

Modifikasi Jembatan Kanor–Rengel dengan Menggunakan *Cable-Stayed Asymmetrical Single Plane System*

Rendra Juliansyah Putra, Hidajat Sugiharjo, dan Djoko Irawan
Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: hidayat@ce.its.ac.id

Abstrak—Jembatan sebagai penghubung antara dua lokasi harus direncanakan dengan memperhatikan aspek-aspek meliputi kekuatan, stabilitas struktur, ekonomis, estetika, hingga dampak yang ditimbulkan terhadap lingkungan. Jembatan Kanor–Rengel sebagai penghubung Kecamatan Kanor, Kabupaten Bojonegoro dan Kecamatan Rengel, Kabupaten Tuban yang memiliki panjang total hingga 310 meter dan lebar 9 meter dibangun dengan tipe konstruksi berupa *slab on piles*, gelagar, dan rangka baja serta struktur penopang berupa dua abutmen dan empat pilar. Penggunaan rangka baja tidaklah efisien untuk bentang tersebut karena dapat menyebabkan bertambahnya berat struktur jembatan dan penggunaan pilar pada jembatan. Penggunaan dua pilar juga akan mengurangi *effective linear waterway* sungai yang menyebabkan terjadinya gerusan lokal. Selain itu, rangka baja juga tidak memiliki nilai estetika. Melihat kondisi tersebut, muncul ide untuk memodifikasi jembatan menjadi jembatan *cable-stayed asymmetrical single plane system*. Perencanaan modifikasi ini dilakukan secara bertahap mulai dari studi literatur dan pengumpulan data, *preliminary design*, desain struktur sekunder, pemodelan dan analisis struktur, desain struktur utama, kontrol stabilitas aerodinamis, analisis *staging*, desain angkur dan perletakan, hingga penyusunan gambar kerja. Hasil dari perencanaan ini meliputi dimensi kabel, dek jembatan, *pylon* dan angkur. Beberapa peraturan yang digunakan sebagai acuan dalam melakukan perencanaan modifikasi ini meliputi Surat Edaran Menteri 08-SE-M-2015, SNI 1725-2016, SNI 2833-2016, dan *AASHTO LRFD Bridge Design Specification 9th Edition 2020*. Berdasarkan hasil perencanaan, digunakan gelagar baja dengan lantai *orthotropic* berupa *single trapezoidal box girder* setinggi 2,5 m dan selebar 19,5 m; 14 buah kabel dengan diameter terbesar adalah 178,41 mm; *pylon* setinggi 56 m dengan penampang berongga dan tak-berongga berukuran 3 m × 6 m yang memiliki kemiringan 70° terhadap horizontal; angkur yang terdiri dari unit 6-73, 6-109, 6-151, dan 6-187; *pot bearing* berupa *guided bearing* dan *free bearing*; serta *expansion joint* pada jembatan. Seluruh elemen telah memenuhi kontrol terhadap persyaratan baik terhadap beban statik dan dinamik yang terjadi, maupun terhadap stabilitas aerodinamis.

Kata Kunci—Jembatan *cable-stayed*, *asymmetrical single plane system*, *semi-harp pattern*, gelagar boks baja *trapezoidal*, *pylon* tunggal, lantai *orthotropic*.

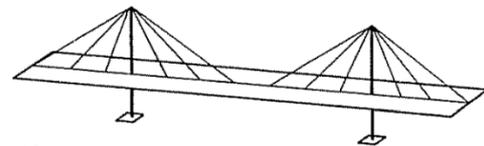
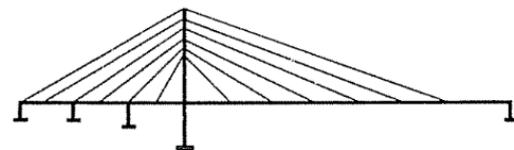
I. PENDAHULUAN

JEMBATAN adalah suatu konstruksi yang berfungsi meneruskan jalan melalui suatu rintangan yang permukaannya lebih rendah. Rintangan ini dapat berupa jalan lain, rel kereta api, irigasi, sungai, laut, dan lain-lain [1]. Jembatan sebagai penghubung antara dua lokasi yang dipisahkan oleh sebuah rintangan merupakan investasi tertinggi dari semua elemen yang dapat dijumpai pada sistem jalan raya yang dalam perencanaannya harus memperhatikan aspek-aspek meliputi kekuatan dan stabilitas struktur,

Tabel 1.

