistem prategang menggunakan metode *jacking*.



Gambar 4.3 Posisi tendon pada ujung gelagar (DPU Kota Semarang, 2013).

Seluruh tendon disusun pada tiap posisi yang telah direncanakan. Kabel yang digunakan adalah jenis *seven wire strand* berdasarkan ASTM 416 pada *grade* 270. Berikut *layout* tendon pada gelagar jembatan Tugu Suharto.



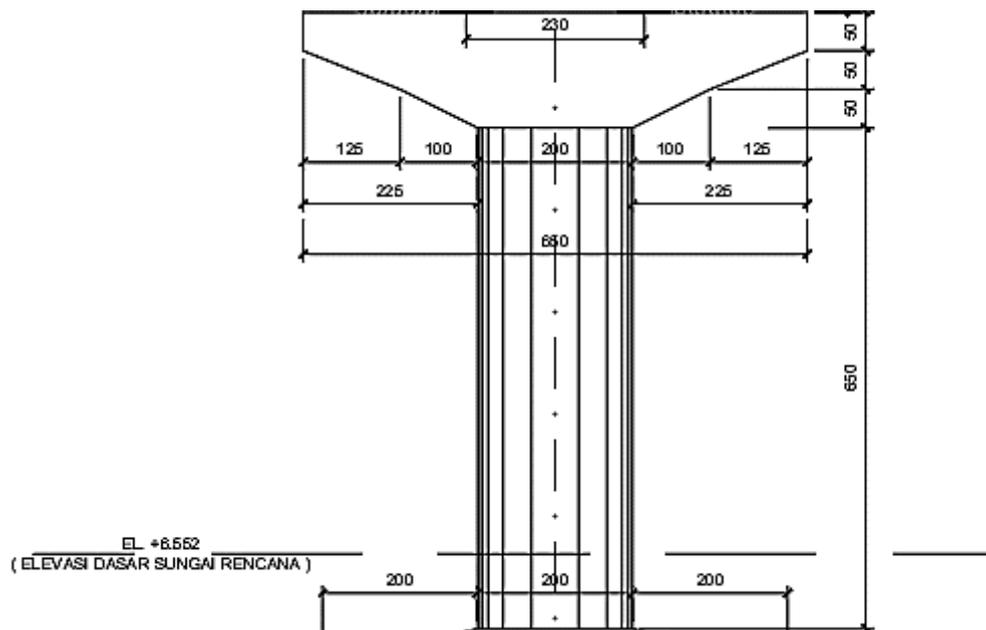
Gambar 4.4 *Layout* tendon jembatan Tugu Suharto (DPU Kota Semarang, 2013).

3. Diafragma

Diafragma digunakan untuk pengunci gelagar agar tidak berpindah posisi. Pada jembatan Tugu Suharto menggunakan diafragma bermaterial beton bertulang dengan mutu beton f'_c sebesar 35 MPa. Dalam satu bentang terdapat 5 buah diafragma dengan letak dan jarak antar diafragma yang sudah ditentukan. Gelagar mempunyai bentuk penampang yang lebih lebar pada ujungnya dan akan lebih langsing pada bagian tengah bentang. Maka dari itu terdapat dua jenis bentuk diafragma yang menyesuaikan bentuk dari gelagar yaitu diafragma ujung dan diafragma tengah. Berikut gambar serta penulangan diafragma ujung dan diafragma tengah jembatan Tugu Suharto,

2. Pilar dan Kepala Pilar

Kepala pilar dan pilar mempunyai fungsi yang sama dengan abutmen yaitu sebagai penahan beban dari struktur bangunan atas jembatan. Jembatan Tugu Suharto memiliki tiga bentang, maka dari itu digunakan dua buah pilar sebagai penyangga pada bentang yang berada ditengah. Pilar dan kepala pilar pada jembatan Tugu Suharto merupakan struktur beton bertulang dengan bentuk tertentu. Mutu beton yang digunakan adalah $f'c$ sebesar 35 MPa.



Gambar 4.7 Kepala pilar dan pilar jembatan Tugu Suharto (DPU Kota Semarang, 2013).

4.2. Perhitungan Manual Desain Jembatan Tugu Suharto

Dalam perencanaan jembatan dilakukan perhitungan manual desain atau perencanaan jembatan mengacu SNI 1725:2016 dan Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga Nomor 06/SE/Db/2021. Pada penelitian ini dengan objek penelitan Jembatan Tugu Suharto yang merupakan jembatan eksisting, maka perhitungan manual desain jembatan dilakukan berdasarkan data *design engineering drawing* (DED). Perhitungan meliputi perhitungan beban rencana, perencanaan plat lantai, gelagar, kepala pilar dan pilar tiang tunggal. Pada penelitian ini tumpuan pilar jembatan dianggap jepit sehingga perhitungan hanya sampai pada perencanaan pilar tiang tunggal saja. Proses perhitungan dilakukan dibantu menggunakan *software MathCad Prime* untuk memudahkan perhitungan.

4.2.1. Perhitungan Beban

1. Beban Mati Sendiri dan Tambahan

Beban Mati Sendiri

Jarak antar Gelagar (S_g)	= 2.3 m
Tebal Plat (t_s)	= 0.25 m
Panjang Gelagar 1 (L_{g1})	= 27.8 m
Panjang Gelagar 2 (L_{g2})	= 31.8 m
Panjang Gelagar 3 (L_{g3})	= 27.8 m
Panjang Jembatan (L_b)	= 87.4 m
Luas Plat (A_d)	= $S_g \times t_s = 0.575 \text{ m}^2$
Berat Jenis Beton (γ_c)	= 25 kN/m ³
Beban Plat (W_s)	= $\gamma_c \times A_d = 14.375 \text{ kN/m}$
Lebar RC Plat (w_{rcp})	= 1.7 m
Tebal RC Plat (t_{rcp})	= 0.06 m
Beban RC Plat (W_{rcp})	= $w_{rcp} \times t_{rcp} \times \gamma_c = 2.55 \text{ kN/m}$
Lebar Diag. Tengah (w_{dpMid})	= 2.1 m
Tinggi Diag. Tengah (h_{dpMid})	= 1.25 m
Luas Pen. Diag. Tengah (A_{dpMid})	= $h_{dpMid} \times w_{dpMid} = 2.625 \text{ m}^2$
Tebal Diag. Tengah (t_{dpMid})	= 0.2 m
Beban Diag. Tengah di Mid (W_{dpMidM})	= $A_{dpMid} \times t_{dpMid} \times \gamma_c \times \frac{1}{L_{g2}} = 0.904 \text{ kN/m}$
Beban Diag. Tengah di End (W_{dpEndM})	= $A_{dpMid} \times t_{dpMid} \times \gamma_c \times \frac{1}{L_{g1}} = 1.034 \text{ kN/m}$
Lebar Diag. Tepi (w_{dpEnd})	= 2.3 m
Tinggi Diag. Tepi (h_{dpEnd})	= 1.25 m
Luas Pen. Diag. Tepi (A_{dpEnd})	= $A_{dpEnd} \times h_{dpEnd} = 2.875 \text{ m}^2$
Tebal Diag. Tepi (t_{dpEnd})	= 0.2 m
Beban Diag. Tepi di Mid (W_{dpMidE})	= $A_{dpEnd} \times t_{dpEnd} \times \gamma_c \times \frac{1}{L_{g2}} = 0.904 \text{ kN/m}$
Beban Diag. Tepi di End (W_{dpEndE})	= $A_{dpEnd} \times t_{dpEnd} \times \gamma_c \times \frac{1}{L_{g1}} = 1.504 \text{ kN/m}$
Luas Gelagar (A_g)	= 0.6695 m ²
Beban Gelagar (W_g)	= $\gamma_c \times A_g = 16.738 \text{ kN/m}$
Total Beban Mati (W_{MS1})	= $W_s + W_{rcp} + W_g = 33.663 \text{ kN/m}$

(W_{MS2})	$= W_{dpMidM} + W_{dpEndM} = 1.317 \text{ kN/m}$
(W_{MS3})	$= W_{dpEndE} + W_{dpMidE} = 1.506 \text{ kN/m}$
Beban Mati Tambahan	
Lebar Jalan (w_r)	$= 4 \text{ m}$
Tebal Kerb (t_k)	$= 0.3 \text{ m}$
Jumlah Gelagar / Bentang (n_g)	$= 2$
Tebal Perkerasan (t_a)	$= 0.05 \text{ m}$
Berat Jenis Aspal (γ_a)	$= 22 \text{ kN/m}^3$
Jumlah Barrier (n_b)	$= 2$
Luas Barrier (A_b)	$= 0.15 \text{ m}^2$
Beban Barrier (W_b)	$= \gamma_c \times A_b = 7.5 \text{ kN/m}$
Jumlah Kerb Trotoar (n_k)	$= 2$
Luas Kerb Trotoar (A_k)	$= 0.15 \text{ m}^2$
Beban Kerb Trotoar (W_k)	$= \gamma_c \times A_k = 7.5 \text{ kN/m}$
Luas Aspal (A_a)	$= w_r \times t_a = 0.2 \text{ m}^2$
Beban Aspal (W_a)	$= w_r \times A_a = 4.4 \text{ kN/m}$
Total Beban Mati Tambah (W_{MA})	$= \frac{W_b + W_k + W_a}{n_g} = 9.7 \text{ kN/m}$

2. Gaya akibat Beban Mati Sendiri dan Tambahan

Bentang Tengah

Momen akibat Beban Plat (M_{MSS_Mid})	$= \frac{W_s \times L g^2}{8} = 1.817 \times 10^3 \text{ kNm}$
Momen akibat Beban Gel. (M_{MSG_Mid})	$= \frac{W_g \times L g^2}{8} = 2.116 \times 10^3 \text{ kNm}$
Momen akibat Beban Dia. (M_{MSD_Mid})	$= \frac{W_{MS2} \times L g^2}{8} = 166.453 \text{ kNm}$
Momen akibat Beban RC (M_{MSRCP_Mid})	$= \frac{W_{rcp} \times L g^2}{8} = 322.333 \text{ kNm}$
Momen akibat Beban Bar. (M_{MAB_Mid})	$= \frac{W_{bar} \times L g^2}{8} = 948.038 \text{ kNm}$
Momen akibat Beban Aspal (M_{MAA_Mid})	$= \frac{W_a \times L g^2}{8} = 556.182 \text{ kNm}$
Geser akibat Beban Plat (V_{MSS_Mid})	$= \frac{W_s \times L g}{2} = 228.563 \text{ kNm}$
Geser akibat Beban Gelagar (V_{MSG_Mid})	$= \frac{W_g \times L g}{2} = 266.126 \text{ kNm}$
Geser akibat Beban Dia. (V_{MSD_Mid})	$= \frac{W_{MS2} \times L g}{2} = 20.938 \text{ kNm}$

$$\begin{aligned}
\text{Geser akibat Beban RC (V}_{\text{MSRCP_Mid}}) &= \frac{W_{\text{rcp}} \times L_{g2}}{2} = 40.545 \text{ kNm} \\
\text{Geser akibat Beban Barrier (V}_{\text{MAB_Mid}}) &= \frac{W_{\text{bar}} \times L_{g2}}{2} = 119.25 \text{ kNm} \\
\text{Geser akibat Beban Aspal (V}_{\text{MAA_Mid}}) &= \frac{W_a \times L_{g2}}{2} = 69.69 \text{ kNm} \\
\text{Bentang Tepi} & \\
\text{Momen akibat Beban Plat (M}_{\text{MSS_Mid}}) &= \frac{W_s \times L_{g1}^2}{8} = 1.389 \times 10^3 \text{ kNm} \\
\text{Momen akibat Beban Gel. (M}_{\text{MSG_Mid}}) &= \frac{W_g \times L_{g1}^2}{8} = 1.617 \times 10^3 \text{ kNm} \\
\text{Momen akibat Beban Dia. (M}_{\text{MSD_Mid}}) &= \frac{W_{\text{MS1}} \times L_{g1}^2}{8} = 145.516 \text{ kNm} \\
\text{Momen akibat Beban RC (M}_{\text{MSRCP_Mid}}) &= \frac{W_{\text{rcp}} \times L_{g1}^2}{8} = 246.343 \text{ kNm} \\
\text{Momen akibat Beban Bar. (M}_{\text{MAB_Mid}}) &= \frac{W_{\text{bar}} \times L_{g1}^2}{8} = 724.538 \text{ kNm} \\
\text{Momen akibat Beban Aspal (M}_{\text{MAA_Mid}}) &= \frac{W_a \times L_{g1}^2}{8} = 425.062 \text{ kNm} \\
\text{Geser akibat Beban Plat (V}_{\text{MSS_Mid}}) &= \frac{W_s \times L_{g1}}{2} = 199.813 \text{ kNm} \\
\text{Geser akibat Beban Gelagar (V}_{\text{MSG_Mid}}) &= \frac{W_g \times L_{g1}}{2} = 232.651 \text{ kNm} \\
\text{Geser akibat Beban Dia. (V}_{\text{MSD_Mid}}) &= \frac{W_{\text{MS1}} \times L_{g1}}{2} = 20.938 \text{ kNm} \\
\text{Geser akibat Beban RC (V}_{\text{MSRCP_Mid}}) &= \frac{W_{\text{rcp}} \times L_{g1}}{2} = 35.445 \text{ kNm} \\
\text{Geser akibat Beban Barrier (V}_{\text{MAB_Mid}}) &= \frac{W_{\text{bar}} \times L_{g1}}{2} = 104.25 \text{ kNm} \\
\text{Geser akibat Beban Aspal (V}_{\text{MAA_Mid}}) &= \frac{W_a \times L_{g1}}{2} = 61.61 \text{ kNm}
\end{aligned}$$

3. Beban Hidup

Beban Lajur “D”

Bentang Tengah

$$\text{Beban Terbagi Rata (q}_{\text{BTR_Mid}}) = 8.745 \text{ kN/m}^2$$

Beban BTR yang bekerja

$$\text{pada gelagar Tengah (W}_{\text{BTR_Mid}}) = q_{\text{BTR_Mid}} \times S_g = 20.114 \text{ kN/m}$$

Beban Garis Terpusat (BGT)

$$= 49 \text{ kN (SNI 1725:2016)}$$

Faktor Beban Dinamis (FBD_{Mid})

$$= 0.3$$

Beban BGT yang bekerja

$$\text{pada Gelagar Tengah (P}_{\text{BGT_Mid}}) = (1 + FBD_{\text{Mid}}) \times BGT \times S_g =$$

$$146.51 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
\text{Momen BTR (M}_{BTR_Mid}\text{)} &= \frac{W_{BTR_Mid} \times L_{g2}^2}{8} = 2.543 \times 10^3 \text{ kNm} \\
\text{Momen BGT (M}_{BGT_Mid}\text{)} &= \frac{P_{BGT_Mid} \times L_{g2} \times (1 + FBD_{Mid})}{2} = 1.514 \times 10^3 \text{ kNm} \\
\text{Momen Total Lalu Lintas (M}_{LL_Mid}\text{)} &= M_{BTR_Mid} + M_{BGT_Mid} = 4.057 \times 10^3 \text{ kNm} \\
\text{Geser BTR (V}_{BTR_Mid}\text{)} &= \frac{W_{BTR_Mid} \times L_{g2}}{2} = 319.815 \text{ kN} \\
\text{Geser BGT (V}_{BGT_Mid}\text{)} &= \frac{P_{BGT_Mid} \times (1 + FBD_{Mid})}{2} = 92.232 \text{ kN} \\
\text{Geser Total (V}_{LL_Mid}\text{)} &= V_{BTR_Mid} + V_{BGT_Mid} = 415.047 \text{ kNm} \\
\text{Bentang Tepi} & \\
\text{Beban Terbagi Rata (q}_{BTR_End}\text{)} &= 8.745 \text{ kN/m}^2 \\
\text{Beban BTR yang bekerja} & \\
\text{pada gelagar Tengah (W}_{BTR_end}\text{)} &= q_{BTR_Mid} \times S_g = 20.7 \text{ kN/m} \\
\text{Beban Garis Terpusat (BGT)} &= 49 \text{ kN (SNI 1725:2016)} \\
\text{Faktor Beban Dinamis (FBD}_{End}\text{)} &= 0.3 \\
\text{Beban BGT yang bekerja} & \\
\text{pada Gelagar Tengah (P}_{BGT_End}\text{)} &= (1 + FBD_{End}) \times BGT \times S_g = 157.78 \text{ kN} \\
\text{Momen BTR (M}_{BTR_End}\text{)} &= \frac{W_{BTR_End} \times L_{g1}^2}{8} = 2 \times 10^3 \text{ kNm} \\
\text{Momen BGT (M}_{BGT_End}\text{)} &= \frac{P_{BGT_End} \times L_{g1} \times (1 + FBD_{End})}{2} = 1.535 \times 10^3 \text{ kNm} \\
\text{Momen Total Lalu Lintas (M}_{LL_End}\text{)} &= M_{BTR_End} + M_{BGT_End} = 3.535 \times 10^3 \text{ kNm} \\
\text{Geser BTR (V}_{BTR_Mid}\text{)} &= \frac{W_{BTR_End} \times L_{g1}}{2} = 287.73 \text{ kN} \\
\text{Geser BGT (V}_{BGT_Mid}\text{)} &= \frac{P_{BGT_End} \times (1 + FBD_{End})}{2} = 110.446 \text{ kN} \\
\text{Geser Total (V}_{LL_Mid}\text{)} &= V_{BTR_End} + V_{BGT_End} = 398.176 \text{ kNm} \\
\text{Beban akibat Rem} & \\
\text{Bentang Tengah} & \\
\text{Beban BTR yang bekerja} & \\
\text{di semua Lajur (P}_{BTR_Mid}\text{)} &= q_{BTR_Mid} \times w_r \times L_{g2} = 1.112 \times 10^3 \text{ kN} \\
\text{Berat Gandar Truk Rencana (W}_{GT}\text{)} &= 49.03 \text{ kN} \\
\text{Beban Rem 25% Gandar (T}_{B1_Mid}\text{)} &= 0.25 \times \left(\frac{2 \times W_T}{2} \right) = 12.258 \text{ kN} \\
\text{Beban Truk Rencana (P}_T\text{)} &= 98.06 \text{ kN} \\
\text{Beban Rem 5% Truk (T}_{B2_Mid}\text{)} &= 0.5 \times \frac{P_T \times n_L + P_{BTR_Mid}}{n_g} = 32.713 \text{ kN}
\end{aligned}$$

Bentang Tepi

Beban BTR yang bekerja

$$\text{di semua Lajur } (P_{BTR_End}) = q_{BTR_End} \times w_r \times L_{g1} = 1.001 \times 10^3 \text{ kN}$$

$$\text{Berat Gandar Truk Rencana } (W_{GT}) = 49.03 \text{ kN}$$

$$\text{Beban Rem 25\% Gandar } (T_{B1_End}) = 0.25 \times \left(\frac{2 \times W_T}{2} \right) = 12.258 \text{ kN}$$

$$\text{Beban Truk Rencana } (P_T) = 98.06 \text{ kN}$$

$$\text{Beban Rem 5\% Truk } (T_{B2_End}) = 0.5 \times \frac{P_T \times n_L + P_{BTR_End}}{n_g} = 29.923 \text{ kN}$$

Beban Pejalan Kaki

Bentang Tengah

$$\text{Beban Pejalan Kaki } (W_{TP}) = 5 \text{ kN}$$

Beban Pejalan Kaki yang

$$\text{Bekerja } (T_{p_Mid}) = W_{TP} \times w_{tr} \times n_{tr} = 5 \text{ kN}$$

Beban Pejalan Kaki yang

$$\text{diterima tiap Gelagar } (W_{p_Mid}) = \frac{T_{p_Mid}}{n_g} = 2.5 \text{ kN}$$

Bentang Tepi

Beban Pejalan Kaki yang

$$\text{Bekerja } (T_{p_End}) = W_{TP} \times w_{tr} \times n_{tr} = 5 \text{ kN}$$

Beban Pejalan Kaki yang

$$\text{diterima tiap Gelagar } (W_{p_End}) = \frac{T_{p_End}}{n_g} = 2.5 \text{ kN}$$

Beban Truk

Roda Depan

$$\text{Beban 1 Roda } (P_1) = 25 \text{ kN}$$

$$\text{Faktor Beban Dinamis } (FBD_{Truck}) = 0.4$$

$$\text{Beban Roda Depan } (P_{T1}) = (1 + FBD_{Truck}) \times P_1 = 35 \text{ kN}$$

Roda Belakang

$$\text{Beban 1 Roda } (P_2) = 112.5 \text{ kN}$$

$$\text{Beban Roda Belakang } (P_{T2}) = (1 + FBD_{Truck}) \times P_2 = 15831.863 \text{ kN}$$

4.2.2. Perhitungan Perencanaan Plat Lantai Jembatan

1. Data Eksisting Plat Lantai Kendaraan

$$\text{Mutu Beton } (f_c) = 35 \text{ MPa}$$

Mutu Baja Tulangan (f_y)	= 320 MPa
Tebal Plat Lantai (t_s)	= 0.25 m
Tebal Lapisan Aspal (t_a)	= 0.05 m
Rencana Dia. Tulangan (ϕ)	= 13 mm
Tebal Selimut Beton (p)	= 35 mm
Berat Jenis Beton (γ_c)	= 25 kN/m ³
Berat Jenis Aspal (γ_a)	= 22 kN/m ³
Berat Jenis Air Hujan (γ_w)	= 9.81 kN/m ³

2. Gaya Beban

Berat Plat (W_s)	= 6.25 kN/m
Berat Aspal (W_a)	= 1.1 kN/m
Berat Air Hujan (W_w)	= 1.25 kN/m
Berat Barrier (W_b)	= 7.5 kN/m
Total Beban (ΣW_{DL})	= 8.6 kN/m
Total Beban Tambahan (ΣW_{DLadd})	= 9.85 kN/m
Momen Tumpuan = Lap. (M_{lap})	= $\left(\frac{1}{10}\right) \times \Sigma W_{DL} \times S_g^2 = 4.529 \text{ kN}$
Momen Beban Mati / 1 m lebar	
Strip Ekuivalen (M_{MS1})	= 0.781 kN/m
Momen Beban Mati / 1 m lebar	
Strip Ekuivalen (M_{MA1})	= 1.231 kN/m
Angka Poisson Beton (ν)	= 0.2
Standar Modulus of Soil React (k_s)	= 81500 kN/m ³
Modulus Elastisitas Beton (E_c)	= 25742.960 MPa
Lebar Bidang Kontak Roda (b_i)	= 0.5 m
Lebar Penyebaran B. Terpusat (λ)	= $\left(\frac{E_c \times t_s^3}{(12 \times (1 - \nu^2) \times k_s)}\right)^{0.25} = 0.809 \text{ m}$
Momen Truck (M_{Truck})	= 28.756 kN/m
Lebar Strip Utama (Tabel) (w)	= $1.925 \times 10^3 \text{ m}$
Momen Rencana / Lebar Strip	
Ekuivalen (M_{LL})	= 14.378 kN/m
Momen Ultimit (M_u)	= $(1.3 \times M_{MS1}) + (2 \times M_{MA1}) + (1.8 \times M_{LL}) = 29.359 \text{ kN/m}$

3. Tulangan Plat Lantai

Desain Lentur

Lebar Efektif Plat Lantai (b)	$= 1000 \text{ mm}$
Inersia Penampang (I_g)	$= 1.30208 \times 10^9 \text{ mm}^4$
Titik Berat Penampang (y_t)	$= 0.125 \text{ m}$
Tinggi Efektif Plat (d_e)	$= 250 \text{ mm}$
Momen Terfaktor (M_{uf})	$= 27.039 \text{ kNm}$
Faktor Reduksi Lentur (ϕ_f)	$= 0.9$
Luas Tulangan Minimum ($A_{S_{req}}$)	$= 441.814 \text{ mm}^2$
Jarak Antar Tulangan (s_s)	$= 200 \text{ mm}$
Diameter Tulangan (D_s)	$= 16 \text{ mm}$
Luas Tulangan Dibutuhkan ($A_{S_{use}}$)	$= \left(\frac{b}{s_s}\right) \times \left(\frac{1}{4}\right) \times 3.14 \times D_s^2 = 1.005 \times 10^3 \text{ mm}^2$
Tinggi Blok Tekan Ekuivalen (a)	$= \frac{A_{S_{use}} \times f_y}{0.85 \times f_c \times b} = 11 \text{ mm}$
Momen Nominal (M_n)	$= A_{S_{use}} \times f_y \times \left(d_e - \frac{a}{2}\right) = 78.646 \text{ kNm}$
Jarak Serat Tekan – Sumbu Netral (s_c)	$= 0.017 \text{ m}$
Regangan Ultimit Beton (ϵ_c)	$= 0.03$
Cek Regangan Baja (ϵ_s)	$= 0.421$
Momen Tahanan (M_r)	$= \phi_f \times M_n = 70.782 \text{ kNm}$
Syarat Tulangan Minimum	
Tegangan Retak Beton (f_r)	$= 0.63 \times \sqrt{f_c \times \text{MPa}} = 3.727 \text{ MPa}$
Variabel Faktor Retak Lentur (Y_1)	$= 1.6$
(Y_3)	$= 0.75$
Momen Retak Penampang (M_{cr})	$= f_r \times Y_1 \times Y_3 \times \left(\frac{I_g}{y_t}\right) = 46.589 \text{ kNm}$
Syarat Tulangan Minimum ($S_{S_{minMu}}$)	$= 35.962 \text{ kNm}$
Syarat Tulangan Minimum ($S_{S_{minMcr}}$)	$= 55.907 \text{ kNm}$
Tulangan Lentur	
Luas Tulangan Pembagi (67%) (A_{Sp})	$= A_{S_{req}} \times 0.67 = 296.015 \text{ mm}^2$
Jarak Antar Tulangan Pembagi (s_{sp})	$= 100 \text{ mm}$
Luas Tulangan Digunakan ($A_{S_{usedp}}$)	$= \left(\frac{b}{s_{sp}}\right) \times \left(\frac{1}{4}\right) \times 3.14 \times D_s^2 = 2.01 \times 10^3 \text{ mm}^2$
Tulangan Pembagi	$= D16 - 100$

4. Geser pada Plat Lantai (*Punching Shear*)

Dimensi Bidang Kontrak Truk (P_t)	= 750 mm
(L_t)	= 250 mm
Dimensi Penampang Plat Kritis (b_o)	= 965 mm
(d_o)	= 465 mm
Rasio Panjang terhadap Lebar (β_o)	= $\frac{b_o}{d_o} = 2.075$
Keliling Geser Kritis (U)	= $2 \times (b_o + d_o) = 2.86 \times 10^3$ mm
Faktor Reduksi Geser (ϕ_v)	= 0.75
Faktor Beban Hidup (L_f)	= 1.8
Gaya Geser Terfaktor (V_u)	= $L_f \times (1 + FBD_t) \times PT_1 = 88.2$ kN
Kuat Geser Nominal Plat (V_n)	= $(0.17 + \frac{0.33}{\beta_c}) \times \sqrt{f_c} \times U \times d_{e_e} = 1.197 \times 10^3$ kN
Syarat Geser Nominal Plat (S_{V_n})	= $0.33 \times \sqrt{f_c} \times U \times d_{e_e} = 1.2 \times 10^3$ kN
Nilai Geser Plat (V_r)	= $\Phi_v \times V_n = 897.669$ kN
Cek	= $V_u \leq V_r$

4.2.3. Perhitungan Perencanaan Gelagar

1. Data Perencanaan Gelagar

Gelagar Beton

Kuat Tekan Beton 28 hari (f_{cg})	= 50 MPa
Kuat Tekan Beton Awal (f_{cig})	= 40 MPa
Modulus Elastisitas Gelagar 28 hari (E_{cg})	= 3.323×10^4 MPa
Modulus Elastisitas Gelagar Transfer (E_{cig})	= 2.973×10^4 MPa
Pelat Beton	
Kuat Tekan Beton 28 hari (f_{cd})	= 35 MPa
Kuat Tekan Beton Awal (f_{cid})	= 30 MPa
Modulus Elastisitas Beton 28 hari (E_{cd})	= 2.781×10^4 MPa
Modulus Elastisitas Beton Transfer (E_{cid})	= 2.574×10^4 MPa

Baja Prategang

Diameter Strand (D_{ps}) = 12.7 mm

Luas Penampang Strand (A_{strand}) = 98.7 mm²

Tegangan Putus Baja Prategang (f_{pu}) = 1860 MPa

Tegangan Leleh Baja Prategang (f_{py}) = 1.674 × 10³ MPa

Modulus Elastisitas Baja Prategang (E_{ps}) = 197000 MPa

Tegangan Baja Prategang

sebelum Transfer (f_{pbt}) = 1.395 × 10³ MPa

Baja Tulangan

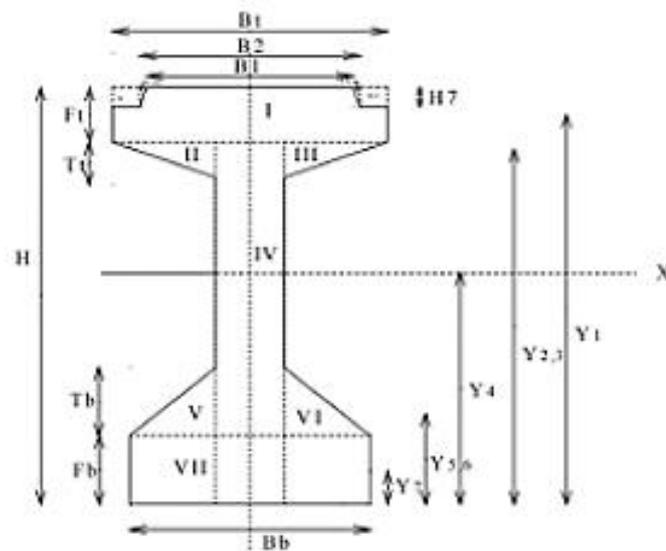
Tegangan Leleh Baja Tulangan

non Prategang (f_{ynp}) = 320 MPa

Modulus Elastisitas Baja

Tulangan non Prategang (E_{snp}) = 200000 MPa

2. Data Dimensi dan Penampang Melintang



Gambar 4. 8 Parameter dimensi gelagar (Bina Marga, 2021).