Dimensi *preliminary design* kabel

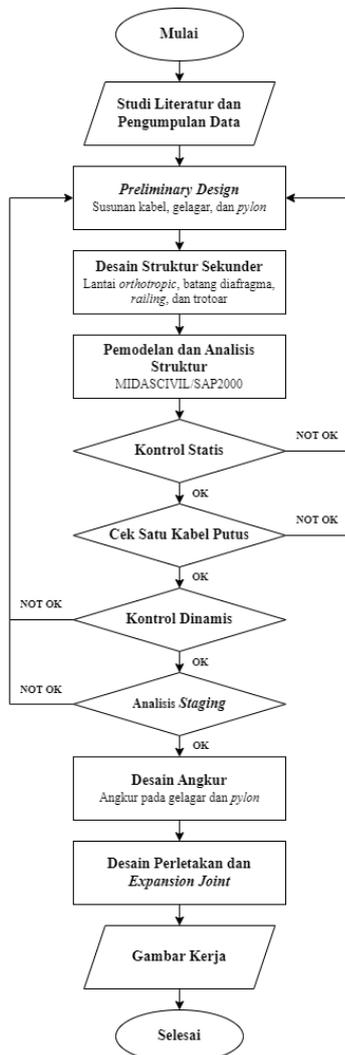
No. Kabel	Luas Penampang (mm ²)	Jari-jari (mm)	Jumlah <i>Strand</i> (buah)
M1	30899,11	99,17	221
M2	28244,84	94,82	202
M3	25127,34	89,43	180
M4	22014,49	83,71	158
M5	18319,68	76,36	131
M6	14665,67	68,32	105
M7	10375,18	57,47	75
S1	17649,13	74,95	127
S2	16545,90	72,57	119
S3	14796,89	68,63	106
S4	13157,89	64,72	94
S5	11348,02	60,10	82
S6	9717,40	55,62	70
S7	7141,32	47,68	52

Gambar 1. Susunan kabel *single plane system*.Gambar 2. Susunan kabel *asymmetric layout*.

ekonomis, estetika, hingga dampak yang dapat ditimbulkan terhadap lingkungan.

Jembatan Kanor–Rengel yang menghubungkan Desa Semambung, Kecamatan Kanor, Kabupaten Bojonegoro dengan Desa Ngadirejo, Kecamatan Rengel, Kabupaten Tuban membentang di atas Sungai Bengawan Solo dengan panjang total hingga 310 meter dan lebar 9 meter. Jembatan Kanor–Rengel dibangun dengan tipe konstruksi berupa *slab on piles*, gelagar, dan rangka baja sebagai struktur. Jembatan ini ditopang dengan struktur bawah yang terdiri dari dua abutmen dan empat pilar. Penggunaan tipe rangka baja tidaklah efisien karena dapat menyebabkan bertambahnya berat sendiri struktur jembatan untuk jembatan bentang panjang. Penggunaan dua pilar pada daerah aliran sungai jembatan juga menurunkan *effective linear waterway* dari sungai yang dapat meningkatkan potensi terjadinya gerusan lokal (*local scouring*). Selain itu, sebagai akses vital perekonomian Bojonegoro–Tuban, tipe struktur rangka baja kurang memiliki nilai estetika.

Melihat kondisi tersebut, muncul ide untuk memodifikasi Jembatan Kanor–Rengel menjadi jembatan *cable-stayed*



Gambar 3. Diagram alir perencanaan modifikasi.

karena lebih efisien dan ekonomis untuk kategori jembatan bentang panjang. Penggunaan empat pilar jembatan direduksi dengan satu *pylon* pada daerah lereng/tepi sungai dan keekonomisan jembatan juga bisa ditingkatkan dengan menggunakan satu bidang kabel karena ukuran pilar yang digunakan menjadi lebih kecil. Maka dari itu, digunakan konfigurasi kabel *asymmetrical single plane system* yang juga bisa memberikan nilai estetika pada jembatan karena menyajikan pandangan yang tidak terhalang di sepanjang jembatan.

Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan dibahas tentang bagaimana merancang desain modifikasi Jembatan Kanor-Rengel dengan menggunakan *Cable-stayed Asymmetrical Single Plane System* dengan memenuhi aspek-aspek perencanaan yang ada.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Jembatan terus mengalami perkembangan sesuai dengan kebutuhan dan panjang bentang yang harus digunakan. Salah satu bentuk perkembangan dari jembatan adalah jembatan *cable-stayed* yang dapat digunakan untuk jembatan dengan panjang bentang minimal 200 meter. Jembatan *cable-stayed* adalah struktur yang mempunyai sederetan kabel lurus dan memikul elemen horizontal kaku (berupa balok, rangka, atau boks). Jembatan *cable-stayed* terdiri dari sistem struktur

Tabel 2. Detail dimensi elemen pada gelagar

Elemen	Profil/Dimensi
<i>Closed Ribs</i>	<i>Trapezoidal</i> 400×200×200×8
<i>Top Floorbeam</i>	<i>T-Beams</i> 700×400×18×20
<i>Bottom Floorbeam</i>	<i>T-Beams</i> 500×400×18×20
Diafragma Diagonal	L 150×150×18
Diafragma Vertikal	WF 300×300×11×17

Tabel 3. Resultan gaya pada *pylon*

No. Kabel	Gaya Aksial (kN)	F _y (kN)	F _x (kN)
M1	22815,75	8546,93	21154,40
M2	26439,73	10754,01	24153,90
M3	23687,74	10754,01	21105,93
M4	20880,03	10754,01	17897,67
M5	17467,40	10754,01	13764,50
M6	14038,36	10754,01	9023,68
M7	13707,91	12961,08	4462,86
S1	15353,23	7443,39	13428,24
S2	16594,76	8546,93	14224,48
S3	14901,12	8546,93	12206,28
S4	13296,67	8546,93	10185,84
S5	11501,03	8546,93	7695,69
S6	9869,15	8546,93	4934,57
S7	9831,09	9650,47	1875,86

Tabel 4. Detail dimensi penampang *pylon*

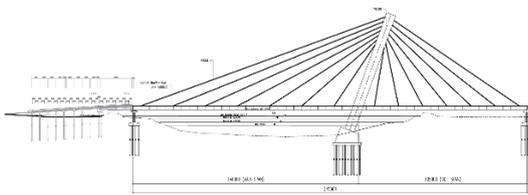
Penampang	B (mm)	H (mm)
<i>Top Pylon</i> (Berongga)	3000	6000
<i>Low Pylon</i> (Solid)	3000	6000

Tabel 5. Rekapitulasi hasil tegangan lantai *orthotropic*

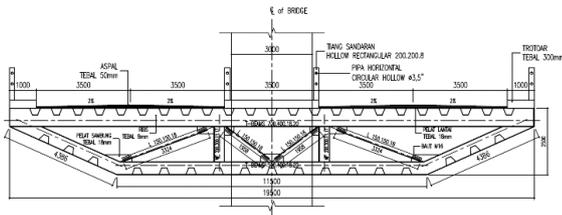
Lokasi	σ (MPa)	σ_{izin} (MPa)	Keterangan	
Serat Atas	Pelat	121,54	273,33	OK
	Perletakan Transversal	16,84	273,33	OK
	Longitudinal	48,27	273,33	OK
Serat Bawah	Ribs	44,56	273,33	OK
	Perletakan Tengah	46,61	273,33	OK
	Bentang <i>Top Floorbeam</i>	45,29	273,33	OK

berupa gelagar menerus yang didukung oleh tumpuan berupa kabel yang dibentang miring dan dihubungkan ke menara (*pylon*) sebagai penahan utama. Setiap komponen jembatan *cable-stayed* saling berhubungan satu sama lain. Kabel memikul beban dari gelagar yang menahan jalan raya dan lalu lintasnya. Beban dari kabel tersebut selanjutnya ditransfer ke *pylon* dan dilimpahkan ke fondasi jembatan [2].