(H_g) = 170 cm

(B_{tg}) = 80 cm

(B_{bg}) = 70 cm

(w_g) = 20 cm

(F_{tg}) = 20 cm

(F_{bg}) = 25 cm

$$(Tt_g) = 12 \text{ cm}$$

$$(Tb_g) = 25 \text{ cm}$$

$$(H7_g) = 7 \text{ cm}$$

$$(B1_g) = 60 \text{ cm}$$

$$(B2_g) = 64 \text{ cm}$$

Penampang Dasar Gelagar

Luas Penampang Gelagar

$$\text{non Komposit } (A_{g_{nc}}) = 6720 \text{ cm}^2$$

Momen Inersia Gelagar

$$\text{non Komposit } (I_{g_{nc}}) = 57600000 \text{ cm}^4$$

$$\text{Tinggi Gelagar non Komposit } (h_{g_{nc}}) = 1700 \text{ mm}$$

Jarak Sumbu Netral ke Serat

$$\text{Bawah Gelagar nonKomposit } (y_{b_c}) = 81.833 \text{ cm}$$

Jarak Sumbu Netral ke Serat

$$\text{Atas Gelagar nonKomposit } (y_{t_c}) = 88.167 \text{ cm}$$

Modulus Penampang Serat

$$\text{Bawah Gelagar non Komposit } (S_{b_{nc}}) = \frac{I_{g_{nc}}}{y_{b_c}} = 0.704 \text{ m}^3$$

Modulus Penampang Serat

$$\text{Atas Gelagar non Komposit } (S_{t_{nc}}) = \frac{I_{g_{nc}}}{y_{t_c}} = 0.654 \text{ m}^3$$

Penampang Komposit

$$\text{Lebar Penampang Transformasi } (n_t) = 1.195 \text{ m}$$

Lebar Penampang Sayap

$$\text{Transformasi } (b_e) = 1.925 \text{ m}$$

$$\text{Tinggi Total Sistem Dek Komp. } (h_{cg}) = 1.95 \text{ m}$$

$$\text{Luas Pen. Gelagar Komposit } (A_{cg}) = A_{g_{nc}} + (b_e \times t_s) = 1.152 \text{ m}^2$$

Jarak Sumbu Netral ke Serat

$$\text{Bawah Gelagar } (y_{bcg}) = 1.236 \times 10^3 \text{ mm}$$

Jarak Sumbu Netral ke Serat

$$\text{Atas Gelagar Pen. Komposit } (y_{tcg}) = 0.714 \text{ m}$$

$$\text{Momen Inersia Gelagar Komp. } (I_{cg}) = 0.823 \text{ m}^4$$

Jarak Sumbu Netral ke Serat

Atas Pen. Komposit (y_{tcd})	= 71.353 cm
Jarak Sumbu Netral ke Serat	
Atas Pen. Komposit (y_{bcd})	= 46.353 cm
Modulus Penampang Atas	
Gelagar Komposit (S_{tcg})	= $\frac{I_{cg}}{y_{tcg}} = 1.153 \times 10^6 m^3$
Modulus Penampang Bawah	
Gelagar Komposit (S_{bcg})	= $\frac{I_{cg}}{y_{bcg}} = 6.655 \times 10^5 m^3$
Modulus Penampang Atas	
Pelat Komposit (S_{tcd})	= $\frac{I_{cg}}{y_{tcd}} = 1.153 \times 10^6 m^3$
Modulus Penampang Bawah	
Pelat Komposit (S_{bcd})	= $\frac{I_{cg}}{y_{bcd}} = 1.775 \times 10^6 m^3$

3. Tendon

Tegangan Tarik pada Serat	
Bawah Gelagar Tengah (f_{bserv_Mid})	= 13.419 MPa
Tegangan Tarik pada Serat	
Bawah Gelagar Tepi (f_{bserv_End})	= 11.336 MPa
Tegangan Izin Kondisi Beban	
Servis (f_{tserv})	= $0.5 \times \sqrt{fcg} = 3.536 MPa$
Tegangan Pratekan Bawah	
yang Dibutuhkan Tengah (f_{pb_Mid})	= $f_{bserv_Mid} - f_{tserv} = 9.883 MPa$
Tegangan Pratekan Bawah	
yang Dibutuhkan Tepi (f_{pb_End})	= $f_{bserv_Mid} - f_{tserv} = 7.801 MPa$
Pusat Gaya Prategang (y_{bs})	= 0.17 m
Eksentrisitas Tengah (e_c)	= 0.648 m
Gaya Tegang Efektif Bentang	
Tengah (P_{eMid})	= $\frac{f_{pb_Mid} \times S_{bnc} \times A_g}{S_{bnc} + e_c \times A_g} = 4.093 \times 10^3 kN$
Gaya Tegang Efektif Bentang	
Tepi (P_{eEnd})	= $\frac{f_{pb_End} \times S_{bnc} \times A_g}{S_{bnc} + e_c \times A_g} = 4.093 \times 10^3 kN$
Kehilangan Prategang (<i>losses</i>)	= 20%

Gaya Prategang Akhir tiap Strand Bentang Tengah ($P_{e_{strand_Mid}}$)	$= A_{strand} \times f_{pbt} \times (1 - losses) = 110.149 \text{ kN}$
Gaya Prategang Akhir tiap Strand Bentang Tepi ($P_{e_{strand_End}}$)	$= A_{strand} \times f_{pbt} \times (1 - losses) = 110.149 \text{ kN}$
Jumlah Strand Dibutuhkan Bentang Tengah (n_{strand_Mid})	$= \frac{P_{e_{Mid}}}{P_{e_{strand_Mid}}} = 37.157$
Jumlah Strand Dibutuhkan Bentang Tengah (n_{strand_End})	$= \frac{P_{e_{Mid}}}{P_{e_{strand_Mid}}} = 29.329$
Jumlah Strand Tergunakan (n_{strand})	$= 45$
Luas Baja Prategang Tergunakan (A_p)	$= A_{strand} \times n_{strand} = 4.442 \times 10^3 \text{ mm}^2$
Jarak Pusat Penampang Tendon 1 ke Serat Bawah Gelagar pada Tengah Bentang (c_1)	$= 200 \text{ mm}$
Jarak Pusat Penampang Tendon 2 ke Serat Bawah Gelagar pada Tengah Bentang (c_2)	$= 100 \text{ mm}$
Jarak Pusat Penampang Tendon 3 ke Serat Bawah Gelagar pada Tengah Bentang (c_3)	$= 100 \text{ mm}$
Jarak Pusat Penampang Tendon 4 ke Serat Bawah Gelagar pada Tengah Bentang (c_4)	$= 100 \text{ mm}$
Eksentrisitas Tengah Tendon 1 di Tengah Bentang (E_{c1})	$= 618.33 \text{ mm}$
Eksentrisitas Tengah Tendon 2 di Tengah Bentang (E_{c2})	$= 718.33 \text{ mm}$
Eksentrisitas Tengah Tendon 3 di Tengah Bentang (E_{c3})	$= 718.33 \text{ mm}$
Eksentrisitas Tengah Tendon 4 di Tengah Bentang (E_{c4})	$= 718.33 \text{ mm}$

Luas Tendon 1 (A_{ps1})	$= 1.184 \times 10^3 \text{ mm}^2$
Luas Tendon 2 (A_{ps2})	$= 1.875 \times 10^3 \text{ mm}^2$
Luas Tendon 3 (A_{ps3})	$= 690.9 \text{ mm}^2$
Luas Tendon 4 (A_{ps4})	$= 690.9 \text{ mm}^2$
Total Luas Tendon (A_{pstot})	$= 4.442 \times 10^3 \text{ mm}^2$
Eksentrisitas Rata-rata Tendon di Tengah Bentang (E_{cMid})	$= 0.692 \text{ m}$
Jarak Pusat Penampang Rata-rata Tendon ke Serat Bawah Gelagar di Tengah Bentang (y_{Mid})	$= 126.667 \text{ mm}$
Jarak Pusat Penampang Tendon 1 ke Serat Bawah Gelagar Tumpuan (ce_1)	$= 115 \text{ cm}$
Jarak Pusat Penampang Tendon 2 ke Serat Bawah Gelagar Tumpuan (ce_2)	$= 85 \text{ cm}$
Jarak Pusat Penampang Tendon 3 ke Serat Bawah Gelagar Tumpuan (ce_3)	$= 55 \text{ cm}$
Jarak Pusat Penampang Tendon 4 ke Serat Bawah Gelagar Tumpuan (ce_4)	$= 25 \text{ cm}$
Jarak Vertikal Pusat Penampang Tendon 1 di Tumpuan ke Pusat Penampang Tendon Tengah Bentang (ep_1)	$= 0.95 \text{ m}$
Jarak Vertikal Pusat Penampang Tendon 2 di Tumpuan ke Pusat Penampang Tendon Tengah Bentang (ep_2)	$= 0.75 \text{ m}$
Jarak Vertikal Pusat Penampang Tendon 3 di Tumpuan ke Pusat Penampang Tendon Tengah Bentang (ep_3)	$= 0.45 \text{ m}$
Jarak Vertikal Pusat Penampang Tendon 4 di Tumpuan ke Pusat Penampang Tendon Tengah Bentang (ep_4)	$= 0.15 \text{ m}$
Eksentrisitas Tendon 1 di Tumpuan (E_{pe1})	$= -0.332 \text{ m}$
Eksentrisitas Tendon 2 di Tumpuan (E_{pe2})	$= -0.032 \text{ m}$

Eksentrisitas Tendon 3 di Tumpuan (E_{pe3}) = 0.268 m

Eksentrisitas Tendon 4 di Tumpuan (E_{pe4}) = 0.568 m

Eksentrisitas Rata-rata

Tendon di Tumpuan ($E_{C_{End}}$) = 0.028 m

Jarak Pusat Penampang Rata-rata

Tendon ke Serat Bawah

Gelagar di Tumpuan (y_{End}) = 0.79 m

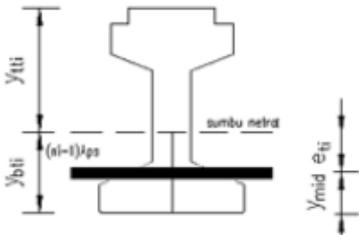
4. Kehilangan Prategang

Data Gelagar berdasarkan waktu

Data Gelagar saat Transfer

Penampang	Luas, A_i (mm ²)	y_i (mm)	$A_i (y_i)$ (mm ³)	Y_{cg} (mm)	$A(y_i - Y_{cg})^2$	I_o
Gelagar	672000	818.3	549897600	818.3	0	57600000
Strand	24993.77	126.67	3165960.846	818.3	11955821289	0
Total	696993.77		553063560.8		11955821289	57600000

Strand ditransformasikan menggunakan ($n_i - 1$)						
Tinggi Gelagar (h_g)	1700 mm					
n_i	$= E_{ps}/E_{ci}$	6.63				
y_{bti}	$= Y_{cg}$	818.3 mm				
y_{titi}	$= h_g - y_{bti}$	882 mm				
I_{ti}	$= \Sigma I_o + \Sigma A(y_i - Y_{cg})^2$	576047217899 mm ⁴				
S_{bti}	$= I_{ti}/y_{bti}$	703930221 mm ³				
S_{titi}	$= I_{ti}/y_{titi}$	653359214 mm ³				
e_{ti}	$= Y_{cg} - y_{mid}$	691.663 mm				

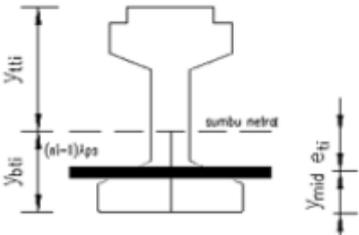


Gambar 4. 9 Data gelagar saat transfer.

Data Gelagar saat Final

Penampang	Luas, A_i (mm ²)	y_i (mm)	$A_i (y_i)$ (mm ³)	Y_{cg} (mm)	$A(y_i - Y_{cg})^2$	I_o
Gelagar	672000	818.3	549897600	796	334178880	391778880
Strand	21886.207	126.67	2772325.841	796	9805078710	0
Total	693886.207		552669925.8		10139257590	391778880

Strand ditransformasikan menggunakan ($n_i - 1$)						
Tinggi Gelagar (h_g)	1700 mm					
n_f	$= E_{ps}/E_{cgg}$	5.93				
y_{btf}	$= Y_{cg}$	796 mm				
y_{tff}	$= h_g - y_{btf}$	904 mm				
I_{tf}	$= \Sigma I_o + \Sigma A(y_i - Y_{cg})^2$	576382296519 mm ⁴				
S_{btf}	$= I_{tf}/y_{btf}$	724098362 mm ³				
S_{tff}	$= I_{tf}/y_{tff}$	637591035 mm ³				
e_{tf}	$= Y_{cg} - y_{mid}$	669.333 mm				



Gambar 4. 10 Data gelagar saat final.

Data Gelagar Komposit

Penampang	Luas, A_i (mm ²)	y_i (mm)	$A_i (y_i)$ (mm ³)	Y_{cg} (mm)	$A(y_i - Y_{cg})^2$	I_o
Gelagar	669500	818.3	547851850	1285.046	1.45852E+11	1.45909E+11
Strand	21886.207	126.67	2772325.841	1285.046	29367677637	0
Plat	575000	1825	1049375000	1285.046	1.67641E+11	1.67699E+11
Total	1266386.207		1599999176		3.42861E+11	3.13608E+11

Strand ditransformasikan menggunakan $(n_s - 1)$
 Plat ditransformasikan menggunakan $n_c = 1.20$

Tinggi Gelagar (h_g) 1700 mm
 Tinggi Gelagar Komposit (h_{cg}) 1950 mm
 $n_c = E_{ps}/E_{cg} = 1.195$
 $y_{bc} = Y_{cg} = 796$ mm
 $y_{ct} = h_{cg} - y_{bc} = 665$ mm
 $y_{gt} = h_g - y_{bc} = 904$ mm
 $I_{ct} = \Sigma I_o + \Sigma A(y_i - Y_{cg})^2 = 918852171456$ mm⁴
 $S_{bc} = I_{ct}/y_{bc} = 1154336899$ mm³
 $S_{gt} = I_{ct}/y_{gt} = 1016429393$ mm³
 $e_{ct} = Y_{bc} - y_{mid} = 1158.333$ mm

Gambar 4. 11 Data gelagar komposit.

Kehilangan Prategang akibat Gesekan

Bentang Tengah (Δf_{pf_Mid})

Tabel 4. 1 Perhitungan kehilangan prategang akibat gesekan bentang tengah.

Segmen	ep (mm)	Lp (mm)	α (rad)	$\Sigma\alpha$ (rad)	ΣLp (mm)	Titik	K	fpj (MPa)	Δf_{pf} (MPa)	fpj- Δf_{pf} (MPa)
A	663	0	0	0	0	A	0,00000066	1395	0	1395
AB	663	15900	0.083	0.0834	15900	B	0,00000066	1395	43,69	1351,31
BC	663	15900	0.083	0.1668	31800	C	0,00000066	1395	87,17	1307,83

Bentang Tepi (Δf_{pf_End})

Tabel 4. 2 Perhitungan kehilangan prategang akibat gesekan bentang tepi.

Segmen	ep (mm)	Lp (mm)	α (rad)	$\Sigma\alpha$ (rad)	ΣLp (mm)	Titik	K	fpj (MPa)	Δf_{pf} (MPa)	fpj- Δf_{pf} (MPa)
A	663	0	0	0	0	A	0,00000066	1395	0	1395
AB	663	13900	0.095	0.0954	13900	B	0,00000066	1395	46,06	1348,94
BC	663	13900	0.095	0.1908	27800	C	0,00000066	1395	91,85	1303,15

Kehilangan Prategang akibat *Anchorage Set*

Bentang Tengah (Δf_{pa_Mid})

Tabel 4. 3 Perhitungan kehilangan prategang akibat *anchorage set* bentang tengah.

Lokasi		Δf_{pa}	Δf_{pf}	$\Delta f_{pf} - \Delta f_{pa}$
X/L	L(m)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
0	0	144.52	1395	1250
0,1	3180	127.092	1386	1259
0,2	6360	109.658	1377	1267
0,3	9540	92.224	1368	1276
0,4	12720	74.790	1359	1284
0,5	15900	57.356	1350	1293
0,6	19080	39.922	1341	1301
0,7	22260	22.488	1332	1310
0,8	25440	5.054	1323	1318
0,829	26361	0	1321	1321
0,9	28620		1314	1314
1	31800		1305	1305

Bentang Tepi (Δf_{pa_End})

Tabel 4. 4 Perhitungan kehilangan prategang akibat *anchorage set* bentang tepi.

Lokasi		Δf_{pa}	Δf_{pf}	$\Delta f_{pf} - \Delta f_{pa}$
X/L	L(m)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
0	0	158.67	1395	1236
0,1	2780	140.30	1385	1245
0,2	5560	121.93	1376	1254
0,3	8340	103.56	1367	1263
0,4	11120	85.19	1358	1273
0,5	13900	66.82	1349	1282
0,6	16680	48.45	1340	1292
0,7	19460	30.08	1331	1301
0,8	22240	11.71	1322	1311
0,864	24010	0	1316	1316
0,9	25020		1313	1313
1	27800		1304	1304

Kehilangan Prategang akibat Perpendekan Elastis

Bentang Tengah

$$\text{Gaya Prategang Awal (P}_i) = 5.941 \times 10^3 \text{ kN}$$

$$\text{Tegangan Tendon saat Transfer (F}_{pi1_Mid}) = 1.338 \times 10^3 \text{ MPa}$$

Tegangan di Beton pada

$$\text{Level Baja (F}_{cgp_Mid}) = 11.268 \text{ MPa}$$

Kehilangan Prategang

$$\text{Bentang Tengah } (\Delta f_{pES_Mid}) = \frac{Nps-1}{2 \times Nps} \times \frac{Eps}{Ecig} \times F_{cgp_Mid} = 28.003 \text{ MPa}$$

Bentang Tepi

$$\text{Tegangan Tendon saat Transfer (F}_{pi1_End}) = 1.236 \times 10^3 \text{ MPa}$$

Tegangan di Beton pada

$$\text{Level Baja (F}_{cgp_End}) = 10.821 \text{ MPa}$$

Kehilangan Prategang

$$\text{Bentang Tepi } (\Delta f_{pES_End}) = \frac{Nps-1}{2 \times Nps} \times \frac{Eps}{Ecig} \times F_{cgp_End} = 26.893 \text{ MPa}$$

Kehilangan Prategang akibat Susut Gelagar

Bentang Tengah

$$\text{Keliling Penampang Gelagar (K}_{lg}) = 554 \text{ cm}$$

$$\text{Luas Permukaan Total (A}_{surfg_Mid}) = 177.511 \text{ m}^2$$

$$\text{Volume Gelagar (V}_{g_Mid}) = 21.29 \text{ m}^3$$

$$\text{Rasio Gelagar (r}_{vS_Mid}) = \frac{V_{g_Mid}}{A_{surfg_Mid}} = 119.937 \text{ mm}$$

Faktor Pengaruh Rasio Volume

$$\text{dan Luas Permukaan Komponen (ks)} = 1$$

$$\text{Kelembaban Relatif (Hr)} = 85\%$$

$$\text{Umur Gelagar saat Transfer (ti)} = 7$$

$$\text{Umur Gelagar saat Cor Plat (td)} = 120$$

$$\text{Umur Gelagar saat Final (tf)} = 25550$$

$$\text{Faktor Kelembabab Susut (khs)} = 2$$

$$\text{Faktor Kuat Tekan Beton (kf)} = 0.7$$

Perpanjangan Waktu Transfer dan

$$\text{Cor Plat (tdi)} = 113$$

Faktor Perpanjangan Waktu

$$\text{Transfer dan Cor Plat (}k_{tddi}\text{)} = 0.7$$

Regangan Susut Gelagar antara

$$\begin{aligned} \text{Waktu Transfer dan Cor Plat (}\epsilon_{bdi_Mid}\text{)} &= k_{s_Mid} \times k_{hs} \times k_f \times k_{tddi} \times 0.48 \times 10^{-3} \\ &= 4.974 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

$$\text{Faktor Kelembaban Rangkak (}k_{hc}\text{)} = 1.553$$

Perpanjangan Waktu Transfer

$$\text{ke Final (}t_{fi}\text{)} = 25543$$

Faktor Perpanjangan Waktu

$$\text{Transfer dan Final (}k_{tdfi}\text{)} = 1$$

Koefisien Rangkak Gelagar Final

$$\text{karena Beban Transfer (}\Psi_{tffi_Mid}\text{)} = 1.747$$

$$\text{Koefisien Penampang Transf. (}k_{id_Mid}\text{)} = 0.868$$

Kehilangan Prategang akibat

$$\begin{aligned} \text{Susut Gelagar Bentang Tengah (}\Delta f_{pSR_Mid}\text{)} &= \epsilon_{bid_Mid} \times E_{ps} \times k_{id_Mid} \\ &= 85.104 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Bentang Tepi

$$\text{Luas Permukaan Total (}A_{surfg_End}\text{)} = 155.351 \text{ m}^2$$

$$\text{Volume Gelagar (}V_{g_End}\text{)} = 18.612 \text{ m}^3$$

$$\text{Rasio Gelagar (}r_{VS_End}\text{)} = \frac{V_{g_End}}{A_{surfg_End}} = 119.807 \text{ mm}$$

Regangan Susut Gelagar antara

$$\begin{aligned} \text{Waktu Transfer dan Cor Plat (}\epsilon_{bdi_End}\text{)} &= k_{s_End} \times k_{hs} \times k_f \times k_{tddi} \times 0.48 \times 10^{-3} \\ &= 4.974 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

Koefisien Rangkak Gelagar Final

$$\text{karena Beban Transfer (}\Psi_{tffi_End}\text{)} = 1.747$$

$$\text{Koefisien Penampang Transf. (}k_{id_End}\text{)} = 0.868$$

Kehilangan Prategang akibat

$$\begin{aligned} \text{Susut Gelagar Bentang Tengah (}\Delta f_{pSR_End}\text{)} &= \epsilon_{bid_End} \times E_{ps} \times k_{id_End} \\ &= 85.104 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Kehilangan Prategang akibat Rangkak Gelagar

Bentang Tengah

Kehilangan Tendon akibat Relaksasi
Tendon Rentan Waktu Transfer

$$\text{dan Cor Plat } (\Delta f_{pRII}) = 8 \text{ MPa}$$

Tegangan saat Transfer pada

$$\text{Strand Bentang Tengah } (f_{pi2_Mid}) = 1.315 \times 10^3 \text{ MPa}$$

$$\text{Gaya Prategang setelah Transfer } (p_{i_Mid}) = 5.842 \times 10^3 \text{ kN}$$

Tegangan Beton pada Level Tendon

$$\begin{aligned} \text{saat Setelah Transfer } (f_{cgpi_Mid}) &= \left\| \frac{-P_{i_Mid}}{A_{gti}} - \frac{P_{i_Mid} \times E_{ti_Mid}^2}{I_{ti}} + \frac{M_{MSG_Mid} \times E_{ti_Mid}}{I_{ti}} \right\| \\ &= 11.003 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Koefisien Rangkak Gelagar saat

Transfer dan Penempatan Plat karena

$$\text{Pembebanan saat Transfer } (\Psi_{tdti_Mid}) = 1.223$$

Kehilangan Prategang akibat

$$\begin{aligned} \text{Rangkak Gelagar Tengah } (\Delta f_{pCR_Mid}) &= \frac{E_{ps}}{E_{ciG}} \times f_{cgpi_Mid} \times \Psi_{tdti_Mid} \times k_{id_Mid} \\ &= 77.443 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Bentang Tepi

Kehilangan Tendon akibat Relaksasi

Tegangan saat Transfer pada

$$\text{Strand Bentang Tengah } (f_{pi2_End}) = 1.314 \times 10^3 \text{ MPa}$$

$$\text{Gaya Prategang setelah Transfer } (p_{i_End}) = 5.836 \times 10^3 \text{ kN}$$

Tegangan Beton pada Level Tendon

$$\begin{aligned} \text{saat Setelah Transfer } (f_{cgpi_End}) &= \left\| \frac{-P_{i_End}}{A_{gti}} - \frac{P_{i_End} \times E_{ti_End}^2}{I_{ti}} + \frac{M_{MSG_end} \times E_{ti_End}}{I_{ti}} \right\| \\ &= 11.589 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Koefisien Rangkak Gelagar saat

Transfer dan Penempatan Plat karena

$$\text{Pembebanan saat Transfer } (\Psi_{tdti_End}) = 1.223$$

Kehilangan Prategang akibat

$$\begin{aligned} \text{Rangkak Gelagar Tengah } (\Delta f_{pCR_End}) &= \frac{E_{ps}}{E_{ciG}} \times f_{cgpi_End} \times \Psi_{tdti_End} \times k_{id_End} \\ &= 81.557 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Kehilangan Prategang Final akibat Susut Gelagar

Bentang Tengah

Regangan Susut Gelagar antara

$$\begin{aligned} \text{Final dan Transfer } (\epsilon_{bif_Mid}) &= k_{s_Mid} \times k_{hs} \times k_f \times k_{tdfd} \times 0.48 \times 10^{-3} \\ &= 7.106 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

Regangan Susut Gelagar saat

$$\text{Final dan Cor Plat } (\epsilon_{bdf_Mid}) = 2.132 \times 10^{-4}$$

Eksentrisitas Tendon pada

$$\text{Penampang Komposit } (e_{cg}) = 1109.808 \text{ mm}$$

Koefisien Penampang

$$\text{Transformasi } (k_{df_Mid}) = 0.88$$

Kehilangan Prategang Final akibat

$$\text{Susut Gelagar Bentang Tengah } (\Delta f_{pSD_Mid}) = \epsilon_{bdf_Mid} \times E_{ps} \times k_{df_Mid} = 36.979 \text{ MPa}$$

Bentang Tepi

Regangan Susut Gelagar antara

$$\begin{aligned} \text{Final dan Transfer } (\epsilon_{bif_End}) &= k_{s_End} \times k_{hs} \times k_f \times k_{tdfd} \times 0.48 \times 10^{-3} \\ &= 7.106 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

Regangan Susut Gelagar saat

$$\text{Final dan Cor Plat } (\epsilon_{bdf_End}) = 2.132 \times 10^{-4}$$

Koefisien Penampang

$$\text{Transformasi } (k_{df_End}) = 0.88$$

Kehilangan Prategang Final akibat

$$\text{Susut Gelagar Bentang Tengah } (\Delta f_{pSD_End}) = \epsilon_{bdf_End} \times E_{ps} \times k_{df_End} = 36.979 \text{ MPa}$$

Kehilangan Prategang Final akibat Rangkak Gelagar

$$\text{Bentang Tengah } (\Delta f_{pCD_Mid}) = \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \times f_{cgpi_Mid} \times (\Delta\psi) \times k_{df_Mid} +$$

$$\left(\frac{E_{ps}}{E_{cg}} \times \Delta f_{cd_Mid} \times \psi_{tftd_Mid} \times k_{df_Mid} \right) = 46.5 \text{ MPa}$$

$$\text{Bentang Tengah } (\Delta f_{pCD_End}) = \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \times f_{cgpi_Mid} \times (\Delta\psi) \times$$

$$k_{df_Mid} + \left(\frac{E_{ps}}{E_{cg}} \times \Delta f_{cd_Mid} \times \psi_{tftd_Mid} \times k_{df_Mid} \right) = 30.18 \text{ MPa}$$

Tambahan Prategang akibat Susut Plat

$$\text{Lebar Sayap Efektif } (b_{ef}) = 2300 \text{ mm}$$

Luas Penampang Plat (A_d)	= 0.575 m^2
Keliling Penampang Plat (K_{ld})	= 5.1 m
Luas Permukaan Total Plat (A_{surfd_Mid})	= 163.33 m^2
(A_{surfd_End})	= 142.93 m^2
Volume Plat (V_{d_Mid})	= $5.194 \times 10^3 \text{ m}^3$
(V_{d_End})	= $3.973 \times 10^3 \text{ m}^3$
Rasio Volume dan	
Luas Permukaan (r_{VSd_Mid})	= 31.8 m
(r_{VSd_End})	= 27.8 m
Faktor Pengaruh Rasio (k_{sd_Mid})	= 1
(k_{sd_End})	= 1
Faktor Kelembaban Susut (k_{hsd})	= 1.988
Faktor Kuat Tekan Beton (k_{fd})	= 0.946
Perpanjangan Waktu antara	
Cor Plat dan Final (t_{dd})	= 25430
Faktor Perpanjangan Waktu (k_{tddf})	= 1
Regangan Susut Plat antara	
Cor Plat dan Final (ϵ_{ddf})	= $k_{sd} \times k_{hsd} \times k_{fd} \times k_{tddf} \times 0.48 \times 10^{-3}$
	= 9.027×10^{-4}
Koefisien Rangkak Plat saat Final (Ψ_{tftdd})	= 2.219
Eksentrisitas Plat (e_d)	= 838.525 mm
Rangkak pada Plat Beton (Δf_{cfd_Mid})	= -1.486 MPa
(Δf_{cfd_End})	= -1.486 MPa
Gaya Prategang Tambahan (Δf_{pSS_Mid})	= $\left\ \frac{E_{ps}}{E_{cg}} \times \Delta f_{cfd_Mid} \times k_{df} \times (1 + 0.7 \times \psi t_{f tdd}) \right\ $
	= 19.8 MPa
(Δf_{pSS_End})	= $\left\ \frac{E_{ps}}{E_{cg}} \times \Delta f_{cfd_Mid} \times k_{df} \times (1 + 0.7 \times \psi t_{f tdd}) \right\ $
	= 19.8 MPa
Total Kehilangan Prategang	
Kehilangan Seketika (Δf_{pm_Mid})	= 41.88 MPa
(Δf_{pm_End})	= 139.773 MPa
Kehilangan tergantung Waktu (Δf_{pLT_Mid})	= 188.816 MPa

$$(\Delta f_{pm_End}) = 209.26 \text{ MPa}$$

$$\text{Total Kehilangan Prategang } (\Delta f_{pT_Mid}) = 230.696 \text{ MPa}$$

$$(\Delta f_{pm_End}) = 349.032 \text{ MPa}$$

Gaya Prategang Final

$$\text{Prategang Final Efektif } (f_{peMax}) = 1.339 \times 10^3 \text{ MPa}$$

Tegangan Prategang Efektif

$$\text{Aktual setelah Kehilangan } (f_{pe_Mid}) = 1.164 \times 10^3 \text{ MPa}$$

$$(f_{pe_End}) = 1.046 \times 10^3 \text{ MPa}$$

$$\text{Gaya Prategang Akhir } (P_{ef_Mid}) = 5.171 \times 10^3 \text{ kN}$$

$$(P_{ef_End}) = 4.646 \times 10^3 \text{ MPa}$$

5. Pemeriksaan Tegangan

Tegangan Serat Atas Penampang saat Transfer (f_{bi_Mid})

Tabel 4. 5 Perhitungan tegangan serat atas saat transfer.

Kondisi	Lokasi	$P_{transfer}/A_g$	$P_{transfer}^{e_{mid}}/S$	M_s/S	M_A/S	M_{LL}/S	Total
		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
Transfer	Sisi Atas Gelagar	-8.943	6.363	-3.238			-5.818
	Sisi Bawah Gelagar	-8.943	-5.906	3.006			-11.843

Tegangan Serat Bawah Penampang saat Transfer (f_{bi_End})

Tabel 4. 6 Perhitungan tegangan serat bawah saat transfer.

Kondisi	Lokasi	$P_{transfer}/A_g$	$P_{transfer}^{e_{mid}}/S$	M_s/S	M_A/S	M_{LL}/S	Total
		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
Transfer	Sisi Atas Gelagar	-8.296	5.902	-2.475			-4.869
	Sisi Bawah Gelagar	-8.296	-5.478	2.297			-11.477

Tegangan Serat Atas Penampang saat Konstruksi (f_{bkons_Mid})

Tabel 4. 7 Perhitungan tegangan serat atas saat konstruksi.

Kondisi	Lokasi	$P_{transfer}/A_g$	$P_{transfer}^{e_{mid}}/S$	M_s/S	M_A/S	M_{LL}/S	Total
		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
Konstruksi	Sisi Atas Gelagar	-8.943	6.363	-6.769			-9.349
	Sisi Bawah Gelagar	-8.943	-5.906	6.282			-8.567

Tegangan Serat Bawah Penampang saat Transfer ($f_{b_{kons_End}}$)

Tabel 4. 8 Perhitungan tegangan serat bawah saat konstruksi.

Kondisi	Lokasi	$P_{transfer}/A_g$	$P_{transfer}^{emid}/S$	M_s/S	M_A/S	M_{LL}/S	Total
		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
Kosntruksi	Sisi Atas Gelagar	-8.296	5.902	-5.2			-7.594
	Sisi Bawah Gelagar	-8.296	-5.478	4.826			-8.948

Tegangan Serat Atas Penampang kondisi Layan ($f_{b_{serv_Mid}}$)

Tabel 4. 9 Perhitungan tegangan serat atas kondisi layan.

Kondisi	Lokasi	$P_{transfer}/A_g$	$P_{transfer}^{emid}/S$	M_s/S	M_A/S	M_{LL}/S	Total
		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
Layan	Sisi Atas Gelagar	-7.695	5.475	-6.769	-1.304	-3.518	-13.811
	Sisi Bawah Gelagar	-7.695	-5.082	6.282	2.26	4.877	0.642
	Sisi Atas Plat				-1.091	-2.944	-4.035
	Sisi Bawah Plat				-0.709	-1.912	-2.621

Tegangan Serat Bawah Penampang saat Transfer ($f_{b_{serv_End}}$)

Tabel 4. 10 Perhitungan tegangan serat bawah kondisi layan.

Kondisi	Lokasi	$P_{transfer}/A_g$	$P_{transfer}^{emid}/S$	M_s/S	M_A/S	M_{LL}/S	Total
		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
Layan	Sisi Atas Gelagar	-6.913	4.918	-5.2	-0.997	-3.065	-11.257
	Sisi Bawah Gelagar	-6.913	-4.565	4.826	1.728	4.249	-0.675
	Sisi Atas Plat				-0.834	-2.565	-3.399
	Sisi Bawah Plat				-0.542	-1.666	-2.208

6. Kapasitas Lentur Penampang

$$\text{Letak Sumbu Netral } (c_n) = 97.932 \text{ mm}$$

$$\text{Tinggi Blok Ekuivalen } (\alpha) = 83.242 \text{ mm}$$

Tegangan Rata-rata Tendon

$$\text{Prategang } (f_{ps}) = f_{pu} \times \left(1 - k_{fw} \times \frac{c_n}{d_p}\right) = 1.832 \times 10^3 \text{ MPa}$$

Kapasitas Lentur Nominal

$$\text{Tengah Penampang } (M_{nmp}) = A_{ps} \times f_{ps} \times \left(d_p - \frac{\alpha}{2}\right) = 14497.703 \text{ kNm}$$

$$\text{Faktor Reduksi Lentur } (\phi_f) = 0.9$$

Momen Tahanan Nominal

$$\text{Penampang } (M_r) = 13047.932 \text{ kNm}$$

Momen Ultimit Nominal

$$\text{Penampang } (M_{u_Mid}) = 1.493 \times 10^4 \text{ kNm}$$

$$(M_{n_End}) = 1.612 \times 10^4 \text{ kNm}$$

Tegangan Tekan Beton akibat

$$\text{Gaya Prategang Efektif } (f_{cpe_Mid}) = \frac{P_{e_Mid}}{A_{gnc}} + \frac{P_{e_Mid} \times E_{c_Mid}}{S_{bnc}} = 10.112 \text{ MPa}$$

$$(f_{cpe_End}) = \frac{P_{e_End}}{A_{gnc}} + \frac{P_{e_End} \times E_{c_End}}{S_{bnc}} = 7.982 \text{ MPa}$$

7. Kapasitas Geser Penampang

$$\text{Titik Berat Tendon Tumpuan } (y_{end}) = 790 \text{ mm}$$

$$\text{Titik Berat Tendon Tengah } (y_{mid}) = 126.667 \text{ mm}$$

$$\text{Panjang Setengah Bentang } (L_{m_Mid}) = 15.9 \text{ m}$$

$$(L_{m_End}) = 13.9 \text{ m}$$

Panjang Tendon di Setengah

$$\text{Bentang (Asumsi Linear) } (r_{t_Mid}) = \sqrt{(y_{end} - y_{mid})^2 + L_{m_Mid}^2} = 15.914 \text{ m}$$

$$(r_{t_End}) = \sqrt{(y_{end} - y_{mid})^2 + L_{m_End}^2} = 13.914 \text{ m}$$

Kontribusi Gaya Prategang terhadap Ketahanan Geser

$$(V_{p_Mid}) = P_{ef_Mid} \times \frac{(y_{end} - y_{mid})}{r_{t_Mid}} = 215.553 \text{ kN}$$

$$(V_{p_End}) = P_{ef_End} \times \frac{(y_{end} - y_{mid})}{r_{t_End}} = 221.448 \text{ kN}$$

$$\text{Kuat Geser Tulangan } (V_s) = \frac{A_v \times f_{yv} \times Dv \times \cot(\theta)}{S_v} = 8.169 \text{ kN}$$

$$\text{Kuat Geser Nominal } (V_{n1_Mid}) = V_c + V_s + V_{p_Mid} = 1.204 \times 10^3 \text{ kN}$$

$$(V_{n1_End}) = V_c + V_s + V_{p_End} = 1.21 \times 10^3 \text{ kN}$$

$$(V_{n2_Mid}) = 0.25 \times f_{cg} \times bv \times Dv + V_{p_Mid} = 248.053 \text{ kN}$$

$$(V_{n2_End}) = 0.25 \times f_{cg} \times bv \times Dv + V_{p_End} = 253.948 \text{ kN}$$

4.2.4. Perhitungan Perencanaan Kepala Pilar

1. Tulangan Kepala Pilar

Tulangan Atas

$$\text{Lebar Bawah Kepala Pilar } (b_b) = 2200 \text{ mm}$$

$$\text{Tinggi Kepala Pilar } (h_p) = 1500 \text{ mm}$$

$$\text{Tinggi Efektif } (d_{ep}) = 1450 \text{ mm}$$

$$\text{Faktor Reduksi Lentur } (\phi_f) = 0.9$$

$$\text{Momen Ultimit } (M_u) = 27.039 \text{ kNm}$$

Regangan Beton (ϵ_{cp})	= 0.003
Inersia <i>Gross</i> Penampang (I_{gp})	= $6.188 \times 10^{11} \text{ mm}^4$
Jarak Serat Tarik ke Sumbu Netral (y_{tp})	= 868.6 mm
Luas Tulangan yang Diperlukan (A_{sreqp})	= 58.038 mm ²
Luas Tulangan Minimum 1 (A_{sminp})	= 11233.509 mm ²
Luas Tulangan Minimum 2 (A_{sminp})	= 13956.25 mm ²
Luas Tulangan yang Dibutuhkan (A_{snp})	= 77.384 mm ²
Diameter Tulangan (D_p)	= 25 mm
Luas Satu Tulangan (A_{stulp})	= $\frac{1}{4} \times \pi \times D_p^2 = 490.874 \text{ mm}^2$
Jumlah Tulangan (n_{tulp})	= 10
Luas Tulangan yang Digunakan (A_{susedp})	= $A_{stulp} \times n_{tulp} = 490.739 \text{ mm}^2$
Tulangan Bawah	
Luas Tulangan yang Digunakan (A_{susedp_b})	= $A_{stulp} \times n_{tulp} = 490.739 \text{ mm}^2$

2. Kapasitas Lentur Kepala Pilar

Tinggi Blok Tegangan	
Persegi Ekuivalen (α_p)	= 24 mm
Momen Nominal Penampang (M_{np})	= $2.259 \times 10^3 \text{ kNm}$
Kapasitas Momen Nominal (M_{ncp})	= $2.033 \times 10^3 \text{ kNm}$
Jarak Serat Tekan Terluar	
ke Sumbu Netral (c_p)	= 28.235 mm
Momen Tahanan Nominal (M_{rp})	= $2.033 \times 10^3 \text{ kNm}$
Modulus <i>Rupture</i> (f_{rp})	= 3.45 MPa
Momen Retak (M_{crp})	= $Y_1 \times Y_3 \times f_{rp} \times \frac{I_{gp}}{y_{tp}} = 2.949 \times 10^3 \text{ kNm}$
Tinggi Blok Tegangan	
Persegi Ekuivalen (α_{pb})	= 31.5 mm
Momen Nominal Penampang (M_{npb})	= $2.957 \times 10^3 \text{ kNm}$
Kapasitas Momen Nominal (M_{ncpb})	= $2.661 \times 10^3 \text{ kNm}$
Momen Retak (M_{crpb})	= $Y_1 \times Y_3 \times f_{rp} \times \frac{I_{gp}}{y_{tp}} = 2.949 \times 10^3 \text{ kNm}$

4. Tulangan Geser

Kuat Geser oleh Beton (V_{cp})	= $3.145 \times 10^3 \text{ kN}$
------------------------------------	----------------------------------

Kuat Geser Ultimit (V_{up})	$= 1.18 \times 10^3 \text{ kN}$
Kuat Geser oleh Tulangan Geser (V_{sp})	$= 3.028 \times 10^3 \text{ kN}$
Luas Tulangan setiap Jarak (A_{vs})	$= 6.525 \text{ mm}$
Luas Tulangan Geser Minimum setiap Jarak (A_{vmins})	$= 0.083 \times \sqrt{f_c \times \frac{b_b}{f_y}} = 12.88 \text{ mm}$
Desain Korbel terhadap Geser	
Geser Friksi Ultimit (V_{ukor_Mid})	$= 2.044 \times 10^3 \text{ kN}$
(V_{ukor_End})	$= 1.975 \times 10^3 \text{ kN}$
Geser Friksi Nominal (V_{nkor_Mid})	$= 2.726 \times 10^3 \text{ kN}$
(V_{nkor_End})	$= 2.633 \times 10^3 \text{ kN}$
Periksa Tahanan Geser Nominal (V_{n1kor})	$= 2.253 \times 10^4 \text{ kN}$
(V_{n2kor})	$= 2.575 \times 10^6 \text{ kN}$
Desain Tulangan Geser Friksi (A_{vfkor})	$= \frac{0.05 \times A_{cvk}}{f_y} = 502.969 \text{ mm}^2$
Gaya Dalam Korbel (N_{ukor_Mid})	$= 408.879 \text{ kN}$
(N_{ukor_End})	$= 394.909 \text{ kN}$
Momen Ultimit Korbel (M_{ukor_Mid})	$= 879.091 \text{ kNm}$
(M_{ukor_End})	$= 849.055 \text{ kNm}$
Gaya Tarik Langsung (A_{nkor_Mid})	$= 1.825 \times 10^3 \text{ mm}^2$
(A_{nkor_End})	$= 1.763 \times 10^3 \text{ mm}^2$
(V_{n1kor})	$= 2.161 \times 10^3 \text{ mm}^2$
(V_{n2kor})	$= 2.098 \times 10^3 \text{ mm}^2$
Pad Persegi Interior (bo_1)	$= 4.82 \times 10^3 \text{ mm}$
Pad Persegi Eksterior (bo_2)	$= 4.51 \times 10^3 \text{ mm}$
Geser Nominal Interior (V_{ni})	$= 5.168 \times 10^3 \text{ kN}$
Geser Nominal Eksterior (V_{ne})	$= 4.836 \times 10^3 \text{ kN}$
Luas Tulangan tiap Jarak (A_{hr1s_Mid})	$= 0.715 \text{ mm}$
(A_{hr1s_End})	$= 0.8 \text{ mm}$
(A_{hr2s_Mid})	$= \frac{V_{nkor_Mid}}{f_y \times 6500} = 1.311 \text{ mm}$
(A_{hr2s_End})	$= \frac{V_{nkor_End}}{f_y \times 6500} = 1.266 \text{ mm}$

5. Desain Kuat Tumpuan

$$\begin{aligned} \text{Luas Dibawah } \textit{Bearing Pad} (A_{1bp}) &= 3.726 \times 10^5 \text{ mm}^2 \\ \text{Luas Fiktif Distribusi Beban dari} \\ \textit{Bearing Pad} (A_{2bp}) &= 1.522 \times 10^6 \text{ mm}^2 \\ \text{Faktor Tahanan} (\phi_c) &= 0.7 \\ \text{Faktor Modifikasi } \textit{Confinement} (m_c) &= 2 \\ \text{Tahanan } \textit{Bearing Normal} (P_n) &= 0.85 \times f_c \times A_{1bp} \times 2 = 2.217 \times 10^4 \text{ kN} \\ \text{Tahanan Aksial Terfaktor} (P_r) &= \phi_c \times P_n = 1.522 \times 10^4 \text{ kN} \end{aligned}$$

4.2.5. Perhitungan Perencanaan Pilar Tunggal

1. Data Eksisting Pilar

$$\begin{aligned} \text{Jari-Jari Penampang Pilar} (r_{pt}) &= 1000 \text{ mm} \\ \text{Tinggi Pilar} (H_{pt}) &= 6500 \text{ mm} \\ \text{Luas Penampang Pilar} (A_{pt}) &= 3.142 \times 10^6 \text{ mm}^2 \\ \text{Momen Inersia} (I_{pt}) &= 7.854 \times 10^{11} \text{ mm}^4 \\ \text{Radius Girasi Penampang} (r_{gpt}) &= 500 \text{ mm} \end{aligned}$$

2. Kategori Struktur

$$\begin{aligned} \text{Arah Longitudinal} (Q_{long}) &= \frac{P_{u1} \times \Delta o_1}{V_{u1} \times H_{pt}} = 0 \text{ (Struktur tidak bergoyang)} \\ \text{Arah Transversal} (Q_{trans}) &= \frac{P_{u2} \times \Delta o_2}{V_{u2} \times H_{pt}} = 0 \text{ (Struktur tidak bergoyang)} \end{aligned}$$

3. Periksa Kelangsingan dan Pembesaran Momen

$$\begin{aligned} \text{Arah Longitudinal} &= \frac{ky \times H_{pt}}{r_{gpt}} \leq 34 - \left(12 \times \frac{M_{1long}}{M_{2long}} \right) \\ \text{Arah Transversal} &= \frac{kx \times H_{pt}}{r_{gpt}} \leq 34 - \left(12 \times \frac{M_{1trans}}{M_{2trans}} \right) \\ \text{Rasio Aksial} &= \frac{0.4 \times E_c \times I_{pt}}{1 + \beta d} = 0.775 \\ \text{Beban Tekuk Euler} (P_e) &= \frac{\pi^2 \times EI}{(ky \times H_{pt})^2} = 2.413 \times 10^5 \text{ kN} \end{aligned}$$

4. Tulangan Lentur

$$\begin{aligned} \text{Luas Tulangan} (A_{gp}) &= \pi \times r_{pt}^2 = 3.142 \times 10^6 \text{ mm}^2 \\ \text{Beban Terpusat} (P_{nmax}) &= 0.8 \times (0.85 \times f_c \times (A_{gp} - A_{st}) + f_{yp} \times A_{st}) \end{aligned}$$

$$= 8.984 \times 10^6 \text{ mm}^2$$

$$\text{Lentur Murni (M}_{No}\text{)} = A s_t \times f_y \times \left(d - \frac{a_m}{2} \right) = 259.522 \text{ mm}$$

$$\text{Compression Control (C}_c\text{)} = 0.85 \times f_c \times D \times a_m' \times 10^{-3} = 8.675 \text{ kN}$$

$$(P_{np}) = 4.251 \times 10^4 \text{ kN}$$

$$(M_{np}) = 1.418 \times 10^4 \text{ kNm}$$

$$\text{Tension Control (T}_c\text{)} = 0.85 \times f_c \times D \times a_m'' \times 10^{-3} = 7.229 \text{ kN}$$

$$(P_{np}) = 1.161 \times 10^4 \text{ kN}$$

$$(M_{np}) = 3.902 \times 10^4 \text{ kNm}$$

5. Tulangan Geser

$$\text{Momen Plastis Longitudinal (M}_{pLong}\text{)} = M_{nLong} \times f_s = 2.217 \times 10^4 \text{ kNm}$$

$$\text{Kapasitas Geser Longitudinal (V}_{kapLong}\text{)} = \frac{M_{pLong}}{H_{pt}} = 3.41 \times 10^4 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen Plastis Transversal (M}_{pTrans}\text{)} = M_{nTrans} \times f_s = 2.217 \times 10^4 \text{ kNm}$$

$$\text{Kapasitas Geser Transversal (V}_{kapTans}\text{)} = \frac{M_{pTrans}}{H_{pt}} = 3.41 \times 10^4 \text{ kNm}$$

$$\text{Confinement (hc}_{Long}\text{)} = H_{pt} - 2 \times dc = 6.4 \times 10^3 \text{ mm}$$

$$\text{Confinement (hc}_{Trans}\text{)} = r_{pt} - 2 \times dc = 900 \text{ mm}$$

$$\text{Luas Inti Pilar (A}_c\text{)} = hc_{Long} \times hc_{Trans} = 5.76 \times 10^6 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas Penampang Longitudinal (Ash}_{Long}\text{)} = 0.12 \times s_s \times hc_{Long} \times \frac{f_c}{f_y} = 8.4 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas Penampang Transversal (Ash}_{Trans}\text{)} = 0.12 \times s_s \times hc_{Trans} \times \frac{f_c}{f_y} = 1.181 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas Tulangan Geser (AV}_{Long}\text{)} = Ash_{Long}$$

$$\text{Luas Tulangan Geser (AV}_{Trans}\text{)} = Ash_{Trans}$$

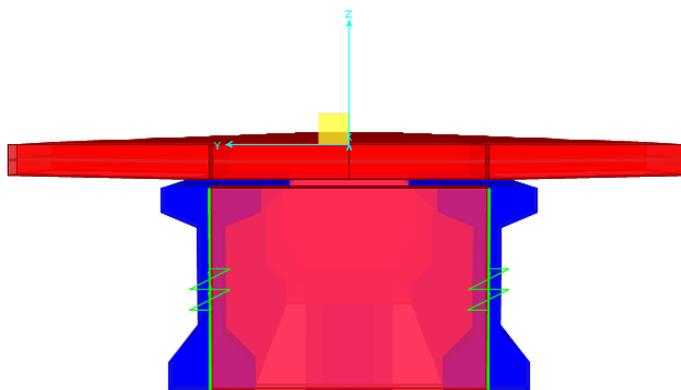
4.3. 3D Finite Element Model Jembatan Tugu Suharto

Pemodelan elemen hingga jembatan Tugu Suharto menggunakan *software CSi Bridge version 21*. Model dibuat semirip mungkin dengan kondisi eksisting jembatan Tugu Suharto. Dalam proses pembuatan model akan dilakukan penyesuaian tertentu karena keterbatasan fitur pada *software CSi Bridge version 21* atau karena keterbatasan pengetahuan peneliti terkait penyesuaian pembuatan model mendekati aslinya. Penyesuaian dapat berupa bentuk atau dimensi suatu elemen pada jembatan Tugu Suharto atau pada sifat-sifat material yang digunakan. Namun secara garis besar pembuatan model elemen hingga jembatan Tugu Suharto tetap mengacu pada pedoman-pedoman yang sudah ditentukan sebelumnya seperti data perhitungan manual desain jembatan mengacu Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga Nomor 06/SE/Db/2021 dan data *design engineering drawing* (DED) jembatan Tugu Suharto.

4.3.1. 3D Finite Element Model Struktur Bangunan Atas (*Superstructure*)

1. Bridge Deck

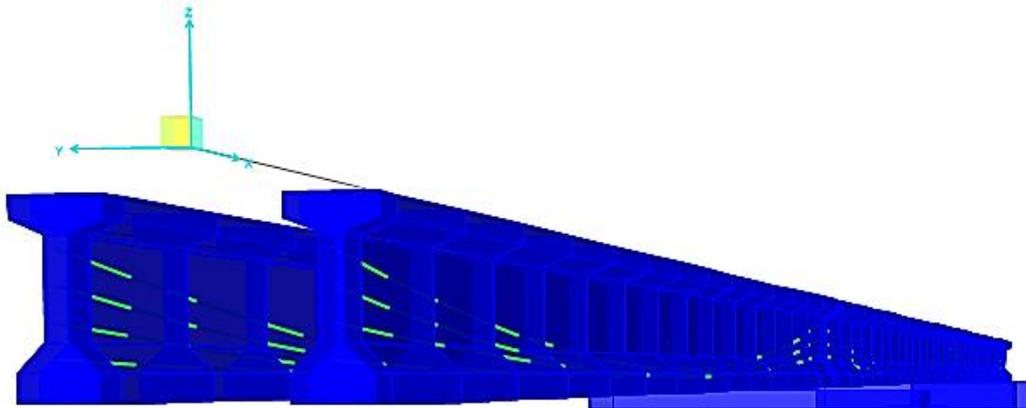
Deck jembatan Tugu Suharto merupakan penggabungan elemen-elemen jembatan menjadi satu sistem struktur bangunan atas (*superstructure*) yaitu plat lantai jembatan, gelagar, dan diafragma. Model *deck* jembatan Tugu Suharto dapat dilihat pada gambar dibawah ini,



Gambar 4.12 Pemodelan *deck* jembatan Tugu Suharto.

2. Gelagar

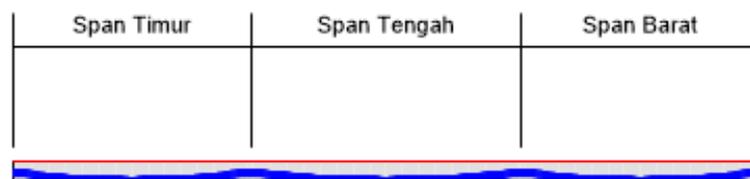
Pemodelan gelagar jembatan Tugu Suharto menggunakan *software CSi Bridge version 21* berdasarkan data yaitu terdiri dua buah gelagar I pada tiap bentang. Berikut model 3D gelagar jembatan Tugu Suharto,



Gambar 4.13 Pemodelan 3D gelagar jembatan Tugu Suharto.