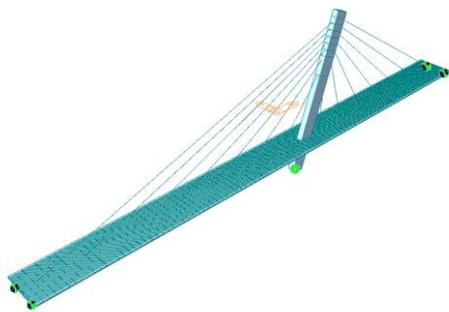
Susunan atau konfigurasi kabel merupakan hal mendasar yang harus diperhatikan dalam perencanaan jembatan *cable-stayed*. Pada *single plane system* digunakan satu bidang kabel yang berada di tengah struktur jembatan dan searah sumbu longitudinal jembatan, sehingga susunan ini cenderung digunakan pada jembatan dengan median yang memisahkan dua jalur kendaraan, seperti pada Gambar 1. Pada susunan ini diperlukan sistem lantai kendaraan yang memiliki kekakuan torsi yang cukup untuk menjaga deformasi penampang jembatan akibat beban eksentris yang terjadi [3]. *Single plane system* menawarkan keunggulan dari segi estetika berupa visual yang tidak terhalang oleh kabel-kabel yang bersilangan di sepanjang jembatan. Selain itu, jembatan juga menjadi lebih ekonomis karena penggunaan satu *pylon* dan bisa



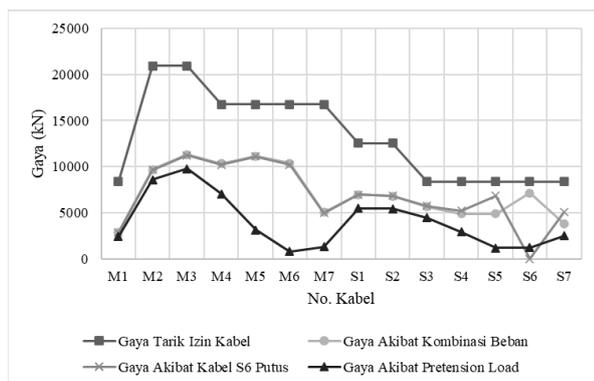
Gambar 4. Tampak memanjang rencana modifikasi jembatan kanor-rengel.



Gambar 5. Penampang single trapezoidal box girder.



Gambar 6. Tampak prespektif pemodelan jembatan cable-stayed pada program MIDASCIVIL.



Gambar 7. Grafik perbandingan gaya tarik izin kabel terhadap gaya-gaya yang terjadi.

menjadi lebih ekonomis lagi saat digunakan pylon yang cukup ramping [4].

Susunan *asymmetric* seperti pada Gambar 2 digunakan saat terdapat perbedaan panjang bentang jembatan antara kiri dan kanan yang diakibatkan oleh kondisi topografi. Penggunaan jumlah kabel dapat tereduksi sebagian pada jembatan kabel *asymmetric* dibandingkan pada jembatan kabel konvensional, sehingga berat struktur jembatan akrobat kabel yang digunakan bisa menurun secara signifikan sepanjang jembatan [5].

Dek jembatan dengan material baja memberikan jawaban optimum atas permintaan penggunaan material yang ekonomis dalam jembatan *cable-stayed*. Berat tersebut hanya seperlima dari berat dek jembatan dengan material beton. Namun, meski berat dek baja yang relatif lebih ringan dibandingkan dek beton, harga dari dek baja bernilai dua hingga empat kali lebih mahal daripada harga dek beton. Untuk itu dapat dilakukan penghematan dengan

Tabel 6. Detail sambungan pada elemen lantai *orthotropic*

Bagian Tersambung	Detail Sambungan
Ribs-Pelat Lantai	Las filet E70xx tebal 5 mm
Top Floorbeam-Pelat Lantai	Las filet E70xx tebal 6 mm
Ribs-Top Floorbeam	Las gruv E80xx tebal 8 mm

Tabel 7. Rekapitulasi hasil kontrol diafragma dan *bottom floorbeam*

Batas Kontrol	Gaya/Nilai Terjadi	Kapasitas	Ket.	
Diafragma Diagonal (3324 mm)	Tarik 335,44 kN	761,80 kN	OK	
Diafragma Diagonal (1958 mm)	Tarik 258,77 kN	761,80 kN	OK	
Diafragma Vertikal	Tarik 66,78 kN	6740,15 kN	OK	
Bottom Floorbeam	Momen	71,56 kN-m	302,5 kN-m	OK
	Geser	36,86 kN	1909,1 kN	OK
	Tekan	591,12 kN	4964,87 kN	OK
	Tekan-Lentur	0,36	1,0	OK

Tabel 8. Detail sambungan pada diafragma dan *bottom floorbeam*

Bagian Tersambung	Detail Sambungan
Diafragma Diagonal-Bottom Floorbeam	Baut A325 M20
Diafragma Vertikal-Bottom Floorbeam	Baut A325 M20
Bottom Floorbeam-Pelat	Las filet E70xx tebal 6 mm

Tabel 9. Detail sambungan pada *railing*

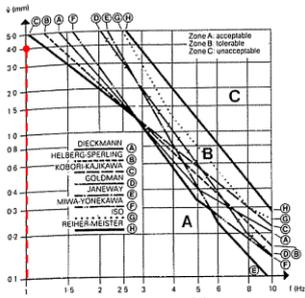
Bagian Tersambung	Detail Sambungan
Pipa Horizontal-Tiang Sandaran	Las filet E60xx tebal 3 mm
Tiang Sandaran-Trotoar	Base Plate dengan pelat setebal 22 mm dan angkur D16
Tiang Sandaran-Pelat	Las filet E60xx tebal 5 mm

Tabel 10. Frekuensi dan periode alami struktur jembatan *cable-stayed*

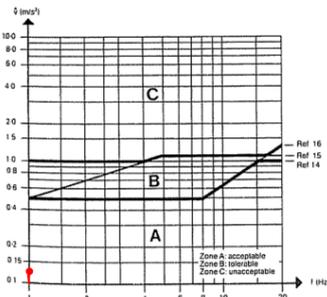
Mode	Frekuensi (Hz)	Periode (detik)
1	0,373	2,683
2	0,905	1,106
3	1,444	0,693
4	2,158	0,463
5	2,275	0,439
6	2,324	0,430
7	3,310	0,302
8	3,477	0,288
9	3,495	0,286
10	4,172	0,240
11	4,552	0,220
12	4,634	0,216

menggunakan panel *orthotropic* pada lantai kendaraan dan kisi-kisi baja [4].

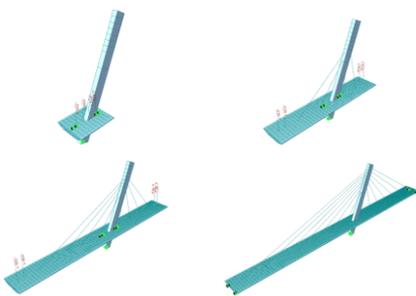
Serupa dengan sistem kabel pada jembatan *cable-stayed*, pylon juga memiliki bentuk-bentuk yang beragam menyesuaikan susunan kabel, kondisi lokasi, kebutuhan desain, estetika, hingga keekonomisan dari jembatan *cable-stayed* [6]. Fungsi utama dari pylon adalah mentransmisikan beban dari kabel berupa beban aksial tekan menuju pondasi dan beban yang bekerja ini merupakan hal yang sangat penting dalam proses mendesain pylon [7]. Pemakaian material beton menjadi dasar yang kuat mengingat pylon akan mengalami gaya tekan yang besar.