3. Tendon

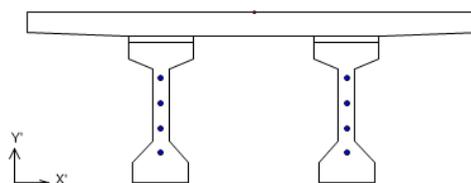
Data *layout* tendon yang berupa letak, posisi dan dimensi tendon menjadi dasar pembuatan model tendon pada gelagar jembatan Tugu Suharto. Berikut pemodelan tendon sesuai *layout* tendon jembatan Tugu Suharto,



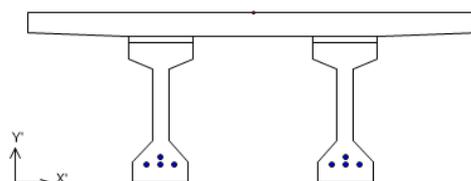
Gambar 4.14 *Layout* tendon tampak samping.



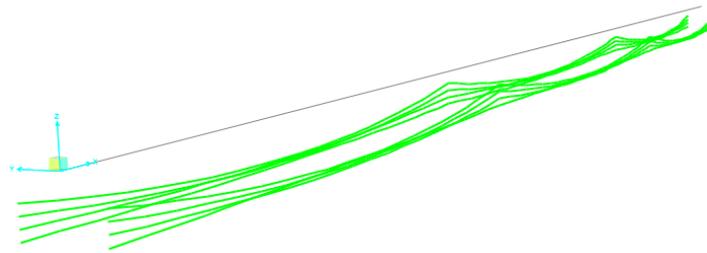
Gambar 4. 15 *Layout* tendon tampak atas.



Gambar 4.16 Posisi tendon pada ujung gelagar.



Gambar 4. 17 Posisi tendon pada tengah gelagar.



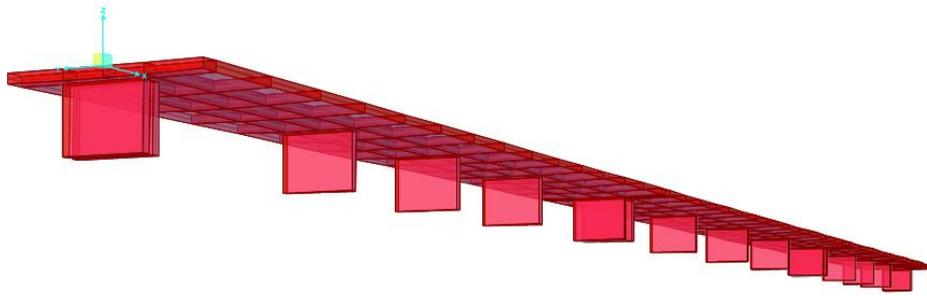
Gambar 4.18 Model 3D tendon jembatan Tugu Suharto.

4. Diafragma

Berdasarkan data *design engineering drawing* (DED) dan data observasi jembatan terdapat 5 buah diafragma pada setiap bentang di jembatan Tugu Suharto. Pada setiap bentang terdiri dari dua diafragma ujung dan tiga diafragma tengah. Berikut pemodelan diafragma jembatan Tugu Suharto menggunakan *software CSi Bridge version 21*,

In-Span Cross-Diaphragm Definition						
Span	Diaphragm Property	Location	Bearing	Distance	Ref Line	
Span Timur	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	400,	Layout Line	
Span Timur	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	8125,	Layout Line	
Span Timur	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	13900,	Layout Line	
Span Timur	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	19675,	Layout Line	
Span Timur	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	27400,	Layout Line	
Span Tengah	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	400,	Layout Line	
Span Tengah	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	8100,	Layout Line	
Span Tengah	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	15900,	Layout Line	
Span Tengah	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	23700,	Layout Line	
Span Tengah	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	31400,	Layout Line	
Span Barat	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	400,	Layout Line	
Span Barat	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	8125,	Layout Line	
Span Barat	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	13900,	Layout Line	
Span Barat	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	19675,	Layout Line	
Span Barat	DIAPHRAGM	All Spaces	Default	27400,	Layout Line	

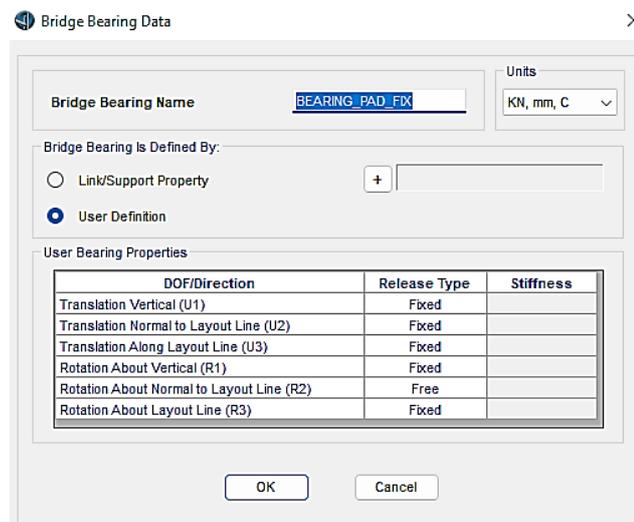
Gambar 4.19 Letak diafragma pada setiap bentang jembatan Tugu Suharto.



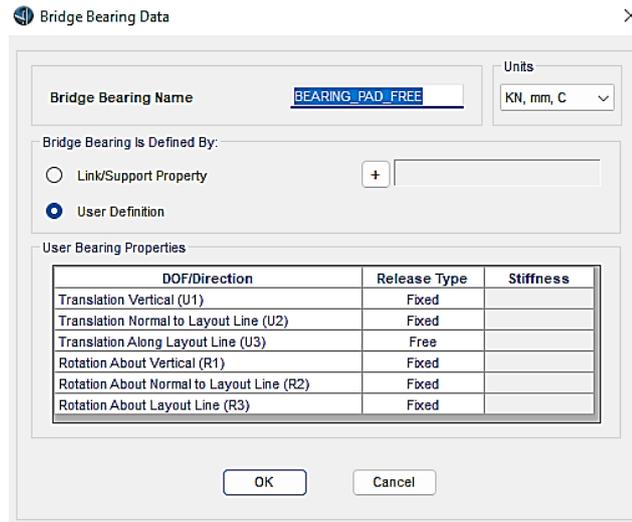
Gambar 4.20 Model 3D diafragma jembatan Tugu Suharto.

5. *Bearing Pad*

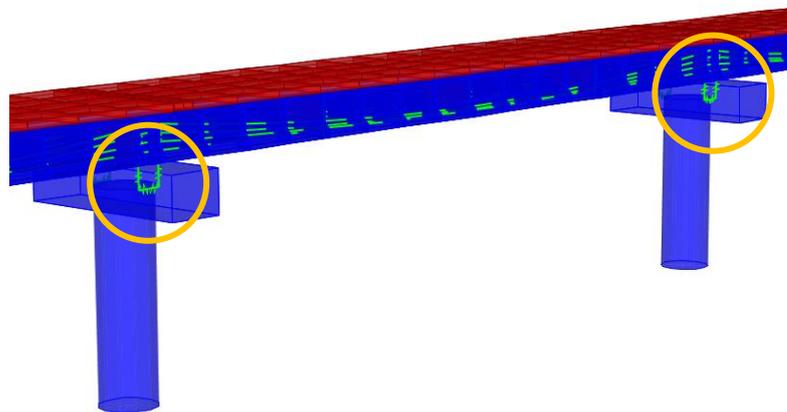
Struktur tumpuan atau *bearing pad* untuk menerima beban bangunan atas dan lalu lintas yang selanjutnya diteruskan ke struktur bangunan bawah jembatan pada jembatan Tugu Suharto menggunakan *rubber pad*. Penyederhanaan dilakukan pada pemodelan struktur tumpuan jembatan Tugu Suharto. Tumpuan dianggap menggunakan tumpuan sendi dan tumpuan rol. Berikut pemodelan tumpuan jembatan Tugu Suharto.



Gambar 4.21 Pemodelan tumpuan sendi.



Gambar 4.22 Pemodelan tumpuan rol.

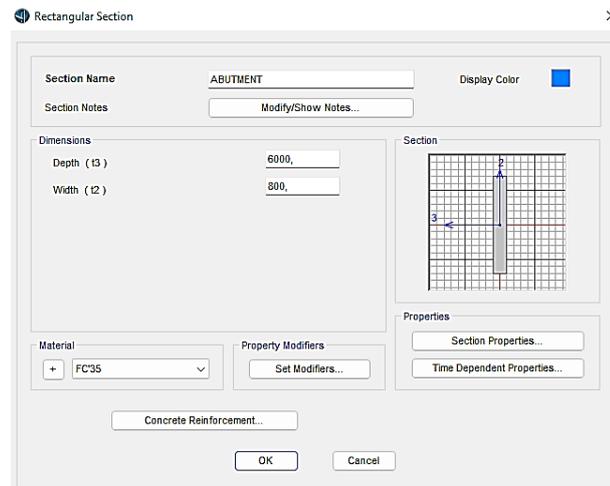


Gambar 4.23 Model 3D struktur tumpuan jembatan Tugu Suharto.

4.3.2. 3D Finite Element Model Struktur Bangunan Bawah (Substructure)

1. Abutmen

Pemodelan pada abutmen jembatan Tugu Suharto dilakukan penyederhaan pada bentuk penampang abutmennya. Model abutmen dibuat dengan bentuk balok sederhana mengadaptasi dimensi panjang, lebar dan tinggi dari data *design engineering drawing* (DED) jembatan Tugu Suharto.



Gambar 4.24 Penyederhanaan dimensi model abutmen.

Kemudian dilakukan penyesuaian *material properties* bertujuan untuk mendapatkan model abutmen dengan *material properties* yang sama dengan data *design engineering drawing* (DED) walaupun telah dilakukan penyederhanaan pada dimensi model abutmennya. *Material properties* abutmen jembatan didapatkan dari perhitungan berdasarkan Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga Nomor 06/SE/Db/2021 yang mengacu data *design engineering drawing* (DED) jembatan Tugu Suharto. Perhitungan yang dilakukan terkait berat struktur abutmen eksisting jembatan Tugu Suharto yang akan dimasukkan kedalam penyesuaian pada *section properties* model abutmen jembatan. Berikut perhitungan berat total struktur abutmen jembatan Tugu Suharto,

$$W_{abt} = A_{abt} \cdot P_{abt} \cdot \gamma_c \dots\dots\dots(3)$$

Dengan,

W_{abt} = Berat sendiri total abutmen (kN)

A_{abt} = Luas penampang abutmen (m²)

P_{abt} = Panjang abutmen (m)

γ_c = Berat jenis beton (kN/m³)

Untuk perhitungan berat total abutmen adalah,

A_{abt} = 6,189 m²

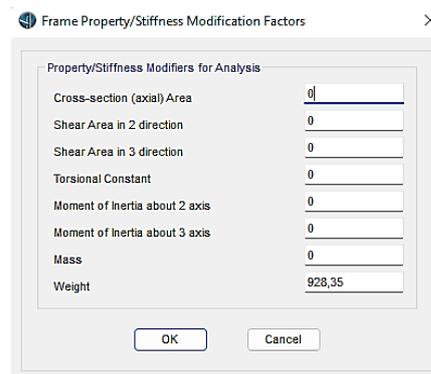
P_{abt} = 6 m

γ_c = 25 kN/m³

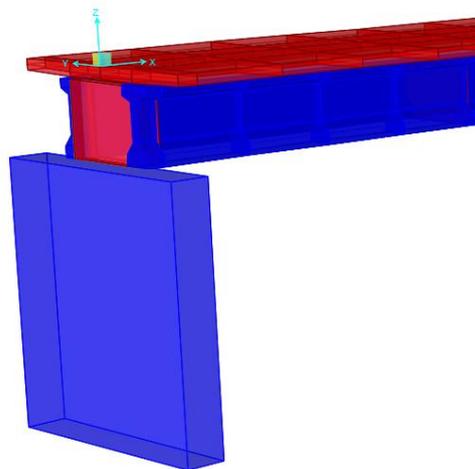
Maka,

$$W_{abt} = 928,35 \text{ kN}$$

Nilai berat total abutmen jembatan diinput pada fitur *property/stiffness modification* untuk menyesuaikan berat total abutmen jembatan eksisting ke berat total abutmen model jembatan Tugu Suharto. Dengan penyesuaian ini penyerderhanaan pada dimensi tidak akan mengurangi kapasitas struktur abutmen pada model jembatan Tugu Suharto.



Gambar 4.25 Penyesuaian berat total abutmen model jembatan.

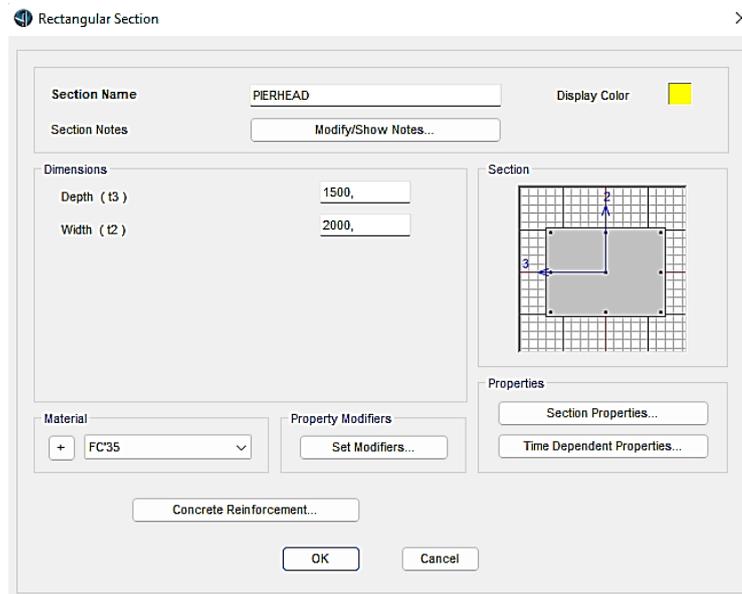


Gambar 4.26 Model 3D abutmen jembatan Tugu Suharto.

2. Pier Head

Penyederhaan juga dilakukan pada proses pembuatan model untuk struktur *pier head* atau kepala pilar jembatan Tugu Suharto. Pemodelan mengadaptasi data panjang, lebar dan tinggi menjadi bentuk balok sederhana untuk pilar

jembatan Tugu Suharto. Berikut pemodelan *3D pier head* jembatan Tugu Suharto.



Gambar 4.27 Penyederhanaan dimensi model *pier head*.

Penyesuaian *material properties* juga dilakukan untuk mendapatkan model kepala pilar dengan *material properties* yang sama dengan data *design engineering drawing* (DED) walaupun telah dilakukan penyederhanaan pada dimensi model abutmennya. Berikut perhitungan berat kepala pilar jembatan berdasarkan data *design engineering drawing* (DED) jembatan Tugu Suharto,

$$W_{ph} = A_{ph} \cdot P_{ph} \cdot \gamma_c \dots\dots\dots(4)$$

Dengan,

W_{ph} = Berat sendiri total kepala pilar (kN)

A_{ph} = Luas penampang kepala pilar (m²)

P_{ph} = Panjang kepala pilar (m)

γ_c = Berat jenis beton (kN/m³)

Untuk perhitungan berat total kepala pilar adalah,

$$A_{ph} = 7,375 \text{ m}^2$$

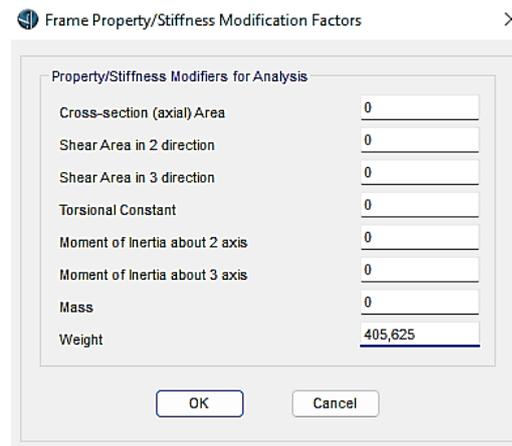
$$P_{ph} = 2,2 \text{ m}$$

$$\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$$

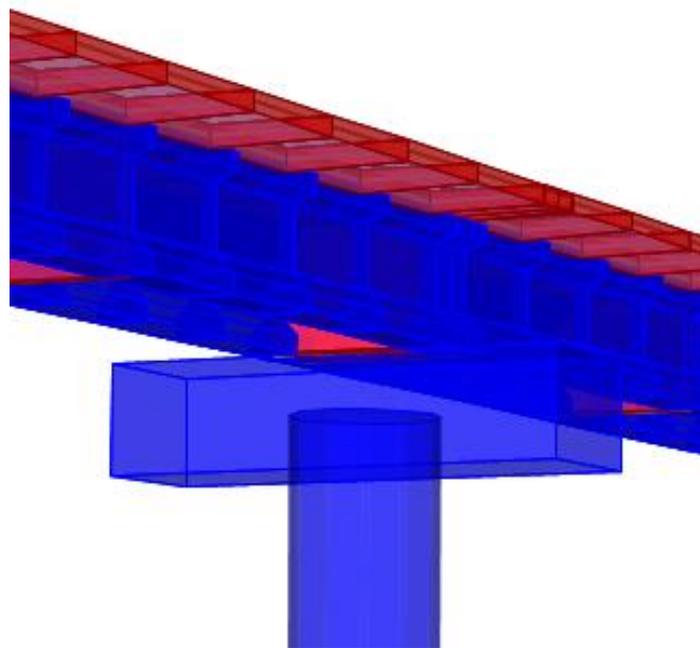
Maka,

$$W_{ph} = 405,625 \text{ kN}$$

Nilai berat total abutmen jembatan diinput pada fitur *property/stiffness modification* untuk menyesuaikan berat total kepala pilar jembatan eksisting ke berat total kepala pilar model jembatan Tugu Suharto. Dengan penyesuaian ini penyerderhanaan pada dimensi tidak akan mengurangi kapasitas struktur kepala pilar pada model jembatan Tugu Suharto.



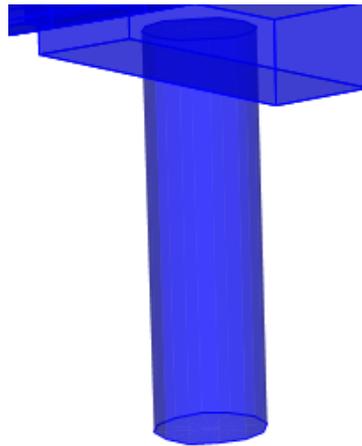
Gambar 4. 28 Penyesuaian berat total kepala pilar model jembatan.



Gambar 4.29 Model 3D pier head jembatan Tugu Suharto.

3. Pier Column

Pembuatan model *pier column* atau pilar jembatan Tugu Suharto tidak dilakukan penyederhaan. Berikut model 3D pilar jembatan,



Gambar 4.30 Model 3D *pier column* atau pilar jembatan Tugu Suharto.

Dikarenakan keterbatasan data yang diperoleh maka pemodelan pada struktur bangunan bawah jembatan Tugu Suharto hanya sampai pada struktur pilar jembatan saja. Dilakukan penyesuaian pada model struktur jembatan Tugu Suharto pada struktur pilar akan dianggap sendi jepit untuk merepresentasikan sambungan pilar dengan *pile cap* jembatan yang tidak dimodelkan.

4.3.3. 3D Finite Element Model Keseluruhan Jembatan Tugu Suharto

Pemodelan telah sampai pada tahap keseluruhan dan siap untuk digunakan pada proses selanjutnya yaitu analisis *finite element model* jembatan Tugu Suharto menggunakan *software CSi Bridge version 21*. Berikut keseluruhan model jembatan Tugu Suharto,



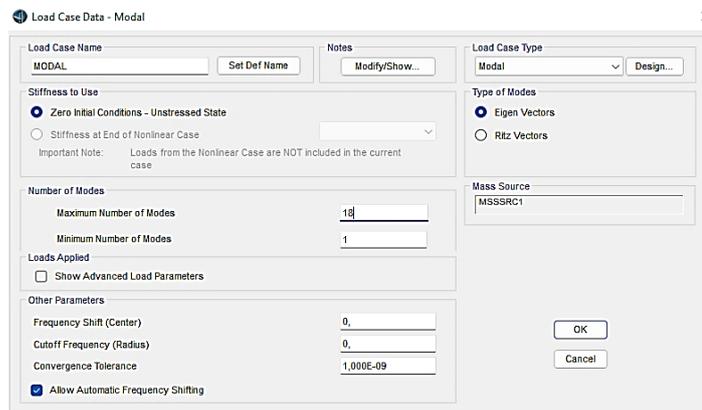
Gambar 4.31 Model 3D keseluruhan jembatan Tugu Suharto.

4.4. Analisis 3D Finite Element Model Jembatan Tugu Suharto

4.4.1. Analisis Modal

Analisis *modal* pada 3D *finite element model* jembatan Tugu Suharto menggunakan *software CSi Bridge version 21* dilakukan dengan fitur *run analyze*.

Load case yang digunakan adalah *modal* yang tersedia secara *default* pada *software CSI Bridge version 21*. Nilai frekuensi alami dan ragam getar dari model struktur jembatan Tugu Suharto akan didapat setelah dilakukan analisis *modal*. Jumlah ragam getar *output* dibatasi 18 *mode shape* yang akan ditampilkan. Menggunakan *Eigen Vector* secara *default* pada tipe analisis *modal* yang akan dilakukan.



Gambar 4.32 *Load case modal*.

4.5. Hasil Analisis 3D Finite Element Model Jembatan Tugu Suharto

4.5.1. Frekuensi

Setelah menjalankan analisis *modal* pada model jembatan Tugu Suharto didapatkan nilai frekuensi dari tiap-tiap ragam getar. Setiap pola ragam getar (*mode shape*) yang ditampilkan juga memuat nilai periode getar yang terjadi dengan satuan waktu. Hasil yang didapatkan bahwa nilai frekuensi terkecil pada pola ragam getar (*mode shape*) ke-1 dengan nilai periode getar paling besar. Nilai frekuensi terbesar pada pola ragam (*mode shape*) ke-18 dengan nilai periode getar paling kecil. Berikut nilai frekuensi pada pola ragam getar (*mode shape*) hasil analisis *modal software CSI Bridge version 21* yang dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.11 Hasil frekuensi dan periode tiap *mode shape*.

<i>Mode Number</i>	<i>Output Case</i>	<i>T (sec)</i>	<i>f (Hz)</i>
1	MODAL	0.37923	2.63689
2	MODAL	0.25351	3.94456
3	MODAL	0.21452	4.66158
4	MODAL	0.17724	5.64213
5	MODAL	0.15956	6.26708

6	MODAL	0.14445	6.92301
7	MODAL	0.13631	7.33602
8	MODAL	0.12872	7.76906
9	MODAL	0.11873	8.42277
10	MODAL	0.10435	9.58295
11	MODAL	0.08403	11.9044
12	MODAL	0.07442	13.4412
13	MODAL	0.07041	14.2055
14	MODAL	0.06784	14.7404
15	MODAL	0.06255	15.9872
16	MODAL	0.05722	17.4756
17	MODAL	0.05506	18.1627
18	MODAL	0.05281	18.9375

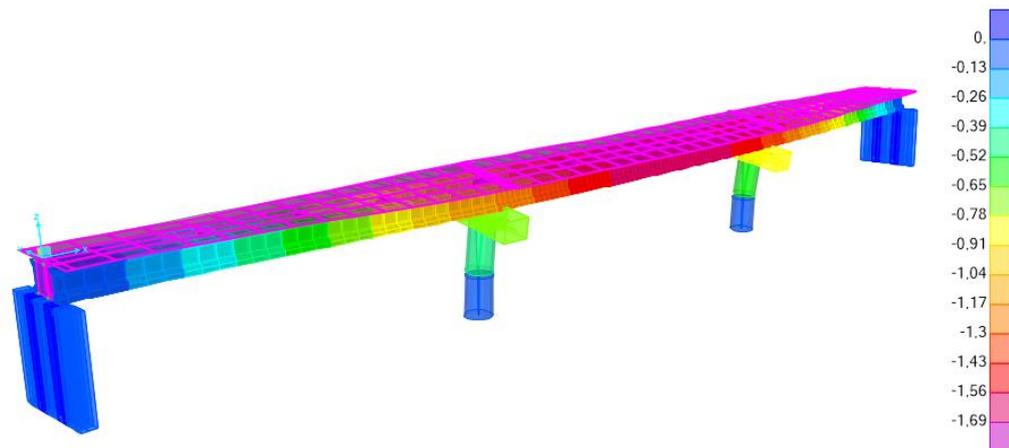
Dapat dilihat pada tabel hasil frekuensi dan periode getar tiap *mode shape* bahwa nilai frekuensi terendah pada *mode shape* ke-1 yaitu 2,63689 Hz dengan nilai periode getar tertinggi yaitu 0,37923 detik. Kemudian dapat dilihat pula bahwa pada *mode shape* ke-18 memiliki nilai frekuensi tertinggi yaitu 18,9375 Hz dengan 0,05281 detik untuk nilai periode getarnya yang merupakan nilai terkecil dari periode getar hasil daripada analisis *modal software CSi Bridge version 21* untuk model jembatan Tugu Suharto.

4.5.2. Pola Ragam Getar (*Mode Shape*)

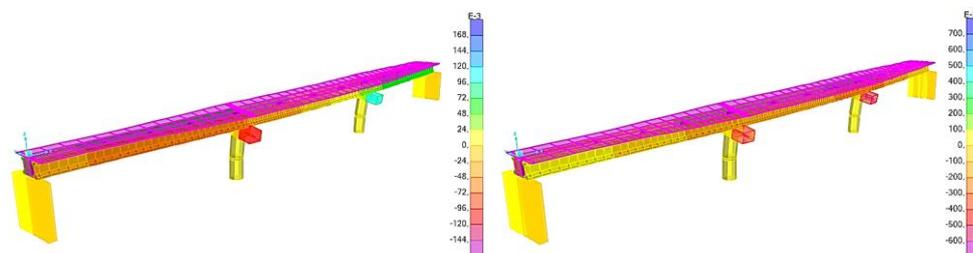
Bentuk atau pola ragam getar (*mode shape*) hasil *output* analisis *modal software CSi Bridge* dapat ditampilkan dengan fitur *deformed shape*. Bentuk deformasi akan ditampilkan terdiri dari tiga arah yaitu deformasi secara longitudinal searah sumbu X, deformasi secara transversal searah sumbu Y dan tegak lurus sumbu X, dan deformasi vertikal searah sumbu Z pada *3D finite element model* jembatan Tugu Suharto. Pada masing-masing pola ragam getar mengalami deformasi dalam tiga arah deformasi ini. Setiap pola ragam getar yang ditampilkan akan memperlihatkan bentuk gerakan deformasi yang merepresentasikan arah deformasi dengan nilai *displacement* paling dominan atau paling besar. Nilai *displacement* pada *mode shape* akan ditampilkan dalam kontur warna dengan masing-masing warna merepresentasikan nilai *displacement* sesuai dengan nilai parameter kontur warna yang secara *default* ditampilkan *software CSi Bridge*

version 21. Arah *displacement* didefinisikan menggunakan simbol (+) dan (-) pada nilai *displacement* yang ditampilkan bahwa keduanya memiliki arah yang berlawanan secara longitudinal, transversal maupun vertikal.

1. Mode Shape ke-1



Gambar 4.33 Mode shape ke-1 deformasi sumbu Y (dominan).