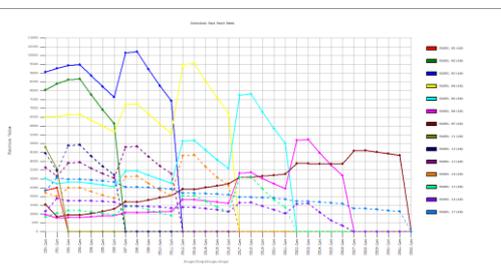
Gambar 8. Evaluasi grafik kontrol keamanan fisiologis berdasarkan amplitudo osilasi.



Gambar 9. Evaluasi grafik kontrol keamanan fisiologis berdasarkan percepatan osilasi.



Gambar 10. tahapan staging jembatan *cable-stayed* secara sederhana pada program MIDASCIVIL.



Gambar 11. Hasil analisis *staging* pada kabel.

III. METODOLOGI

Diagram alir dari perencanaan modifikasi Jembatan Kanor–Rengel dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

Adapun data perencanaan modifikasi Jembatan Kanor–Rengel adalah sebagai berikut:

1. Nama : Jembatan Kanor–Rengel
2. Lokasi : Desa Semambung, Kecamatan Kanor, Kabupaten Bojonegoro
3. Bentang : 308,67 m (42,51+21,17+140+105)
4. Lebar : 19,5 m
5. Jumlah abutmen : 2 buah
6. Jumlah pilar : 1 buah

Tabel 11. *Mass participation* dari struktur jembatan *cable-stayed*

Mode	Arah Longitudinal		Arah Transversal	
	Mass (%)	Sum (%)	Mass (%)	Sum (%)
1	0,00	0,00	27,94	27,94
2	7,54	7,54	0,00	27,94
3	17,20	24,74	0,00	27,94
4	5,05	29,79	0,00	27,94
5	0,00	29,79	22,22	50,16
6	34,34	64,13	0,00	50,16
7	0,37	64,49	0,00	50,16
8	0,83	65,32	0,00	50,16
9	0,00	65,32	27,27	77,43
10	21,66	86,98	0,00	77,43
11	0,00	86,98	8,06	85,49
12	0,04	87,02	0,00	85,49
13	0,96	87,99	0,00	85,49
14	4,95	92,94	0,00	85,49
15	0,03	92,97	0,00	85,49
16	0,16	93,13	0,00	85,49
17	0,00	93,13	3,86	89,35
18	0,76	93,89	0,00	89,35
19	0,33	94,22	0,00	89,35
20	0,13	94,35	0,00	89,35
21	0,01	94,36	0,00	89,35
22	0,03	94,39	0,00	89,35
23	0,00	94,39	1,33	90,68

Tabel 12. *Dimensi kabel* setelah iterasi *pretension load*

No. Kabel	Luas Penampang (mm ²)	Jari-jari (mm)	Jumlah <i> Strand </i> (buah)
M1	10000	112,84	72
M2	25000	178,41	179
M3	25000	178,41	179
M4	20000	159,58	143
M5	20000	159,58	143
M6	20000	159,58	143
M7	20000	159,58	143
S1	15000	138,20	108
S2	15000	138,20	108
S3	10000	112,84	72
S4	10000	112,84	72
S5	10000	112,84	72
S6	10000	112,84	72
S7	10000	112,84	72

7. Material utama : Dek jembatan menggunakan baja *Pylon* menggunakan beton mutu tinggi
Tampak memanjang rencana modifikasi jembatan dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

IV. HASIL PERENCANAAN

A. *Preliminary Design*

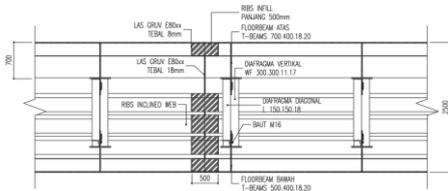
Preliminary design atau dikenal dengan istilah *dimensioning* adalah tahap awal atau pra-analisis untuk menentukan dimensi penampang profil ataupun kebutuhan struktur yang diperlukan sesuai dengan persyaratan, pengalaman dan *sense of engineering* yang dimiliki.