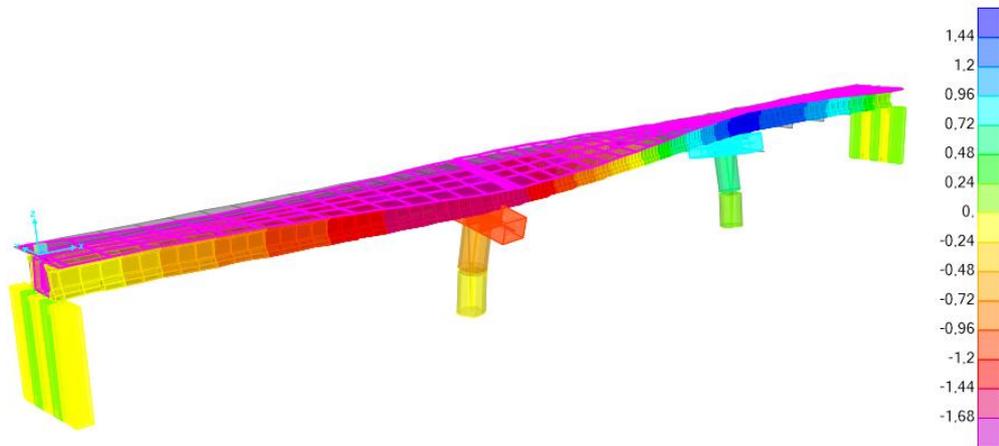


Gambar 4.34 Mode shape ke-1 deformasi sumbu X dan Z.

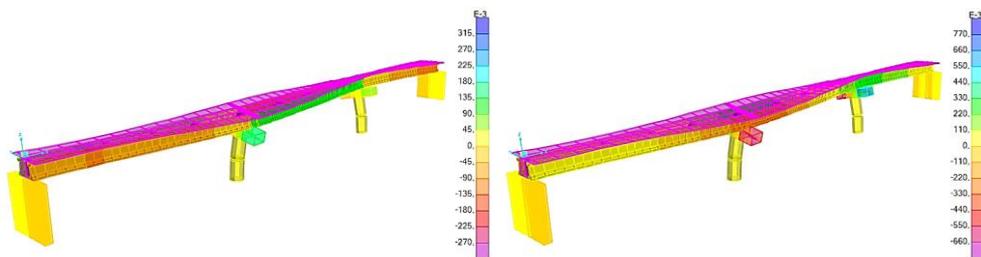
Pada pola ragam pertama terlihat deformasi yang terjadi dominan pada arah transversal searah dengan sumbu Y pada model jembatan Tugu Suharto. Maka parameter nilai *displacement* yang berupa kontur warna hanya ditampilkan nilai arah sumbu Y. Dapat dilihat pada gambar di atas bahwa deformasi arah transversal terjadi pada hampir seluruh bentang model jembatan. Didapatkan nilai tertinggi *displacement* yaitu -1,69 mm yang berkontur warna ungu. Jika dilihat pada *mode shape* ke-1 kontur warna ungu berada pada bagian tengah keseluruhan bentang model jembatan. Pada bagian ujung model jembatan memiliki nilai *displacement* yang cenderung kecil sesuai dengan kontur warna biru dengan rentang nilai 0 hingga -0,13 mm saja. Begitu juga dengan elemen lain seperti abutmen dan bagian bawah pilar model jembatan. Perbandingan deformasi ditampilkan pada sumbu lain yaitu sumbu X dan Z yang memiliki

kontur warna dengan nilai *displacement* yang lebih kecil daripada sumbu Y membuktikan deformasi pada *mode shape* ke-1 dominan terjadi secara transversal pada arah sumbu Y.

2. *Mode Shape* ke-2



Gambar 4.35 *Mode shape* ke-2 deformasi sumbu Y (dominan).

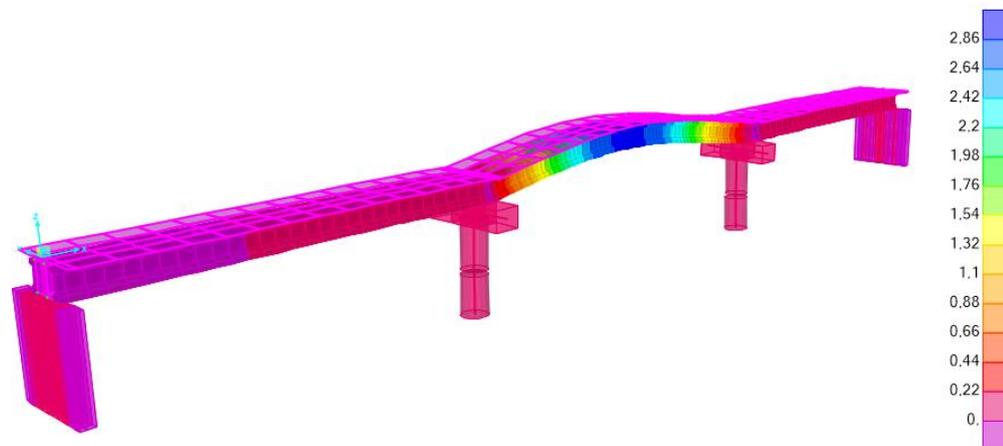


Gambar 4.36 *Mode shape* ke-2 deformasi sumbu X dan Z.

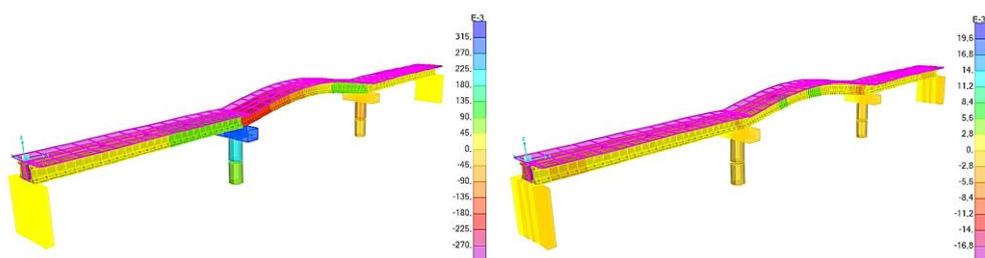
Terlihat hampir sama dengan *mode shape* pertama, deformasi pada *mode shape* ke-2 juga terjadi pada arah transversal searah dengan sumbu Y pada model jembatan Tugu Suharto. Namun berbeda karena terjadi deformasi transversal dengan 2 arah secara transversal yang saling berlawanan. Pada gambar di atas dapat dilihat bahwa deformasi pada bagian 1/3 bentang berlawanan arah dengan deformasi pada bagian 2/3 bentang secara transversal. Nilai *displacement* pada bagian 1/3 bentang yaitu -1,68 mm disimbolkan dengan kontur warna ungu. Sedangkan pada bagian 2/3 bentang memiliki kontur warna biru dengan nilai *displacement* tertingginya yaitu 1,44 mm. Pada elemen pilar pada 1/3 dan 2/3 bentang model jembatan juga terjadi deformasi dengan nilai *displacement* yang lebih kecil jika dibandingkan dengan elemen di atasnya. Perbandingan deformasi ditampilkan pada sumbu lain yaitu sumbu X dan Z yang memiliki kontur warna

dengan nilai *displacement* yang lebih kecil daripada sumbu Y membuktikan deformasi pada *mode shape* ke-2 dominan terjadi secara transversal pada arah sumbu Y.

3. *Mode Shape* ke-3



Gambar 4.37 *Mode shape* ke-3 deformasi sumbu Z (dominan).



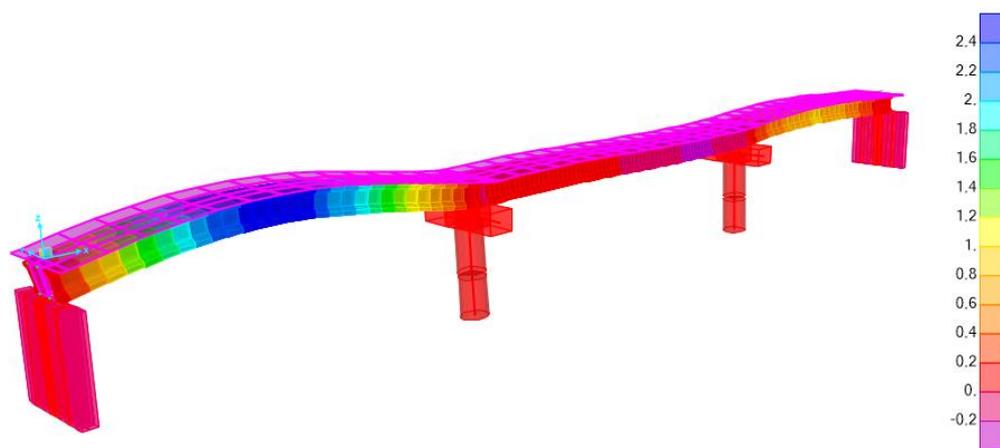
Gambar 4.38 *Mode shape* ke-3 deformasi sumbu X dan Y.

Deformasi yang terjadi pada ragam getar (*mode shape*) ke-3 dominan ke arah vertikal searah dengan sumbu Z pada model jembatan di atas. Pada *mode shape* ke-3 ditampilkan parameter nilai *displacement* arah Z beserta kontur warnanya. Hanya bentang tengah atau bentang kedua model jembatan Tugu Suharto yang mengalami deformasi dengan nilai *displacement* yang cukup besar. Kontur berwarna biru dengan nilai *displacement* 2,86 mm terjadi pada bagian tengah bentang kedua model jembatan Tugu Suharto. Pada bentang pertama dan bentang ketiga mengalami deformasi dengan nilai *displacement* yang cenderung sangat kecil karena berkontur warna ungu yang rentang nilainya 0 hingga 0,22 mm. Elemen lain seperti abutmen, kepala pilar dan pilar juga mengalami hal yang sama bahwa nilai *displacement* cenderung sangat kecil hingga mungkin bernilai 0 pada kontur warna ungu. Perbandingan deformasi ditampilkan pada

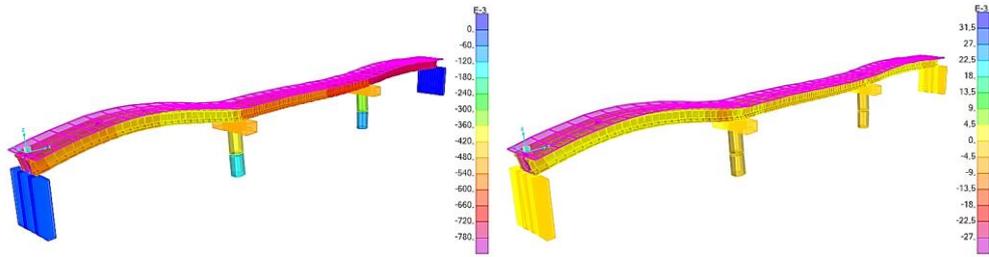
sumbu lain yaitu sumbu X dan Y yang memiliki kontur warna dengan nilai *displacement* yang lebih kecil daripada sumbu Z membuktikan deformasi pada *mode shape* ke-3 dominan terjadi secara vertikal pada arah sumbu Z.

4. *Mode Shape* ke-4

Bentuk pola ragam getar (*mode shape*) ke-4 sejenis dengan *mode shape* ke-3, yang membedakan adalah deformasi yang terjadi pada bentang pertama dan bentang ketiga dengan nilai *displacement* tertinggi masing-masing 2,4 dan 1 mm yang kontur warna biru pada bentang pertama dan kontur warna kuning pada bentang ketiga. Sebenarnya jika dilihat pada gambar bentang kedua atau bentang tengah juga mengalami deformasi dengan nilai *displacement* -0,2 mm dengan kontur warna ungu yang cenderung kecil jika dibandingkan dengan bentang lainnya. Kemudian pada elemen lain model jembatan Tugu Suharto yaitu abutmen dan pilar jembatan tidak mengalami atau mengalami deformasi dengan nilai *displacement* yang relatif sangat kecil disimbolkan dengan kontur warna merah. Perbandingan deformasi ditampilkan pada sumbu lain yaitu sumbu X dan Y yang memiliki kontur warna dengan nilai *displacement* yang lebih kecil daripada sumbu Z membuktikan deformasi pada *mode shape* ke-4 dominan terjadi secara vertikal pada arah sumbu Z.



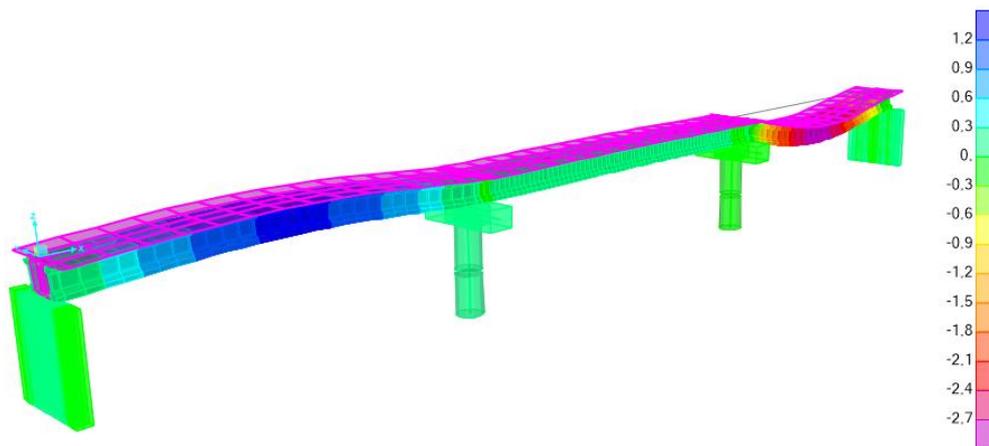
Gambar 4.39 *Mode shape* ke-4 deformasi sumbu Z (dominan).



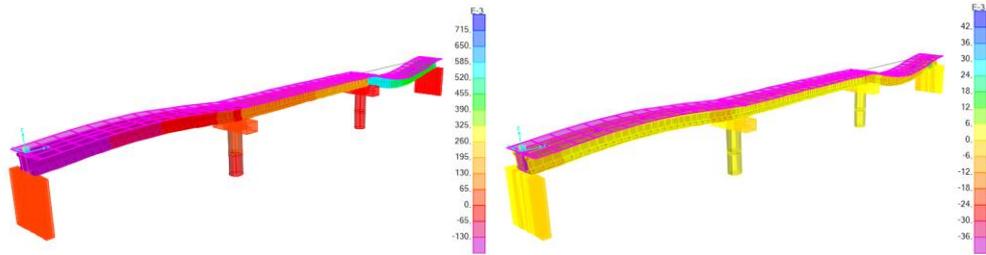
Gambar 4.40 *Mode shape* ke-4 deformasi sumbu X dan Y.

5. *Mode Shape* ke-5

Dilihat pada gambar di atas bahwa deformasi yang terjadi sama dengan *mode shape* sebelumnya pada bentang pertama dan bentang ketiga model jembatan Tugu Suharto. Perbedaan terletak pada nilai *displacement* pada bentang pertama lebih kecil daripada bentang ketiga. Pada bentang pertama dengan kontur warna biru rentang nilai *displacement* nya 0,6 hingga 1,2 mm. Kemudian untuk bentang ketiga dengan kontur warna ungu nilai *displacement* maksimalnya adalah -2,7 mm. Bentang tengah, abutmen dan pilar tidak mengalami deformasi secara vertikal terlihat pada kontur warna hijau dengan rentang nilai *displacement* hanya 0. Perbandingan deformasi ditampilkan pada sumbu lain yaitu sumbu X dan Y yang memiliki kontur warna dengan nilai *displacement* yang lebih kecil daripada sumbu Z membuktikan deformasi pada *mode shape* ke-5 dominan terjadi secara vertikal pada arah sumbu Z.

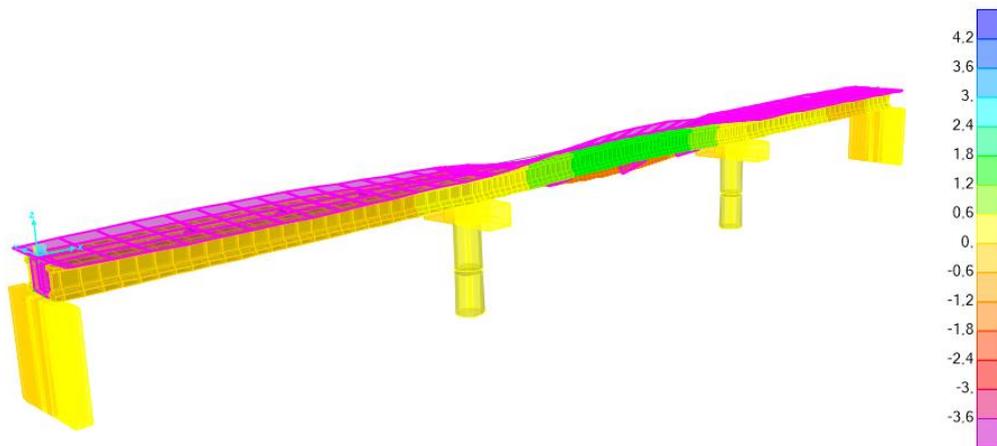


Gambar 4.41 *Mode shape* ke-5 deformasi sumbu Z (dominan).

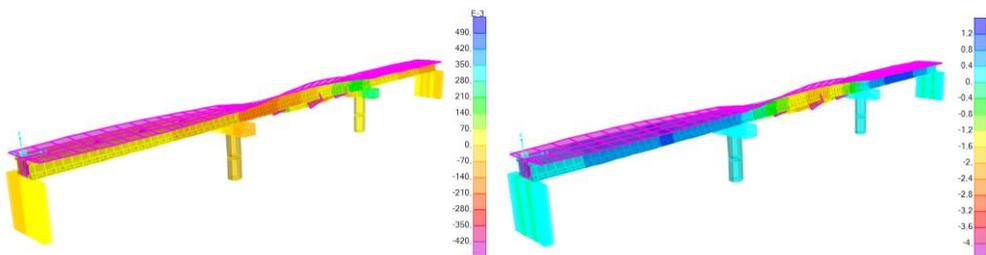


Gambar 4.42 *Mode shape* ke-5 deformasi sumbu X dan Y.

6. *Mode Shape* ke-6



Gambar 4.43 *Mode shape* ke-6 deformasi sumbu Z (dominan).

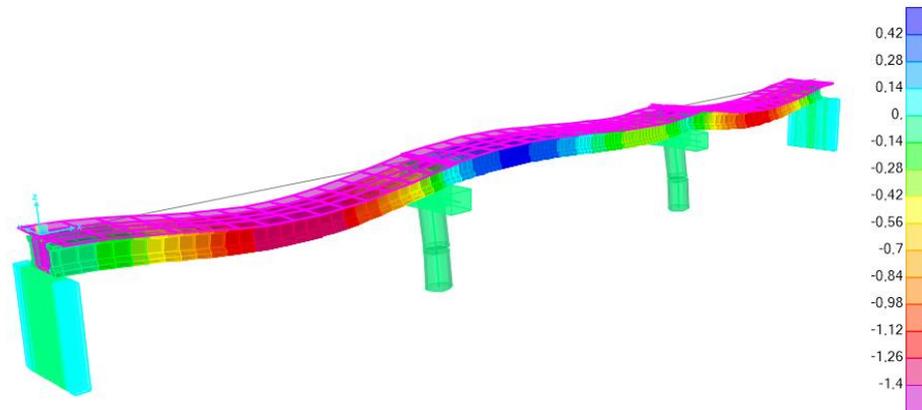


Gambar 4.44 *Mode shape* ke-6 deformasi sumbu X dan Y.

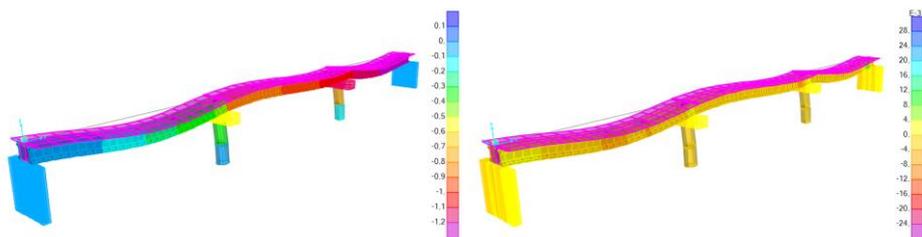
Pada *mode shape* ke-6 terlihat bahwa bentuk pola ragam getar pada gelagar di bentang tengah model mengalami deformasi vertikal yang berbeda arah. Pada gelagar kiri arah deformasinya berlawanan dengan gelagar sebelah kanan bentang tengah. Nilai *displacement* gelagar kiri dengan kontur warna merah hingga ungu yang rentang nilainya -1,8 hingga -3,6 mm. Sedangkan pada gelagar kanan dengan kontur warna hijau rentang nilai *displacement* adalah 0,6 hingga 1,6 mm. Perbandingan deformasi ditampilkan pada sumbu lain yaitu sumbu X dan Y yang memiliki kontur warna dengan nilai *displacement* yang lebih kecil

daripada sumbu Z membuktikan deformasi pada *mode shape* ke-6 dominan terjadi secara vertikal pada arah sumbu Z.

7. Mode Shape ke-7



Gambar 4.45 Mode shape ke-7 deformasi sumbu Z (dominan).



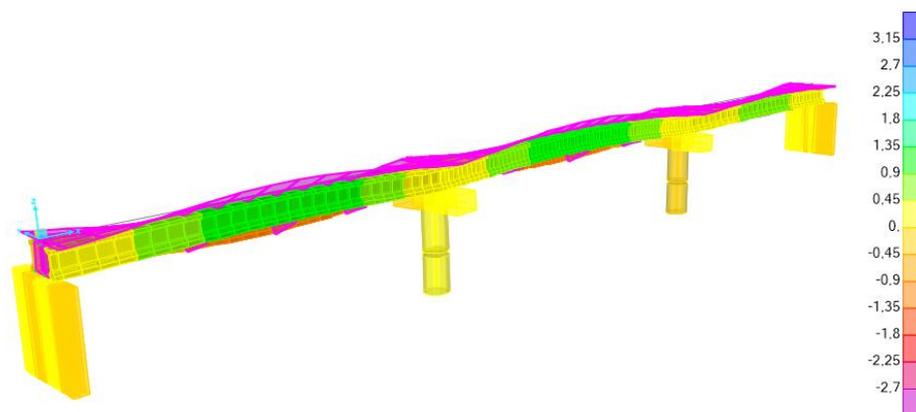
Gambar 4.46 Mode shape ke-8 deformasi sumbu X dan Y.

Bentang tengah mengalami deformasi vertikal dengan 2 arah sekaligus. Kontur warna pada bentang tengah yaitu biru berlawanan dengan kontur berwarna hijau. Masing-masing nilai *displacement* pada bentang tengah adalah 0,42 dan -0,42 mm. Dua arah yang berlawanan pada satu bentang dengan nilai *displacement* absolut yang sama menandakan ragam getar membentuk 1 gelombang sinus. Kemudian pada bentang pertama dan ketiga mengalami deformasi vertikal yang sama dengan kontur warna merah yang rentang nilainya -1,12 hingga -1,26 mm. Akibat bentuk ragam getar di atas pada elemen pilar model jembatan juga mengalami deformasi longitudinal searah dengan sumbu X pada model elemen hingga jembatan Tugu Suharto. Namun karena deformasi yang terjadi adalah dominan pada bangunan struktur atas yang mengalami deformasi vertikal maka kemudian parameter nilai *displacement* searah dengan sumbu X tidak ditampilkan. Perbandingan deformasi ditampilkan pada sumbu lain yaitu sumbu X dan Y yang memiliki kontur warna dengan nilai *displacement*

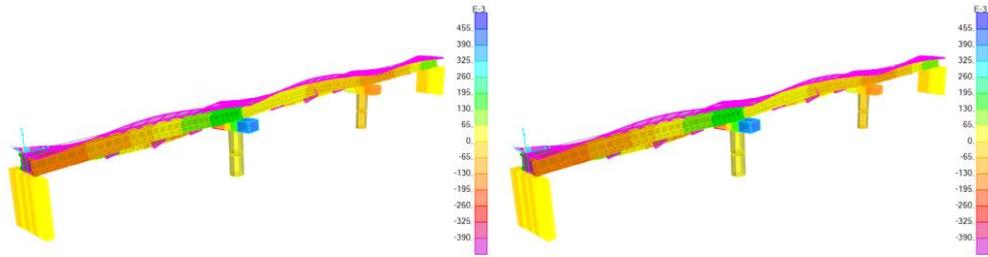
yang lebih kecil daripada sumbu Z membuktikan deformasi pada *mode shape* ke-7 dominan terjadi secara vertikal pada arah sumbu Z.

8. *Mode Shape* ke-8

Terdapat dua arah deformasi vertikal yang berlawanan di setiap bentang model jembatan pada *mode shape* ke-8. Gelagar kiri pada masing-masing bentang mengalami deformasi vertikal berlawanan dengan deformasi vertikal pada gelagar kanan. Pada bentang pertama dan bentang kedua memiliki nilai *displacement* yang sama pada tiap arah deformasinya dengan kontur warna hijau pada gelagar kanan dan kontur warna merah pada gelagar kiri. Nilai *displacement* masing-masing yaitu rentang 0,45 hingga 1,35 mm dan -1,35 hingga -2,25 mm. Kemudian pada bentang ketiga memiliki nilai *displacement* yang lebih kecil dengan kontur warna yang sama yaitu rentang 0,45 hingga 0,9 dan -1,35 hingga -1,8 mm. Pada ujung-ujung bentang cenderung tidak mengalami deformasi dengan nilai *displacement* hanya 0. Perbandingan deformasi ditampilkan pada sumbu lain yaitu sumbu X dan Y yang memiliki kontur warna dengan nilai *displacement* yang lebih kecil daripada sumbu Z membuktikan deformasi pada *mode shape* ke-8 dominan terjadi secara vertikal pada arah sumbu Z.

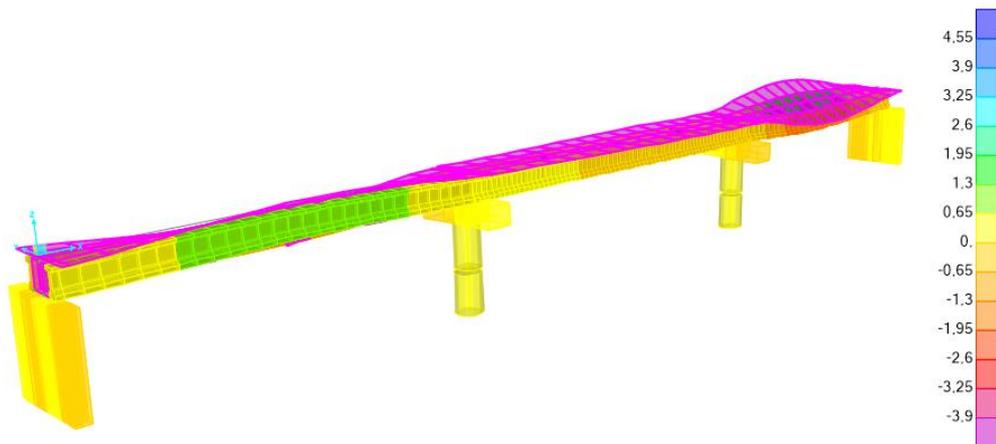


Gambar 4.47 *Mode shape* ke-8 deformasi sumbu Z (dominan).

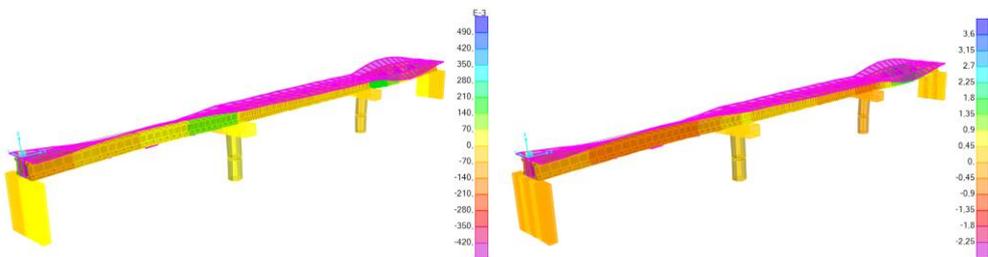


Gambar 4.48 *Mode shape* ke-8 deformasi sumbu X dan Y.

9. *Mode Shape* ke-9



Gambar 4. 49 *Mode shape* ke-9 deformasi sumbu Z (dominan).

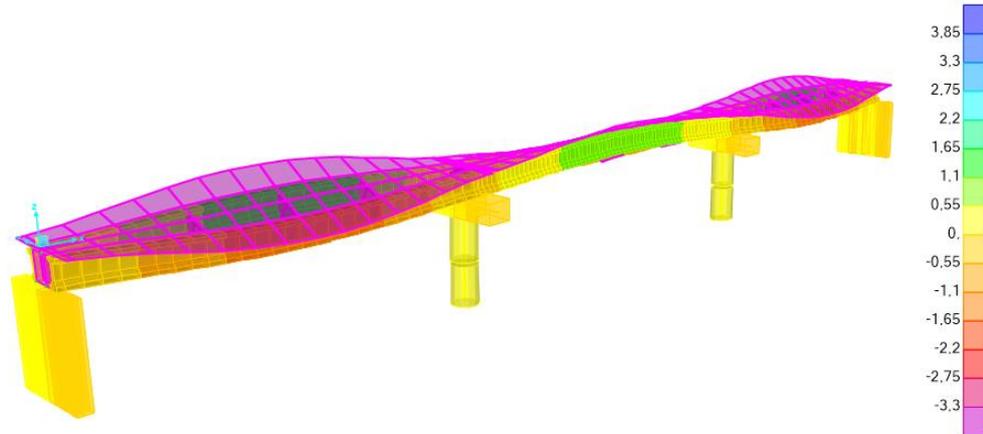


Gambar 4.50 *Mode shape* ke-9 deformasi sumbu X dan Y.

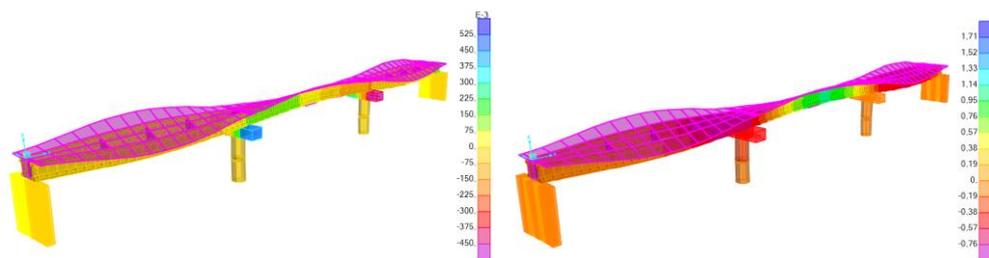
Gelagar kiri pada bentang pertama mengalami deformasi vertikal berlawanan arah dengan yang terjadi pada gelagar kanan. Rentang nilai *displacement* pada gelagar kiri adalah -1,95 hingga -3,25 mm berkontur warna merah dan pada gelagar kanan berkontur warna hijau dengan nilai *displacement* 1,3 hingga 1,96 mm. Kemudian pada bentang ketiga terjadi kebalikannya dimana gelagar kiri berkontur hijau dengan nilai *displacement* 1,3 hingga 1,96 mm dan pada gelagar kanan berkontur warna merah bernilai -1,95 hingga -3,25 mm. Perbandingan deformasi ditampilkan pada sumbu lain yaitu sumbu X dan Y yang memiliki kontur warna dengan nilai *displacement* yang lebih kecil daripada sumbu Z

membuktikan deformasi pada *mode shape* ke-9 dominan terjadi secara vertikal pada arah sumbu Z.

10. *Mode Shape* ke-10



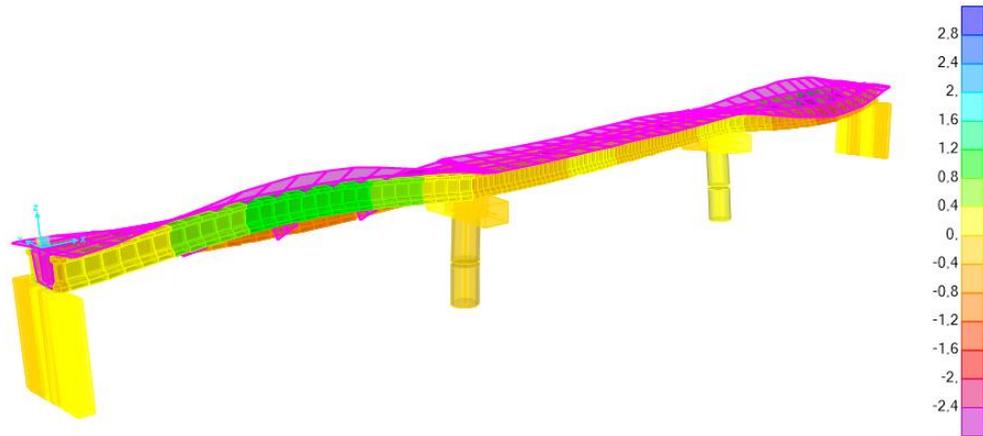
Gambar 4.51 *Mode shape* ke-10 deformasi sumbu Z (dominan).



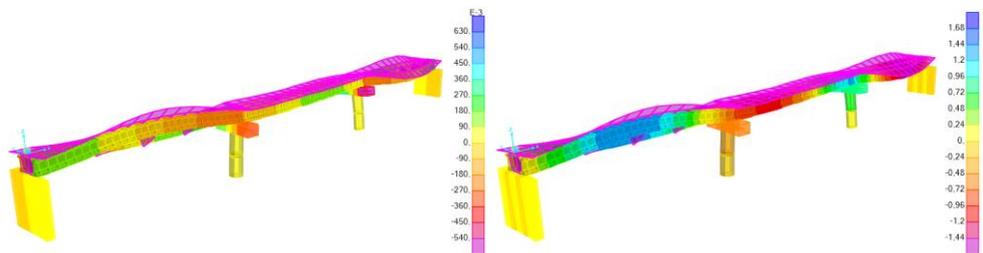
Gambar 4.52 *Mode shape* ke-10 deformasi sumbu X dan Y.

Pola ragam getar ke-10 terlihat pada gambar bahwa secara berurutan pada gelagar bagian kiri bentang pertama, kedua hingga ketiga mempunyai kontur warna hijau, merah dan Kembali hijau. Begitu juga secara berurutan pada gelagar sebelah kanan pada bentang pertama hingga ketiga berkontur warna merah, kemudian hijau dan kembali merah. Nilai *displacement* untuk kontur warna hijau yaitu rentang 1,1 hingga 1,65 mm dan untuk kontur warna merah yaitu rentang -1,65 hingga -2,75 mm. Perbandingan deformasi ditampilkan pada sumbu lain yaitu sumbu X dan Y yang memiliki kontur warna dengan nilai *displacement* yang lebih kecil daripada sumbu Z membuktikan deformasi pada *mode shape* ke-10 dominan terjadi secara vertikal pada arah sumbu Z.

11. *Mode Shape* ke-11



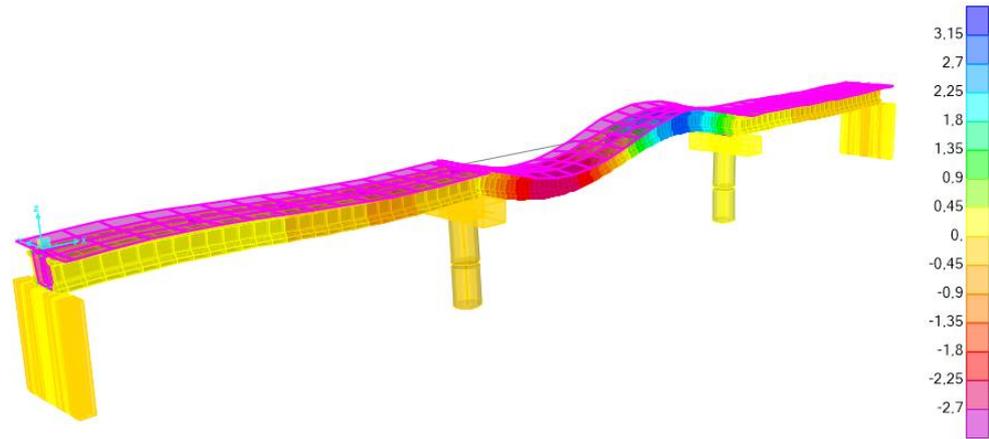
Gambar 4.53 *Mode shape* ke-11 deformasi sumbu Z (dominan).



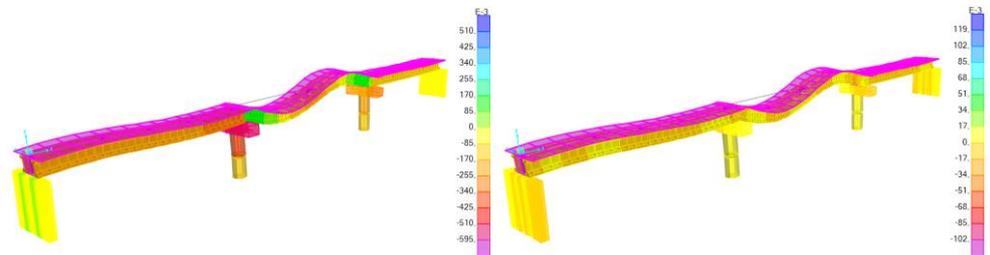
Gambar 4.54 *Mode shape* ke-11 deformasi sumbu X dan Y.

Pada *mode shape* selanjutnya dapat dilihat pada gambar dibawah menampilkan bentuk ragam getar hampir sama dengan *mode shape* ke-9. Dilihat pada nilai *displacement* pada *mode shape* ke-11 ini yang menjadi perbedaan dengan *mode shape* ke-9. Nilai *displacement* pada kontur warna hijau yaitu rentang 0,8 hingga 1,2 mm dan pada kontur warna merah rentang -1,6 hingga -2 mm. Perbandingan deformasi ditampilkan pada sumbu lain yaitu sumbu X dan Y yang memiliki kontur warna dengan nilai *displacement* yang lebih kecil daripada sumbu Z membuktikan deformasi pada *mode shape* ke-11 dominan terjadi secara vetikal pada arah sumbu Z.

12. *Mode Shape* ke-12



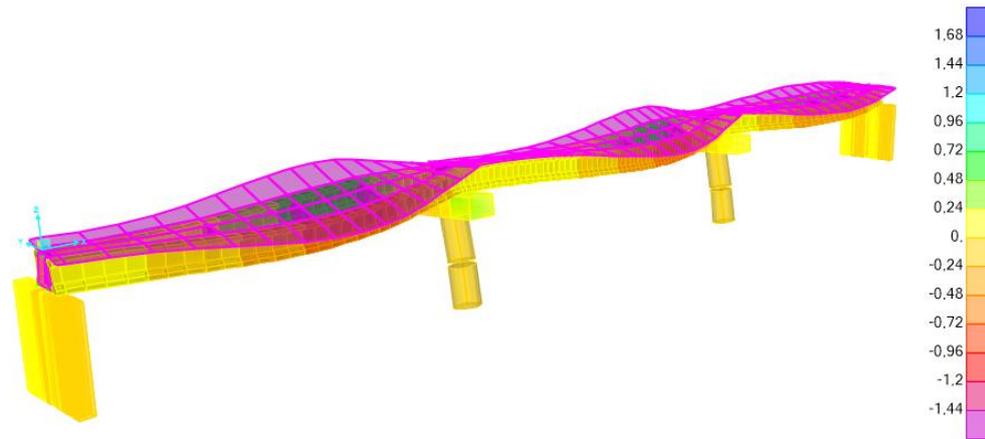
Gambar 4.55 *Mode shape* ke-12 deformasi sumbu Z (dominan).



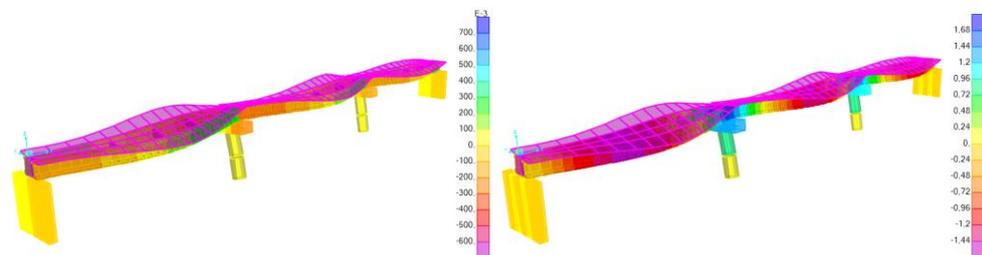
Gambar 4.56 *Mode shape* ke-12 deformasi sumbu X dan Y.

Pola ragam getar ke-12 menampilkan deformasi membentuk 1 gelombang sinus pada bentang tengah model jembatan Tugu Suharto. Dapat dilihat pada kontur warna ungu nilai *displacement* nya adalah -2,7 mm dan pada kontur warna biru adalah 3,15 mm. Pada bentang pertama dan ketiga cenderung mengalami deformasi dengan nilai *displacement* yang cenderung kecil dengan kontur warna kuning hingga orange yaitu rentang 0 hingga -0,45 mm secara vertikal searah dengan sumbu Z. Perbandingan deformasi ditampilkan pada sumbu lain yaitu sumbu X dan Y yang memiliki kontur warna dengan nilai *displacement* yang lebih kecil daripada sumbu Z membuktikan deformasi pada *mode shape* ke-12 dominan terjadi secara vertikal pada arah sumbu Z.

13. *Mode Shape* ke-13



Gambar 4.57 *Mode shape* ke-13 deformasi sumbu Z (dominan).



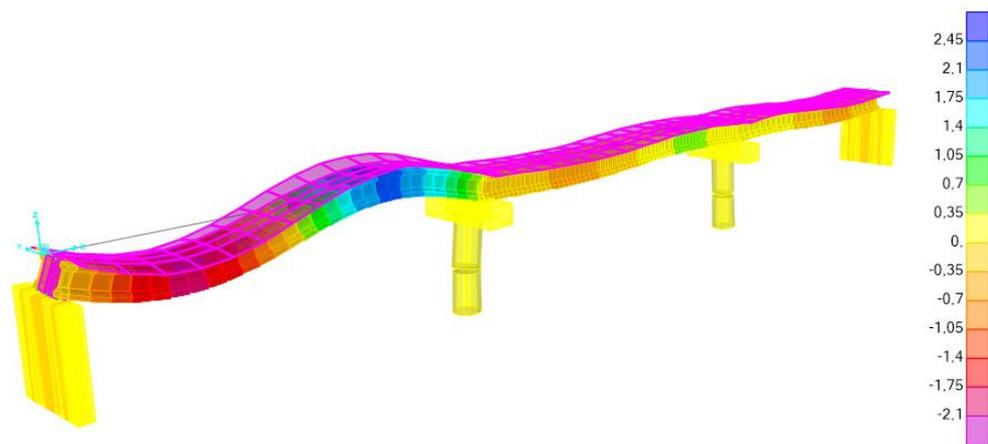
Gambar 4.58 *Mode shape* ke-13 deformasi sumbu X dan Y.

Pada *mode shape* ini terjadi deformasi pada kombinasi arah vertikal dan transversal. Deformasi vertikal terjadi pada masing-masing bentang model jembatan Tugu Suharto. Pada gelagar bagian kanan menampilkan kontur warna orange hingga merah dengan nilai *displacement* -0,48 hingga -1,2 mm. Sedangkan pada gelagar kiri memiliki kontur warna hijau dengan nilai 0,24 hingga 0,72 mm. Pada gelagar dan elemen lain yaitu pilar model jembatan juga mengalami deformasi secara transversal searah dengan sumbu Y pada model jembatan Tugu Suharto namun memiliki nilai yang cenderung lebih kecil daripada yang terjadi secara vertikal. Berikut perbandingan deformasi yang ditampilkan pada sumbu lain yaitu sumbu X dan Y yang memiliki kontur warna dengan nilai *displacement* yang lebih kecil daripada sumbu Z membuktikan deformasi pada *mode shape* ke-13 dominan terjadi secara vertikal pada arah sumbu Z.

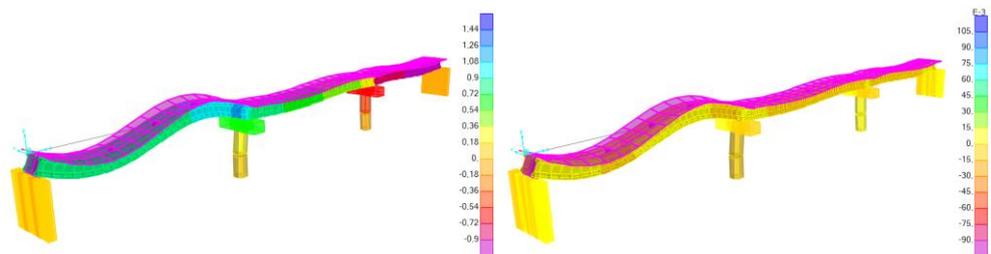
14. *Mode Shape* ke-14

Pola ragam getar ke-14 menampilkan deformasi membentuk 1 gelombang sinus pada bentang pertama model jembatan Tugu Suharto. Dapat dilihat pada

kontur warna ungu nilai *displacement* nya adalah -2,1 mm dan pada kontur warna biru adalah 2,45 mm. Pada bentang kedua dan ketiga cenderung mengalami deformasi dengan nilai *displacement* yang cenderung kecil dengan kontur warna kuning hingga hijau yaitu rentang 0 hingga -0,35 dan 0 hingga 0,35 mm arah sumbu Z. Perbandingan deformasi ditampilkan pada sumbu lain yaitu sumbu X dan Y yang memiliki kontur warna dengan nilai *displacement* yang lebih kecil daripada sumbu Z membuktikan deformasi pada *mode shape* ke-14 dominan terjadi secara vertikal pada arah sumbu Z.



Gambar 4.59 *Mode shape* ke-14 deformasi sumbu Z (dominan).

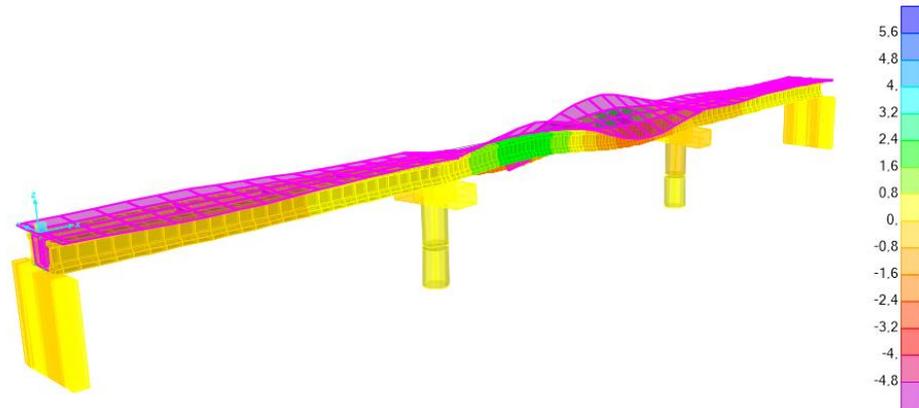


Gambar 4.60 *Mode shape* ke-14 deformasi sumbu X dan Y.

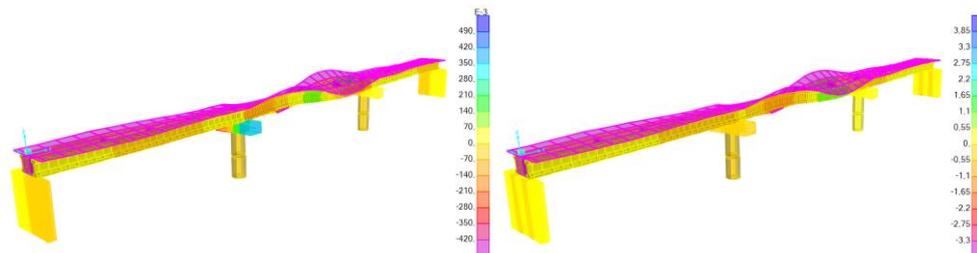
15. *Mode Shape* ke-15

Pada satu gelagar mengalami deformasi vertikal yang berlawanan arah pada pola ragam getar ke-15. Gelagar kiri dan kanan masing-masing mengalami deformasi vertikal yang berlawanan arah yang sejajar sumbu Z. Masing-masing gelagar menampilkan kontur warna hijau dan warna merah dengan nilai *displacement* rentang 0,8 hingga 2,4 mm dan -0,8 hingga -2,4 mm. Pada bentang lain relatif mengalami deformasi vertikal dengan nilai *displacement*

yang cukup kecil mendekati 0 dengan kontur warna kuning yaitu bernilai 0 hingga -0,8 mm. Perbandingan deformasi ditampilkan pada sumbu lain yaitu sumbu X dan Y yang memiliki kontur warna dengan nilai *displacement* yang lebih kecil daripada sumbu Z membuktikan deformasi pada *mode shape* ke-15 dominan terjadi secara vertikal pada arah sumbu Z.



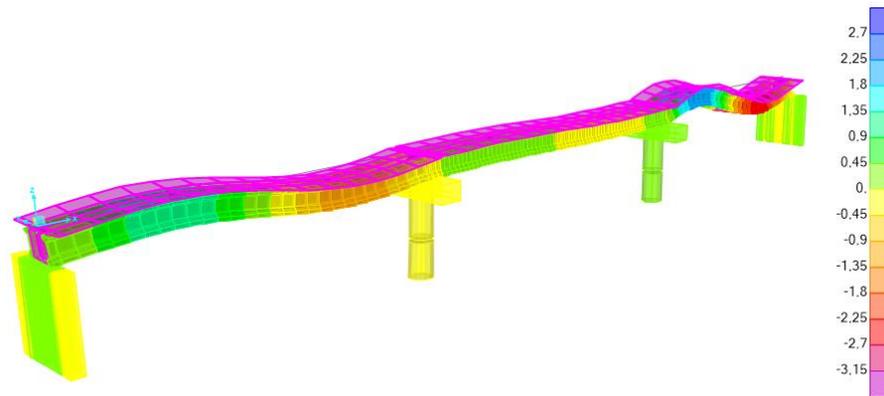
Gambar 4.61 *Mode shape* ke-15 deformasi sumbu Z (dominan).



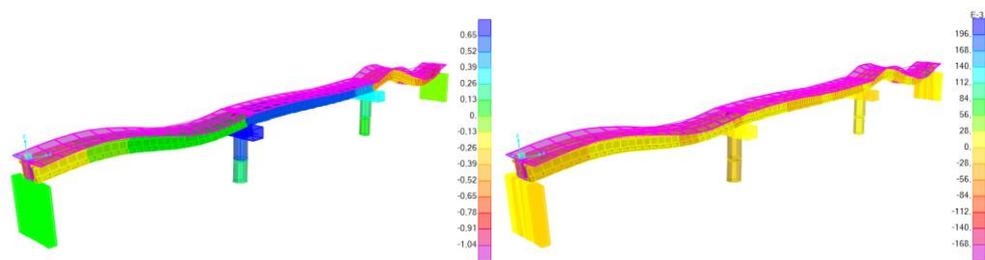
Gambar 4.62 *Mode shape* ke-15 deformasi sumbu X dan Y.

16. *Mode Shape* ke-16

Mode shape ke-16 menunjukkan secara jelas deformasi vertikal yang membentuk 1 gelombang sinus pada bentang pertama dan bentang ketiga. Pada bentang pertama dapat dilihat kontur warna terdiri dari biru muda dan warna orange yang masing nilai *displacement* nya adalah 1,35 dan -1,35 mm.



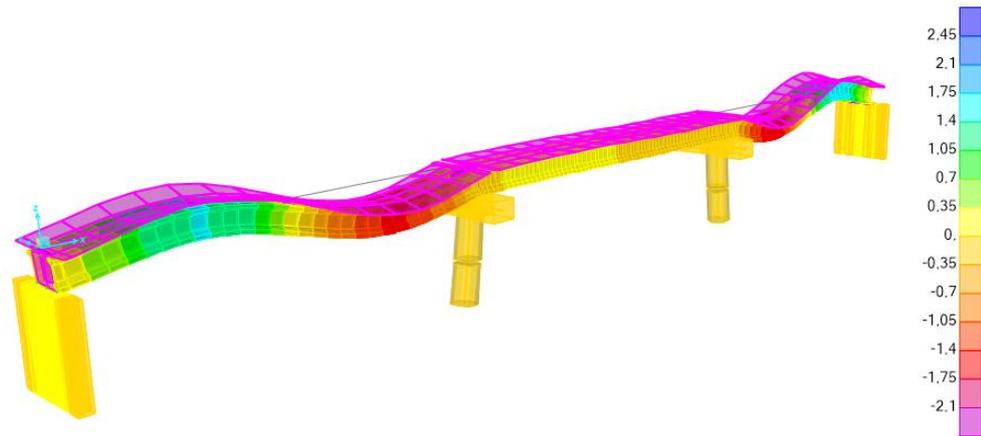
Gambar 4.63 *Mode shape* ke-16 deformasi sumbu Z (dominan).



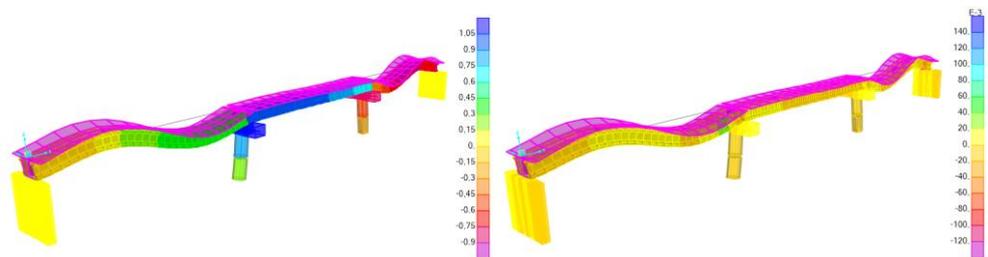
Gambar 4.64 *Mode shape* ke-16 deformasi sumbu X dan Y.

Kemudian pada bentang ketiga kontur warnanya adalah biru dan merah dengan nilai *displacement* 2,7 dan -2,7 mm. Pada bentang tengah hanya menampilkan kontur warna hijau dan kuning yang menandakan nilai *displacement* yang lebih kecil. Perbandingan deformasi ditampilkan pada sumbu lain yaitu sumbu X dan Y yang memiliki kontur warna dengan nilai *displacement* yang lebih kecil daripada sumbu Z membuktikan deformasi pada *mode shape* ke-16 dominan terjadi secara vertikal pada arah sumbu Z.

17. *Mode Shape* ke-17



Gambar 4.65 *Mode shape* ke-17 deformasi sumbu Z (dominan).



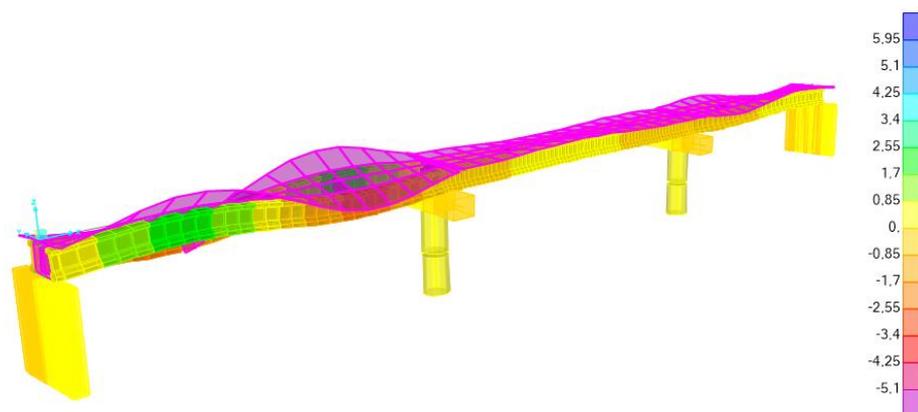
Gambar 4.66 *Mode shape* ke-17 deformasi sumbu X dan Y.

Hampir sama dengan *mode shape* sebelumnya bahwa pada *mode shape* ini bentang pertama dan ketiga mengalami deformasi vertikal yang bentuknya menyerupai 1 gelombang sinus hanya saja posisi bentuk pada bentang ketiga terbalik. Berbeda dengan *mode shape* sebelumnya, pada *mode shape* ke-17 memiliki nilai *displacement* lebih besar dengan kontur warna biru dan merah yang masing-masing adalah 1,75 dan -1,75 mm. Perbandingan deformasi ditampilkan pada sumbu lain yaitu sumbu X dan Y yang memiliki kontur warna dengan nilai *displacement* yang lebih kecil daripada sumbu Z membuktikan deformasi pada *mode shape* ke-17 dominan terjadi secara vertikal pada arah sumbu Z.

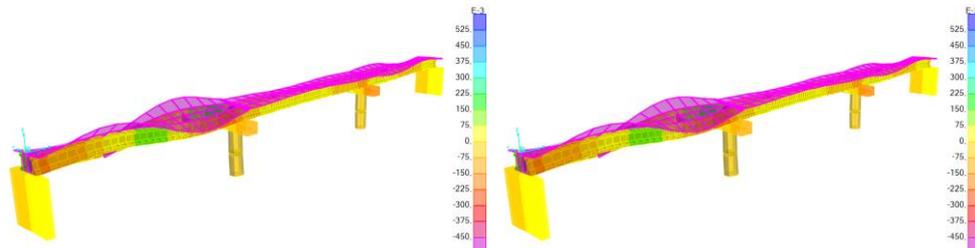
18. *Mode Shape* ke-18

Deformasi vertikal satu gelagar terdapat dua berlawanan pada pola ragam getar ke-15. Gelagar kiri dan kanan masing-masing mengalami deformasi vertikal yang berlawanan arah yang sejajar sumbu Z. Masing-masing gelagar menampilkan kontur warna hijau dan warna merah dengan nilai *displacement* rentang 0,85 hingga 2,55 mm dan -0,85 hingga -2,55 mm. Pada bentang lain

relatif mengalami deformasi vertikal dengan nilai *displacement* yang cukup kecil mendekati 0 dengan kontur warna kuning yaitu bernilai 0 hingga -0,8 mm. Namun pada bentang ujung atau bentang ketiga terjadi deformasi vertikal pada plat lantai model jembatan. Perbandingan deformasi ditampilkan pada sumbu lain yaitu sumbu X dan Y yang memiliki kontur warna dengan nilai *displacement* yang lebih kecil daripada sumbu Z membuktikan deformasi pada *mode shape* ke-18 dominan terjadi secara vertikal pada arah sumbu Z.



Gambar 4.67 *Mode shape* ke-18 deformasi sumbu Z (dominan).



Gambar 4.68 *Mode shape* ke-18 deformasi sumbu X dan Y.

Dari pola ragam getar hasil analisis *modal* diatas dapat dilihat pola deformasi yang beragam terjadi pada tiap-tiap *mode shape*. Dari 18 buah *mode shape* yang ditampilkan menunjukkan sebagian besar deformasi terjadi secara vertikal searah dengan sumbu Z model jembatan Tugu Suharto.

Pada *mode shape* ke-1 dan ke-2 terjadi deformasi yang dominan terjadi secara transversal searah dengan sumbu Y model jembatan dibuktikan dengan nilai *displacement* berdasarkan parameter kontur warna pada arah sumbu Y mempunyai nilai yang lebih besar daripada sumbu X dan Z. Dapat dilihat juga pada bentuk ragam getar yang terjadi, pada *mode shape* ke-1 dan ke-2 pilar terdeformasi secara transversal yang mengakibatkan elemen di atasnya yaitu gelagar, diafragma dan

plat lantai model jembatan juga mengalami deformasi secara transversal. Karena pada bagian bawah elemen struktur pilar dimodelkan dengan sendi jepit maka pilar tidak mengalami pergeseran. Hal ini menyebabkan terjadinya ragam deformasi yang terjadi dalam kombinasi arah transversal dan vertikal pada model jembatan Tugu Suharto.

Kemudian dari 18 buah *mode shape* dengan deformasi pada *mode shape* ke-1 dan ke-2 yang dominan terjadi secara transversal sedangkan deformasi 16 buah *mode shape* lainnya dominan terjadi secara vertikal searah dengan sumbu Z model jembatan. Ragam getar ke-3 hingga ragam getar ke-18 menunjukkan deformasi yang dominan terjadi secara vertikal. Setiap *mode shape* di atas menunjukkan nilai *displacement* pada arah sumbu Z lebih besar daripada dua sumbu lainnya. Kontur warna yang ditampilkan pada arah sumbu Z menunjukkan warna-warna dengan parameter nilai *displacement* tinggi atau maksimal dibandingkan dengan arah sumbu X dan Y yang menunjukkan deformasi minor dengan kontur warna dengan nilai *displacement* rendah. Hal ini membuktikan deformasi dominan terjadi secara vertikal pada *mode shape* ke-3 hingga *mode shape* ke-18. Bentuk pola ragam getar secara vertikal yang terjadi beragam mulai dari bentuk yang deformasi mayor yang terjadi hingga deformasi minor. Pada dasarnya deformasi yang terjadi secara vertikal pada bentang model jembatan akan membentuk seperti gelombang. Bentuk-bentuk seperti gelombang ditampilkan dalam banyak ragam mulai dari bentuk setengah sinus gelombang, *full* sinus, satu setengah sinus dan seterusnya. Bentuk *full* sinus umumnya seperti satu gelombang utuh berupa satu gunung dan satu lembah gelombang. Seperti yang terjadi pada *mode shape* ke-3 dan ke-4 menunjukkan bentuk seperti setengah sinus gelombang pada salah satu bentangnya. Kemudian bentuk *full* sinus gelombang seperti yang terjadi pada *mode shape* ke-12 dan ke-14 pada salah satu bentangnya. Bentuk *full* sinus juga terjadi tidak hanya pada salah satu bentang saja namun pada dua bentang sekaligus seperti yang ditunjukkan pada *mode shape* ke-16 dan ke-17. Bahkan bentuk *mode shape* seperti setengah atau *full* sinus gelombang terjadi pada setiap sisi bentang model jembatan dengan arah yang berlawanan satu sama lain, ditunjukkan pada *mode shape* ke-11 untuk setengah sinus dan *mode shape* ke-18 untuk *full* sinus. Pada *mode shape* ke-17 terjadi bentuk satu setengah sinus gelombang yang terjadi di bentang atau tengah

model jembatan dengan nilai *displacement* yang sangat kecil sehingga bentuk yang menunjukkan satu setengah sinus gelombang terlihat samar.

4.5.3. Joint Displacement

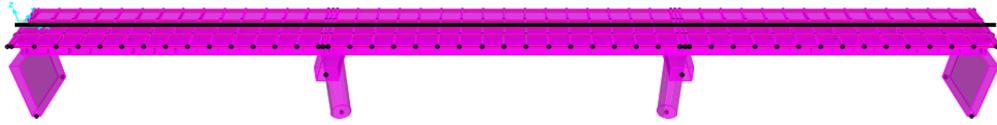
Hasil analisis *modal* yang dijalankan pada model elemen hingga jembatan Tugu Suharto selain mendapatkan pola ragam getar dan frekuensinya, didapatkan pula *output* data perpindahan titik-titik *joint* (*joint displacement*) akibat deformasi secara longitudinal, transversal dan vertikal yang terjadi. Data *output* berupa tabel *joint displacement* yang berisi kordinat titik-titik tertentu dari masing-masing pola ragam getar hasil *output case* analisis *modal*. Pada penelitian ini akan menampilkan sampel data tabel *joint displacement* dari pola ragam getar (*mode shape*) yang mengalami deformasi secara vertikal yaitu *mode shape* 3,4,5,7,12,14,16, dan 17. Ditampilkan pula nilai *displacement* terbesar (*max*) secara absolut tiap *mode shape*.

Tabel 4.12 *Joint Displacement*.

<i>Joint Co.</i> (<i>m</i>)	<i>Joint</i>	<i>U3</i> <i>Mode 3</i>	<i>U3</i> <i>Mode 4</i>	<i>U3</i> <i>Mode 5</i>	<i>U3</i> <i>Mode 7</i>	<i>U3</i> <i>Mode 12</i>	<i>U3</i> <i>Mode 14</i>	<i>U3</i> <i>Mode 16</i>	<i>U3</i> <i>Mode 17</i>
0.0	6	-0.0011	0.0008	-0.0040	0.0111	0.0029	0.0078	0.0152	0.0254
0.4	7	-0.0064	-0.1336	0.0444	-0.0023	0.0498	0.2142	-0.0698	-0.0593
2.3	28	-0.0265	-0.7682	0.2886	-0.1139	0.2489	1.1046	-0.4963	-0.5179
4.3	35	-0.0329	-1.3412	0.5439	-0.3209	0.3672	1.6548	-0.8848	-0.9970
6.2	42	-0.0286	-1.8221	0.7851	-0.5786	0.4001	1.8218	-1.1307	-1.3433
8.1	49	-0.0161	-2.1862	0.9906	-0.8455	0.3507	1.6036	-1.1587	-1.4377
10.1	58	0.0019	-2.4103	1.1399	-1.0825	0.2274	1.0291	-0.9205	-1.1957
12.0	65	0.0230	-2.4953	1.2265	-1.2669	0.0587	0.2415	-0.4950	-0.7065
13.9	72	0.0446	-2.4426	1.2442	-1.3777	-0.1252	-0.6057	0.0256	-0.0783
15.8	81	0.0644	-2.2550	1.1881	-1.3956	-0.2937	-1.3583	0.5425	0.5697
17.8	88	0.0802	-1.9589	1.0680	-1.3239	-0.4235	-1.9050	0.9592	1.1085
19.7	95	0.0899	-1.5819	0.8949	-1.1681	-0.4931	-2.1457	1.1857	1.4168
21.6	104	0.0914	-1.1538	0.6812	-0.9361	-0.4843	-1.9994	1.1457	1.3898
23.5	111	0.0832	-0.7214	0.4505	-0.6554	-0.4088	-1.5451	0.8937	1.0946
25.4	118	0.0631	-0.3352	0.2280	-0.3551	-0.2831	-0.8872	0.5076	0.6291
27.4	125	0.0289	-0.0597	0.0453	-0.0713	-0.1361	-0.1890	0.1131	0.1534
27.8	143	0.0200	-0.0139	0.0109	-0.0125	-0.1052	-0.0482	0.0394	0.0660
28.2	150	0.0013	0.0018	-0.0081	0.0263	-0.0731	0.0349	0.0138	0.0414
30.1	168	0.5913	-0.0878	0.0086	0.2013	-1.0780	0.1143	-0.0752	-0.0141
32.1	175	1.1658	-0.1402	0.0257	0.3361	-1.9165	0.2250	-0.1485	-0.0440
34.0	182	1.6990	-0.1611	0.0461	0.4153	-2.4596	0.3299	-0.2007	-0.0637
35.9	189	2.1619	-0.1546	0.0678	0.4385	-2.6155	0.3985	-0.2182	-0.0711

37.9	198	2.5316	-0.1246	0.0882	0.4075	-2.3065	0.4026	-0.1871	-0.0618
39.8	205	2.7867	-0.0774	0.1052	0.3320	-1.6222	0.3438	-0.1186	-0.0393
41.8	212	2.9179	-0.0195	0.1170	0.2238	-0.6824	0.2316	-0.0274	-0.0085
43.7	219	2.9186	0.0429	0.1224	0.0951	0.3694	0.0822	0.0681	0.0246
45.7	228	2.7850	0.1033	0.1202	-0.0409	1.3673	-0.0825	0.1465	0.0522
47.6	235	2.5351	0.1557	0.1110	-0.1690	2.1685	-0.2340	0.1940	0.0699
49.6	242	2.1893	0.1944	0.0956	-0.2746	2.6610	-0.3473	0.2026	0.0765
51.5	249	1.7703	0.2138	0.0749	-0.3443	2.7617	-0.4004	0.1704	0.0732
53.4	258	1.3126	0.2091	0.0509	-0.3649	2.4268	-0.3761	0.1024	0.0634
55.3	265	0.8488	0.1779	0.0254	-0.3307	1.7849	-0.2903	0.0202	0.0590
57.3	272	0.4199	0.1163	0.0007	-0.2336	0.9817	-0.1630	-0.0532	0.0714
59.2	279	0.0778	0.0204	-0.0216	-0.0647	0.2225	-0.0308	-0.0967	0.1096
59.6	297	0.0135	-0.0045	-0.0265	-0.0199	0.0788	-0.0061	-0.1030	0.1203
60.0	304	-0.0258	-0.0302	-0.0204	0.0353	0.0163	0.0151	-0.0820	0.1415
62.0	322	0.0398	-0.2541	-0.7355	-0.2021	0.0644	-0.1379	-1.1115	0.7774
63.9	329	0.0887	-0.4499	-1.4016	-0.4541	0.0774	-0.2285	-1.8820	1.2781
65.8	336	0.1253	-0.6090	-1.9756	-0.6991	0.0637	-0.2317	-2.2297	1.5496
67.7	343	0.1502	-0.7246	-2.4206	-0.9116	0.0297	-0.1587	-2.0804	1.5108
69.7	352	0.1632	-0.7909	-2.7026	-1.0666	-0.0168	-0.0306	-1.4101	1.1061
71.6	359	0.1655	-0.8092	-2.8175	-1.1547	-0.0663	0.1207	-0.4209	0.4633
73.5	366	0.1581	-0.7815	-2.7639	-1.1681	-0.1094	0.2626	0.6630	-0.2723
75.4	375	0.1422	-0.7101	-2.5435	-1.1014	-0.1374	0.3647	1.6136	-0.9482
77.4	382	0.1199	-0.6049	-2.1901	-0.9679	-0.1478	0.4153	2.2723	-1.4425
79.3	389	0.0934	-0.4762	-1.7402	-0.7824	-0.1393	0.4056	2.5012	-1.6473
81.2	398	0.0650	-0.3343	-1.2307	-0.5605	-0.1113	0.3307	2.1943	-1.4759
83.1	405	0.0378	-0.1960	-0.7260	-0.3340	-0.0724	0.2173	1.5249	-1.0420
85.1	412	0.0151	-0.0794	-0.2956	-0.1371	-0.0322	0.0969	0.7187	-0.4989
87.0	419	0.0010	-0.0053	-0.0199	-0.0093	-0.0024	0.0071	0.0573	-0.0406
87.4	428	-0.0010	0.0054	0.0203	0.0094	0.0023	-0.0069	-0.0519	0.0361
MAX		2.9186	0.2138	1.2442	0.4385	2.7617	1.8218	2.5012	1.5496
MIN		-0.0329	-2.4953	-2.8175	-1.3956	-2.6155	-2.1457	-2.2297	-1.6473

Letak titik (*joint*) sampel yang ditampilkan pada data tabel diatas berada ditengah penampang bentang model jembatan Tugu Suharto. Kordinat titik (*joint coordinate*) dalam satuan meter ditampilkan untuk mengetahui posisi titik-titik tersebut berurutan pada bentang panjang model jembatan Tugu Suharto. Data sampel diatas akan meninjau deformasi secara vertikal pada titik-titik yang telah ditentukan (U3) untuk masing-masing *mode shape* sampel yang telah ditentukan.



Gambar 4.69 Letak titik (*joint*) sampel pada tengah penampang bentang model jembatan Tugu Suharto.

Pada gambar di atas pemilihan data kordinat atau letak titik-titik sampel berada pada tengah penampang bentang. Hal ini dipilih sebagai sampel karena dapat merepresentasikan bentang secara garis lurus sejajar sumbu X yaitu sepanjang bentang model jembatan Tugu Suharto. Data tabel *joint displacement* diolah lebih lanjut untuk memetakan pola ragam kedalam bentuk grafik berdasarkan nilai perpindahan titik (*joint*). Berikut hasil analisis lanjutan,

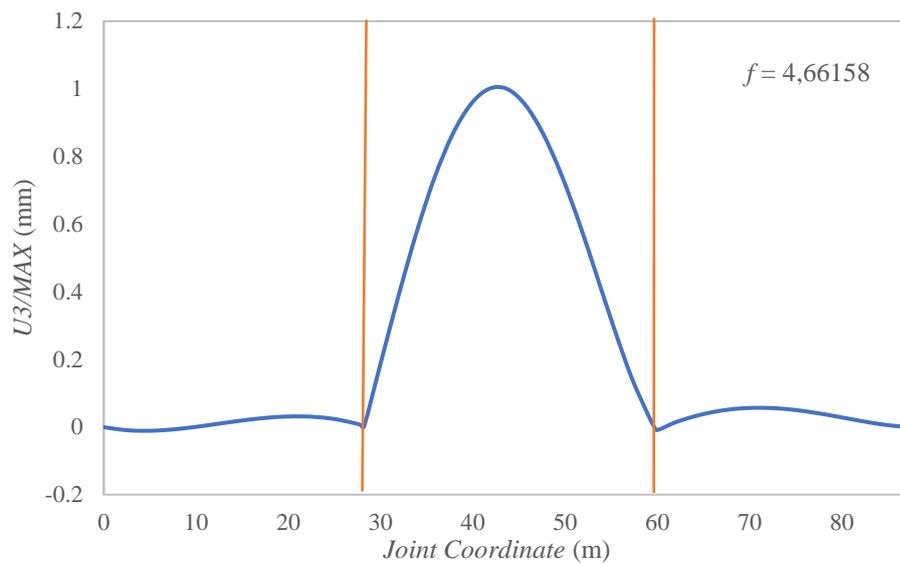
Tabel 4.13 Analisis lanjutan *joint displacement*.

<i>U3/MAX</i> Mode 3	<i>U3/MAX</i> Mode 4	<i>U3/MAX</i> Mode 5	<i>U3/MAX</i> Mode 7	<i>U3/MAX</i> Mode 12	<i>U3/MAX</i> Mode 14	<i>U3/MAX</i> Mode 16	<i>U3/MAX</i> Mode 17
-0.00038	0.000309	-0.00141	0.007972	0.001061	0.003651	0.006087	0.015426
-0.0022	-0.05352	0.015749	-0.00164	0.018017	0.099807	-0.02789	-0.036
-0.00907	-0.30786	0.102442	-0.08161	0.090122	0.514793	-0.19843	-0.31437
-0.01128	-0.5375	0.193037	-0.22995	0.132947	0.771231	-0.35377	-0.60522
-0.00979	-0.73022	0.278662	-0.41461	0.14487	0.849039	-0.45208	-0.81543
-0.00552	-0.87613	0.35159	-0.60585	0.127	0.747376	-0.46324	-0.87274
0.000656	-0.96592	0.404595	-0.77562	0.082345	0.479622	-0.36803	-0.72585
0.007874	-1	0.435314	-0.90778	0.021242	0.112565	-0.19792	-0.42886
0.015289	-0.97887	0.441589	-0.98715	-0.04534	-0.28229	0.010235	-0.04751
0.022068	-0.9037	0.421682	-1	-0.10634	-0.63306	0.216909	0.34581
0.027476	-0.78501	0.37907	-0.94864	-0.15334	-0.88782	0.38351	0.672927
0.030796	-0.63393	0.317636	-0.83695	-0.17856	-1	0.474063	0.860064
0.031321	-0.4624	0.241784	-0.67072	-0.17536	-0.93184	0.45805	0.843707
0.028502	-0.28911	0.159887	-0.46958	-0.14803	-0.72011	0.357312	0.664503
0.021633	-0.13435	0.08091	-0.25442	-0.10251	-0.41346	0.202956	0.381903
0.009919	-0.02392	0.016088	-0.05106	-0.04928	-0.0881	0.045203	0.093117
0.006853	-0.00556	0.003876	-0.00894	-0.03809	-0.02246	0.015739	0.040045
0.000462	0.000706	-0.00287	0.018858	-0.02647	0.016279	0.005519	0.025131
0.202583	-0.03518	0.003062	0.144259	-0.39035	0.053269	-0.03008	-0.00857
0.399448	-0.0562	0.009122	0.240816	-0.69397	0.104876	-0.05939	-0.02673
0.582114	-0.06454	0.016361	0.297543	-0.89063	0.15374	-0.08026	-0.03865
0.740719	-0.06196	0.024051	0.31418	-0.94706	0.1857	-0.08724	-0.04319

0.867407	-0.04994	0.031307	0.29196	-0.83518	0.18763	-0.07482	-0.0375
0.954817	-0.03104	0.037323	0.237886	-0.5874	0.160236	-0.04741	-0.02383
0.999764	-0.00781	0.04152	0.160341	-0.24711	0.107955	-0.01097	-0.00514
1	0.017193	0.043427	0.068122	0.133762	0.038307	0.027229	0.014935
0.954239	0.041406	0.042665	-0.0293	0.49509	-0.03847	0.058575	0.031658
0.868611	0.062408	0.039411	-0.12108	0.785212	-0.10907	0.077554	0.042419
0.750108	0.077887	0.033927	-0.19679	0.963543	-0.16186	0.081001	0.046419
0.606562	0.085672	0.026596	-0.24667	1	-0.1866	0.068136	0.044465
0.449752	0.083808	0.018079	-0.26144	0.878736	-0.17528	0.040921	0.038486
0.290809	0.07128	0.009033	-0.23697	0.646321	-0.13528	0.008087	0.035788
0.143883	0.046622	0.000245	-0.16735	0.355454	-0.07596	-0.02126	0.043314
0.026667	0.008164	-0.00767	-0.04634	0.080563	-0.01436	-0.03867	0.066504
0.004632	-0.00181	-0.00942	-0.01425	0.028541	-0.00286	-0.04119	0.073048
-0.00883	-0.01211	-0.00725	0.025296	0.005893	0.007036	-0.03278	0.085923
0.01365	-0.10185	-0.26105	-0.1448	0.023324	-0.06425	-0.44439	0.471901
0.030382	-0.18031	-0.49746	-0.32539	0.028044	-0.10647	-0.75242	0.775843
0.042938	-0.24405	-0.70121	-0.50094	0.023048	-0.10798	-0.89144	0.940667
0.051462	-0.29039	-0.85915	-0.65318	0.010759	-0.07395	-0.83174	0.917106
0.055923	-0.31696	-0.95925	-0.76427	-0.0061	-0.01425	-0.56375	0.67147
0.0567	-0.32431	-1	-0.82735	-0.02402	0.056249	-0.16829	0.281266
0.054166	-0.3132	-0.981	-0.83697	-0.03962	0.122373	0.265059	-0.16527
0.048708	-0.28459	-0.90275	-0.78916	-0.04974	0.169955	0.645147	-0.57561
0.04107	-0.24241	-0.77735	-0.69352	-0.05352	0.19357	0.908483	-0.87565
0.032007	-0.19083	-0.61766	-0.56059	-0.05043	0.189021	1	-1
0.02227	-0.13398	-0.43682	-0.40164	-0.04031	0.154126	0.877311	-0.89593
0.012943	-0.07856	-0.25767	-0.23933	-0.0262	0.101268	0.609677	-0.63255
0.005187	-0.03183	-0.10493	-0.09824	-0.01165	0.045167	0.287355	-0.30284
0.00034	-0.00213	-0.00707	-0.00666	-0.00088	0.00333	0.022891	-0.02464
-0.00036	0.00218	0.007195	0.006761	0.000815	-0.00322	-0.02074	0.021934

Perbandingan nilai *joint displacement* pada setiap titik dengan nilai *joint displacement* terbesar secara absolut sebagai cara untuk mengetahui letak atau kordinat nilai *joint displacement* terbesar pada masing-masing pola ragam getar (*mode shape*) sampel yang ditinjau (*U3/Max*). Grafik nilai perbandingan yang dihasilkan akan ditampilkan terhadap kordinat letak titik-titik (*joint*) pada *mode shape* sampel. Grafik yang akan ditampilkan juga dapat dilakukan pencocokan secara umum dengan bentuk masing-masing pola ragam getar sampel.

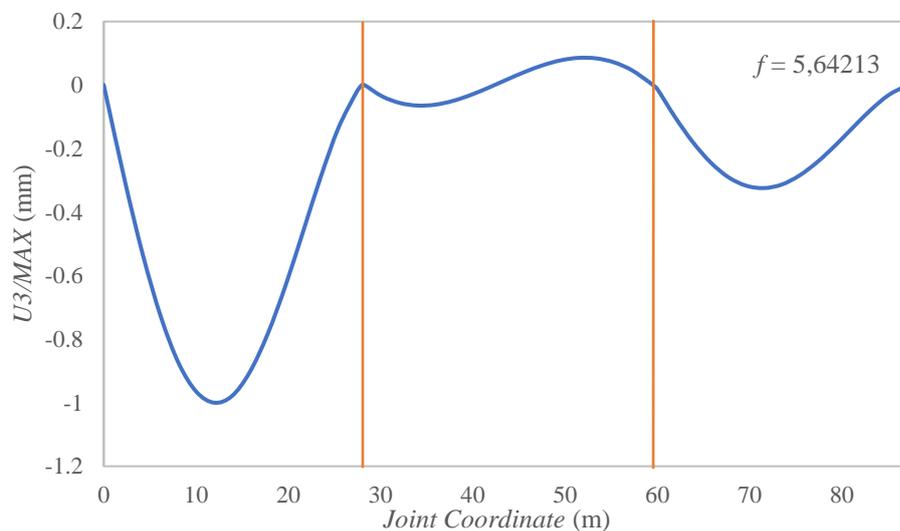
1. Grafik *mode shape* ke-3



Gambar 4.70 Grafik *mode shape* ke-3.

Nilai *displacement* terbesar pada *mode shape* ke-3 terjadi pada nomor titik (*joint number*) 219 dengan nilai 2,9186 mm terletak di kordinat X 43,7 m di bentang panjang model jembatan Tugu Suharto.

2. Grafik *mode shape* ke-4

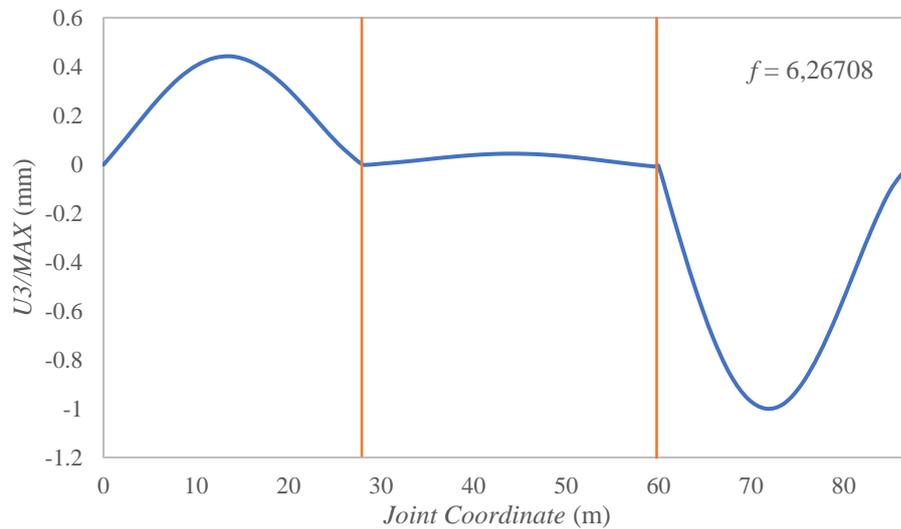


Gambar 4.71 Grafik *mode shape* ke-4.

Nilai *displacement* terbesar pada *mode shape* ke-4 terjadi pada nomor titik (*joint number*) 65 dengan nilai -2,495 mm terletak di kordinat X 11,975 m di bentang panjang model jembatan Tugu Suharto. Di bawah ini grafik dari *mode shape* ke-4.

3. Grafik *mode shape* ke-5

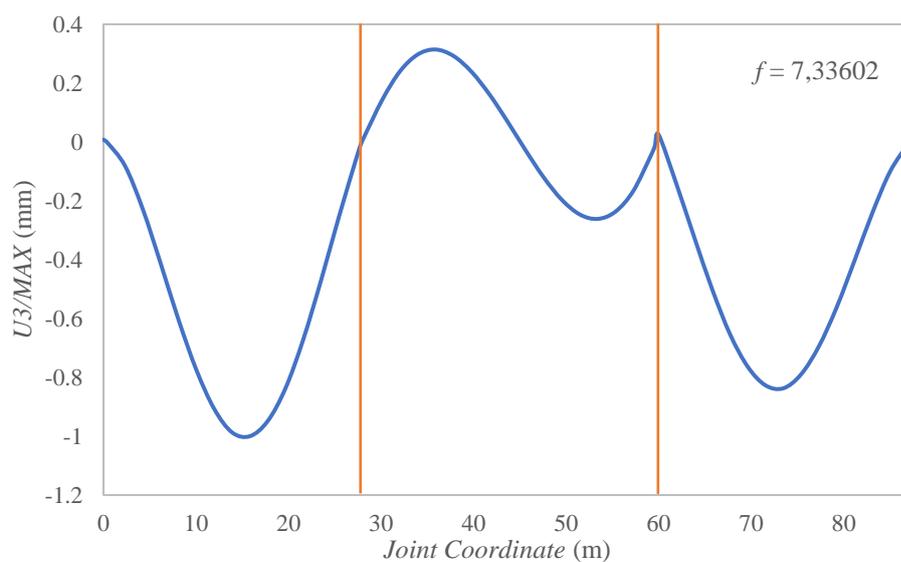
Nilai *displacement* terbesar pada *mode shape* ke-5 terjadi pada nomor titik (*joint number*) 359 dengan nilai -2,817 mm terletak di kordinat X 71,575 m di bentang panjang model jembatan Tugu Suharto.



Gambar 4.72 Grafik *mode shape* ke-5.

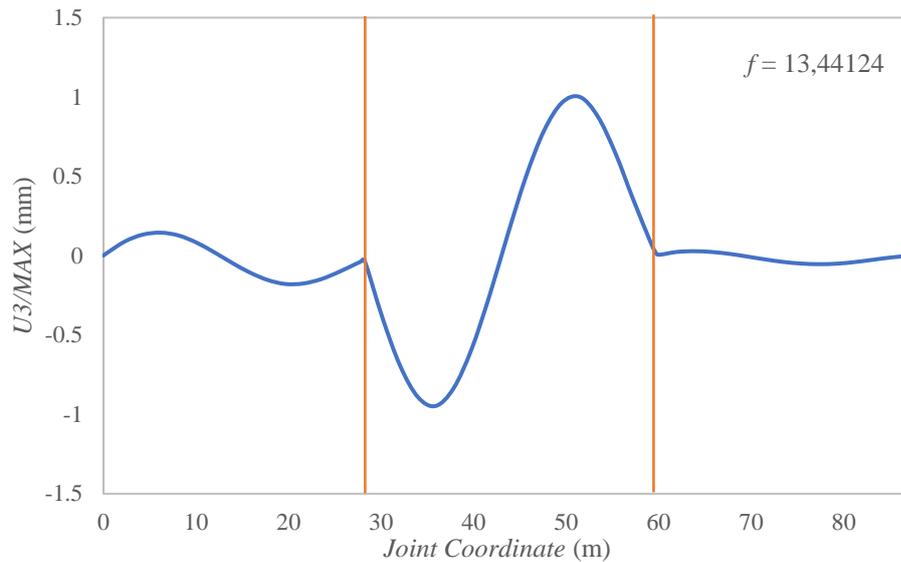
4. Grafik *mode shape* ke-7

Nilai *displacement* terbesar pada *mode shape* ke-7 terjadi pada nomor titik (*joint number*) 81 dengan nilai -1,396 mm terletak di kordinat X 15,825 m di bentang panjang model jembatan Tugu Suharto.



Gambar 4.73 Grafik *mode shape* ke-7.

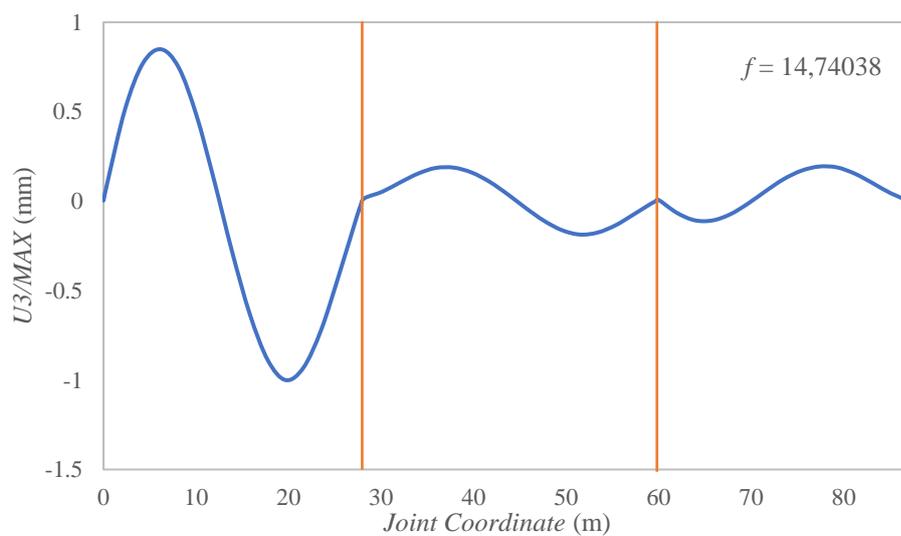
5. Grafik *mode shape* ke-12



Gambar 4.74 Grafik *mode shape* ke-12.

Nilai *displacement* terbesar pada *mode shape* ke-12 terjadi pada nomor titik (*joint number*) 249 dengan nilai -2,7617 mm terletak di kordinat X 51,5 m di bentang panjang model jembatan Tugu Suharto.

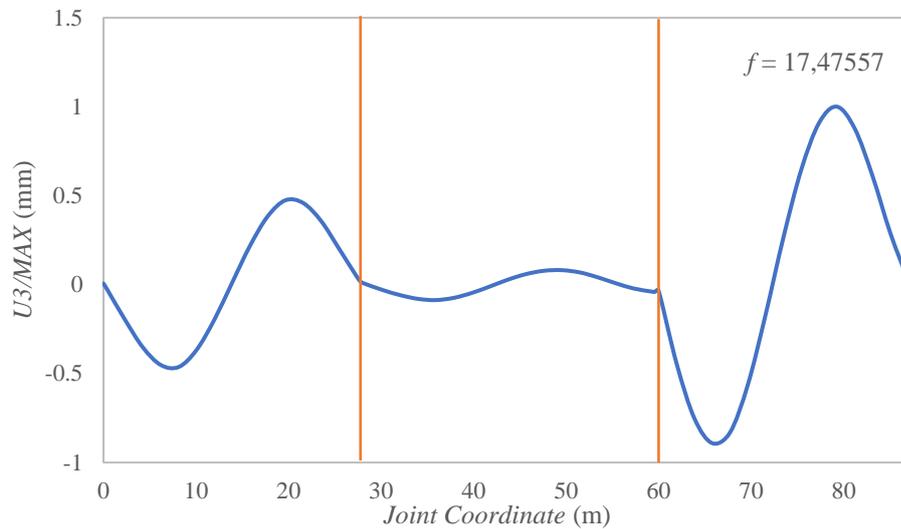
6. Grafik *mode shape* ke-14



Gambar 4.75 Grafik *mode shape* ke-14.

Nilai *displacement* terbesar pada *mode shape* ke-14 terjadi pada nomor titik (*joint number*) 95 dengan nilai -2,146 mm terletak di kordinat X 19,675 m di bentang panjang model jembatan Tugu Suharto.

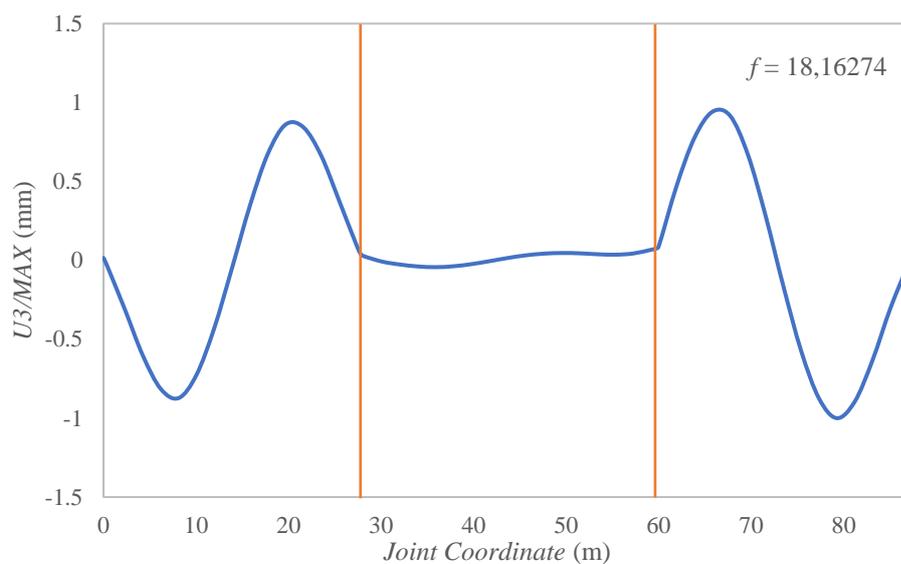
7. Grafik *mode shape* ke-16



Gambar 4.76 Grafik *mode shape* ke-16.

Nilai *displacement* terbesar pada *mode shape* ke-16 terjadi pada nomor titik (*joint number*) 389 dengan nilai -2,5012 mm terletak di kordinat X 79,275 m di bentang panjang model jembatan Tugu Suharto.

8. Grafik *mode shape* ke-17



Gambar 4.77 Grafik *mode shape* ke-17.

Nilai *displacement* terbesar pada *mode shape* ke-17 terjadi pada nomor titik (*joint number*) 389 dengan nilai -1,647 mm terletak di kordinat X 79,275 m di bentang panjang model jembatan Tugu Suharto.

Grafik-grafik diatas jika dicocokkan dengan bentuk *mode shape* hasil analisis *modal* pada model jembatan akan memiliki bentuk yang serupa. Hasil analisis lanjutan untuk mendapatkan nilai perbandingan *displacement* tiap *joint* pada bentang jembatan dengan nilai *displacement* tertinggi terhadap letak tiap-tiap *joint*. Hasil bernilai 1 atau -1 secara absolut pada data tabel analisis lanjutan jika ditampilkan pada grafik merupakan representasi letak *joint* dengan nilai *displacement* maksimum. Dapat dibuktikan lebih lanjut pada representasi nilai *displacement* maksimum tersebut dengan pencocokan terhadap pola ragam getar berkontur warna. Letak deformasi dengan nilai *displacement* maksimum ditampilkan dalam kontur warna bernilai maksimum yang letaknya sama dengan yang ditampilkan oleh grafik *joint displacement* di atas.

BAB V

KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil keseluruhan penelitian ini mulai dari tahap perhitungan, pemodelan elemen hingga, analisis *modal* hingga pengolahan data lanjutan didapatkan beberapa hal yang dirangkum menjadi simpulan penelitian. Beberapa hal simpulan adalah sebagai berikut,

1. Pemodelan *3D finite element* jembatan Tugu Suharto harus mengalami penyederhanaan dan penyesuaian karena keterbatasan data yang tersedia hingga pengalaman peneliti dalam proses pemodelan. Namun secara garis besar hasil *3D finite element model* jembatan Tugu Suharto dapat dikatakan sudah merepresentasikan kondisi sebenarnya. Dapat dilihat hanya 2 elemen saja yang mengalami penyederhanaan pada dimensi dan bentuk penampangnya, dalam hal ini adalah elemen *frame* abutmen dan kepala pilar model jembatan Tugu Suharto. Pada elemen lain seperti plat lantai jembatan, gelagar hingga pilar model jembatan dapat disesuaikan berdasarkan data yang tersedia. Maka pada model *3D* elemen hingga jembatan Tugu Suharto dapat dilakukan analisis *modal* untuk diidentifikasi parameter dinamik dari model jembatan yang telah dibuat.
2. Hasil analisis *modal* menggunakan *software CSi Bridge version 21* pada *3D finite element model* jembatan Tugu Suharto yang pertama berupa frekuensi pada setiap ragam getar yang ditampilkan. Dari hasil analisis tersebut didapatkan bentuk-bentuk pola ragam getar yang berjumlah 18 buah *mode shape* dengan nilai frekuensi (f) terendah bernilai 2,63689 Hz dengan periode getar paling besar (T) yaitu 0,37923 detik pada ragam getar (*mode shape*) ke-1. Sedangkan frekuensi tertinggi dengan periode getar paling rendah terjadi pada *mode shape* ke-18 yang masing-masing bernilai 18,9375 Hz dan 0,05281 detik. Pada 18 buah pola ragam getar tersebut mengalami kombinasi deformasi secara transversal, longitudinal dan vertikal. Dari seluruh *mode shape* yang ditampilkan terdapat 2 buah *mode shape* yang mengalami deformasi dominan secara transversal searah dengan sumbu Y model jembatan Tugu Suharto yaitu *mode shape* ke-1 dan ke-2. Kemudian sisanya yang berjumlah 16 *mode shape* selanjutnya deformasi

dominan terjadi secara vertikal searah dengan sumbu Z pada model jembatan Tugu Suharto. Karena deformasi secara vertikal lebih sering terjadi secara dominan pada setiap *mode shape* maka dipilih beberapa sampel data *joint displacement* untuk diolah lebih lanjut dan ditampilkan dalam bentuk tabel data dan grafik data. Didapatkan hasil berupa grafik hubungan antara kordinat titik sampel (*joint coordinate*) terhadap hasil perbandingan nilai *displacement* pada setiap titik dengan nilai *displacement* terbesar pada masing-masing *mode shape*. Grafik tersebut menampilkan representasi bentuk dari masing-masing *mode shape*.

5.2. Saran

Penelitian ini jauh dari kata sempurna, maka dari itu adapun saran peneliti untuk meningkatkan penelitian ini atau pun penelitian lain yang sejenis yaitu sebagai berikut,

1. Perlunya pengetahuan dan pemahaman terkait desain komponen-komponen jembatan secara keseluruhan mulai dari perencanaan hingga pemahaman terhadap kondisi eksisting komponen-komponen jembatan yang akan ditinjau,
2. Perlunya pemahaman dan pengalaman yang lebih dalam dalam proses pembuatan *3D finite element model* jembatan menggunakan *software CSi Bridge version 21* dalam hal ini kemahiran dalam mengoperasikan *software* dan memaksimalkan fitur-fitur yang tersedia sehingga memudahkan dalam pembuatan dan analisis pada model jembatan,
3. Hasil pemodelan akan lebih akurat jika didukung dengan data-data yang lengkap. Maka dari itu ketersediaan secara lengkap data penunjang pembuatan model sangat penting. Jika data penunjang tersedia secara lengkap maka akan didapatkan model yang lebih akurat mendekati atau sama dengan kondisi jembatan sebenarnya.
4. Dalam melakukan analisis terhadap data *output software CSi Bridge version 21* diperlukan pengetahuan dan pemahaman terkait bidang dinamika struktur. Hal ini akan mempermudah proses analisis lanjutan hingga pada tahap mendeskripsikan dan menampilkan hasil analisis lanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alampalli, S. (2000). Effects of Testing, Analysis, Damage, and Environment on Modal Parameters. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 14(1), 63-74.
- Alaydrus, M., Nurlina, S., & Remayanti, C. N. (2015). Analisis Deformasi Struktur Balok Beton Bertulang dengan Lubang Hollow Core pada Tengah Balok. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Brawijaya. sipil. studentjournal. ub.ac.id> article> view [Diakses pada 29 Mei 2016]*.
- Apriadi, W. I., & Rahman, A. (2001). Aplikasi Bahasa Visual Basic pada Analisis dan Desain Flat Plate Beton Prategang dengan Metode Load Balancing.
- Arfiadi, Y., & Reguler, K. (2007). Sistem Monitoring Kesehatan Struktur. *Universitas Atma Jaya. Yogyakarta*.
- Asiyanto, I., & MBA, I. (2008). Manajemen Alat Berat Untuk Konstruksi, Penerbit PT. Pradnya Paramita. Jakarta.
- Bowles, Joseph E, 1993. Analisis dan Disain Pondasi, Edisi Kedua, Erlangga, Jakarta.
- Caicedo, J. M. (2003). *Structural Health Monitoring of Flexible Civil Structures*. Washington University in St. Louis.
- Collins, M. P., & Mitchell, D. (1991). *Prestressed Concrete Structures* (Vol. 9). Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Ondrej. (2021). *CSi Bridge*. Computer and Structure Inc, United State of America. <https://wiki.csiamerica.com>
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2002. *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung SNI-03-2874-2002*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2008. *Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar SNI-1969-2008*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2021. *Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan*. 02/M/BM/2021. Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Jakarta

- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2008. *Spesifikasi Bantalan Elastomer Tipe Polos dan Tipe Berlapis Untuk Perletakan Jembatan SNI-3967-2008*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta
- Fu, Z. F., & He, J. (2001). *Modal Analysis*. Elsevier.
- M., Rahardjo, Gasmo, J., H., & Leong, E. C. (2000). Infiltration Effects on Stability of a Residual Soil Slope. *Computers and geotechnics*, 26(2), 145-165.
- Hurt, M. A., & Schrock, S. D. (2016). *Highway Bridge Maintenance Planning and Scheduling*. Butterworth-Heinemann.
- Ibrahim, H. H., & MacGregor, J. G. (1997). Modification of the ACI rectangular stress block for high-strength concrete. *Structural Journal*, 94(1), 40-48.
- Indarto, H., Pudjianto, B., & Nurhuda, I. (2017). Kajian Perilaku Dinamik Struktur Jembatan Penyeberangan Orang (JPO) 2 Lantai Akibat Beban Manusia yang Bergerak. *Teknik*, 38(1), 1-5.
- Iqbal, M. (2017). *Tegangan dan Regangan Balok Beton Bertulang Non Homogen Pada Kondisi Lentur Murni* (Doctoral dissertation).
- Kono, D., & Osumi, T. (2021, June). A Friction Fluctuation Model of Rolling Guideways. In *International Manufacturing Science and Engineering Conference* (Vol. 85079, p. V002T06A014). American Society of Mechanical Engineers.
- Lin, T. Y., & Burn, N. H. (2000). *Desain Struktur Beton Prategang Edisi Ketiga Jilid 1*.
- Lu, Y., Henry, R. S., Gultom, R., & Ma, Q. (2015). Experimental Testing and Modelling of Reinforced Concrete Walls with Minimum Vertical Reinforcement. In *New Zealand Society for Earthquake Engineering Annual Technical Conference, Rotorua, New Zealand*.
- Manalip, H., & Handono, B. D. (2018). Perencanaan Balok Girder Profil I pada Jembatan Prestressed dengan Variasi Bentang. *Jurnal Sipil Statik*, 6(2).
- Mulyana, F., & Yolanda, T. (2017). Studi Properties Beton Geopolimer Sebagai Substitusi Beton Konvensional. *Skripsi Universitas Diponegoro*.
- Nababan, P., H., A. (2008). Structural Health Monitoring System Alat Bantu Mempertahankan Usia Teknis Jembatan, *Construction and Maintenance of Main Span Suramadu Bridge*.

- Paek, J., & Govindan, R. (2007, November). RCRT: Rate-Controlled Reliable Transport for Wireless Sensor Networks. *In proceedings of the 5th international conference on Embedded networked sensor systems* (pp. 305-319).
- Santoso, H. T. (2020). Penilaian Kondisi Jembatan Untuk Persyaratan Laik Fungsi Dengan Uji Getar. *Portal: Jurnal Teknik Sipil*, 12(1), 1-8.
- Siswanto, W. A. (1993). Single Stage Sheet Metal Forming Simulation Using ABAQUS Coupled Explicit-Implicit. *Benchmark Problem Square Cup Deep Drawing in Numisheet*.
- Singer, W. (1995). Development and Plasticity of Cortical Processing Architectures. *Science*, 270(5237), 758-764.
- Song, M., Behmanesh, I., Moaveni, B., & Papadimitriou, C. (2020). Accounting for Modeling Errors and Inherent Structural Variability Through a Hierarchical Bayesian Model Updating Approach: an overview. *Sensors*, 20(14), 3874.
- Struyk, H. J., & Veen, V. D. (1984). Jembatan, Jakarta, PT. *Pradnya Paramita*.
- Sudarmoko, R. (1996). Diagram Perancangan Kolom Beton Bertulang. *Jurusan teknik Sipil, fakultas Teknik, UGM, Yogyakarta*.
- Supriyadi, B., & Muntohar, A. S. (2007). Jembatan. *Yogyakarta: Beta Offset*.
- Soetoyo, I. (2002). Konstruksi Beton Pratekan. *Surabaya Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Institut Teknologi Sepuluh November*.
- Trianida, A. (2016). Perhitungan Struktur Jembatan Prategang Pada Jalan Muallaf Menuju Km.12 Jalan Poros Kota Bangun. *Teknik Sipil Dan Arsitektur*, 2, 1–12. <http://ejurnal.untag-smd.ac.id/index.php/TEK/article/view/2425>
- Weiwei, L., & Yoda, T. (2017). *Bridge engineering: Classifications, Design Loading, and Analysis Methods*. Butterworth-Heinemann.
- Yuan, B., Li, Z., Su, Z., Luo, Q., Chen, M., & Zhao, Z. (2021). Sensitivity of Multistage Fill Slope Based on Finite Element Model. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1-13.
- Zwolski, J., & Bień, J. (2011). Modal Analysis of Bridge Structures by Means of Forced Vibration Tests. *Journal of Civil Engineering and Management*, 17(4), 590-599.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi observasi lapangan 1.



PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
JURUSAN TEKNIK SIPIL UNIVERSITAS
NEGERI SEMARANG

JUDUL : DOKUMENTASI OBSERVASI LAPANGAN
LOKASI PENELITIAN : JEMBATAN TUGU SUHARTO, KOTA SEMARANG
TANGGAL PENELITIAN : SEPTEMBER 2022 – MARET 2023
DITELITI OLEH : IMAM AGUS NUGROHO
ALAT : KAMERA HANDPHONE

PENGUKURAN DIMENSI TROTOAR JEMBATAN TUGU SUHARTO



PENGUKURAN DIMENSI RAILING JEMBATAN TUGU SUHARTO



Lampiran 2. Dokumentasi observasi lapangan 2.



PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
JURUSAN TEKNIK SIPIL UNIVERSITAS
NEGERI SEMARANG

JUDUL : DOKUMENTASI OBSERVASI LAPANGAN
LOKASI PENELITIAN : JEMBATAN TUGU SUHARTO, KOTA SEMARANG
TANGGAL PENELITIAN : SEPTEMBER 2022 – MARET 2023
DITELITI OLEH : IMAM AGUS NUGROHO
ALAT : KAMERA HANDPHONE

BANGUNAN ATAS JEMBATAN TUGU SUHARTO



JALAN JEMBATAN TUGU SUHARTO



Lampiran 3. Dokumentasi observasi lapangan 3.



PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
JURUSAN TEKNIK SIPIL UNIVERSITAS
NEGERI SEMARANG

JUDUL : DOKUMENTASI OBSERVASI LAPANGAN
LOKASI PENELITIAN : JEMBATAN TUGU SUHARTO, KOTA SEMARANG
TANGGAL PENELITIAN : SEPTEMBER 2022 – MARET 2023
DITELITI OLEH : IMAM AGUS NUGROHO
ALAT : KAMERA HANDPHONE

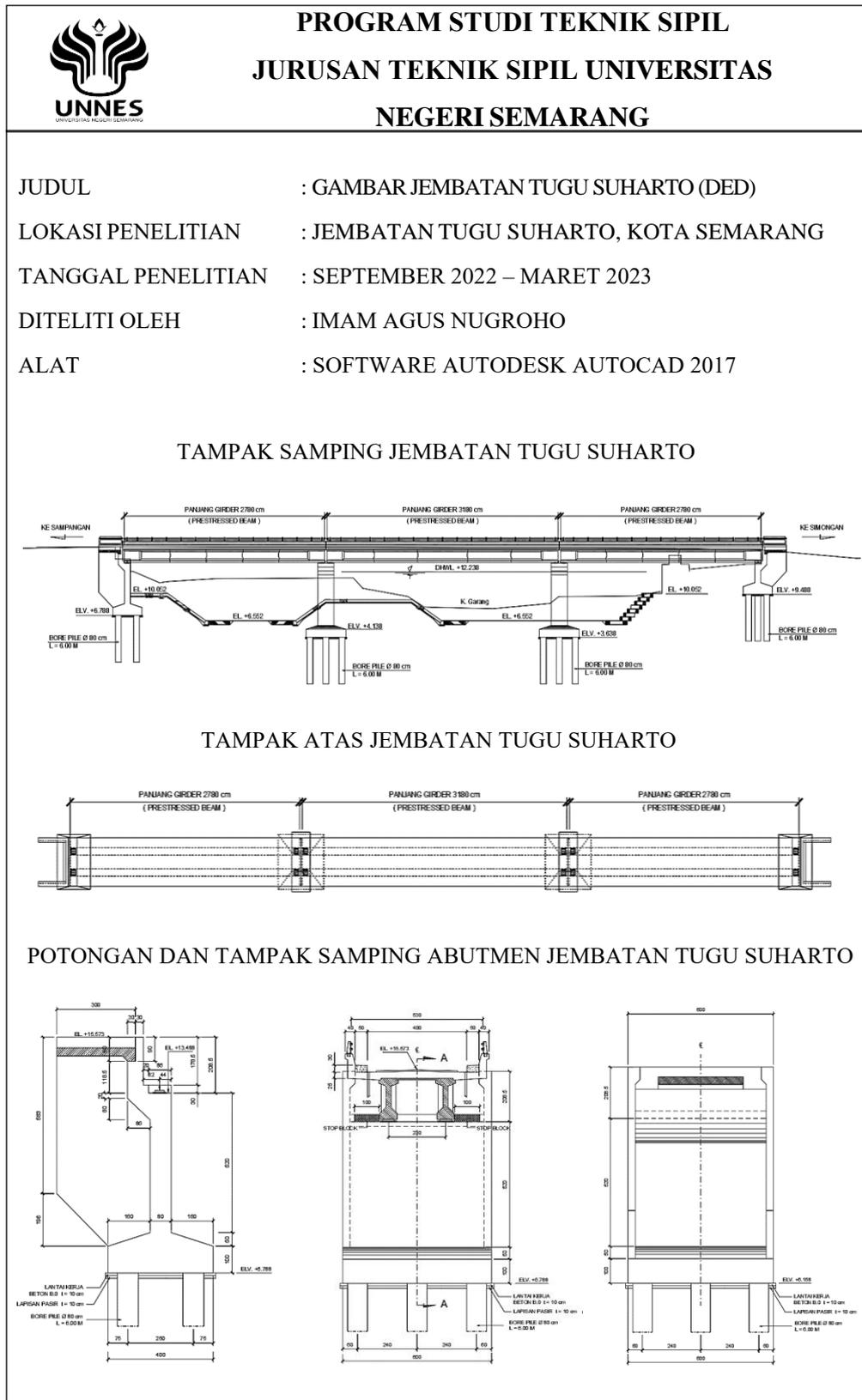
PILAR JEMBATAN TUGU SUHARTO



DIAFRAGMA DAN TUMPUAN JEMBATAN TUGU SUHARTO



Lampiran 4. Gambar jembatan Tugu Suharto



Lampiran 5. *Finite element model* jembatan Tugu Suharto.



**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
JURUSAN TEKNIK SIPIL UNIVERSITAS
NEGERI SEMARANG**

JUDUL : *FINITE ELEMENT MODEL* JEMBATAN
LOKASI PENELITIAN : JEMBATAN TUGU SUHARTO, KOTA SEMARANG
TANGGAL PENELITIAN : SEPTEMBER 2022 – MARET 2023
DITELITI OLEH : IMAM AGUS NUGROHO
ALAT : SOFTWARE CSI BRIDGE VERSION 21.0

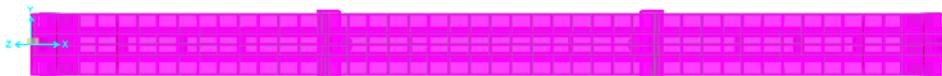
3D FINITE ELEMENT MODEL JEMBATAN TUGU SUHARTO



TAMPAK SAMPING 3D MODEL JEMBATAN TUGU SUHARTO



TAMPAK ATAS 3D MODEL JEMBATAN TUGU SUHARTO



TAMPAK DEPAN 3D MODEL JEMBATAN TUGU SUHARTO