1) *Kabel*

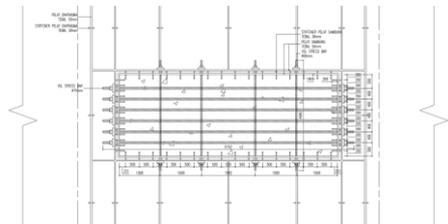
Kabel direncanakan menggunakan mutu ASTM A416-06 Grade 270 dengan jumlah total hingga 14 buah kabel yang terdiri dari 7 buah kabel pada sisi *Main Span* dan 7 buah kabel pada sisi *Side Span* . Dimensi *preliminary design* untuk kabel dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

2) Gelagar

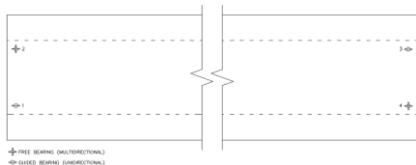
Gelagar direncanakan menggunakan baja mutu BJ55 dengan penampang berupa *single trapezoidal box girder* dan pelat lantai *orthotropic*. Tinggi gelagar pada *preliminary*



Gambar 12. Detail sambungan gelagar dengan gelagar.



Gambar 13. Detai skema sambungan gelagar dengan pylon pada tampak atas.



Gambar 14. Layout perletakan pada jembatan *cabl-stayed*.

Tabel 15. Rekapitulasi hasil kontrol gelagar

Batas Kontrol	Gaya/Nilai Terjadi	Kapasitas	Keterangan
Momen X	334792,8 kN-m	3,54×10 ⁵ kN-m	OK
Momen Y	204767,3 kN-m	1,20×10 ⁶ kN-m	OK
Geser X	3388,88 kN	247082 kN	OK
Geser Y	15016,3 kN	40537,5 kN	OK
Tekan	49140,48 kN	347753,3 kN	OK
Tarik	263,86 kN	358133,2 kN	OK
Torsi	34379,85 kN-m	7,06×10 ⁸ kN-m	OK
Tekan-Lentur	0,991	1,0	OK

Tabel 16. Rekapitulasi detail penulangan *top pylon* dan *low pylon*

Tulangan	Rencana Pemasangan
<i>Top Pylon</i>	
Longitudinal	296D36
Transversal	D25-100
<i>Low Pylon</i>	
Longitudinal	504D36
Transversal	D25-100
Torsi Longitudinal	72D36

design adalah sebesar 2,5 m dengan tebal pelat lantai 18 mm. Elemen-elemen yang membentuk gelagar meliputi *closed ribs*, *floorbeam* berupa *T-Beams*, batang diafragma diagonal, dan batang diafragma vertikal memiliki dimensi/profil sebagaimana dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.** Penampang gelagar dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

Tabel 13. Hasil analisis *staging* pada gelagar

Stage	Axial (kN)	Shear-X (kN)	Shear-Y (kN)	Torsion (kN-m)	Moment-X (kN-m)	Moment-Y (kN-m)
CS0	-24249,04	167,37	1089,83	-334,95	-8371,78	1776,74
CS1	-24128,25	-487,38	926,94	0,00	-8391,08	-16449,09
CS2	-22212,06	-487,38	891,28	0,00	-6949,59	-16449,09
CS3	-22340,75	-451,28	901,34	0,00	-7731,73	-14102,44
CS4	-20589,90	-415,18	690,45	0,00	5659,23	-11936,31
CS5	-18920,50	-379,07	511,88	0,00	17822,97	-9950,68
CS6	-17334,23	-342,97	366,55	0,00	28752,55	-8145,57
CS7	-15362,40	-342,97	682,97	0,00	-12330,06	-8145,57
CS8	-15463,28	-306,87	685,07	0,00	-13107,70	-6520,97
CS9	-14024,63	-270,77	551,42	0,00	1334,21	-5076,88
CS10	-12667,50	-234,66	453,83	0,00	14059,75	-3813,30
CS11	-11393,73	-198,56	393,42	0,00	25050,23	-2730,23
CS12	-7912,45	-198,56	-145,96	0,00	-24048,33	-2730,23
CS13	-7971,91	-162,46	-159,82	0,00	-24666,37	-1827,68
CS14	-7073,30	-126,36	-91,33	0,00	-10542,90	-1105,63
CS15	-6238,90	-90,26	8,37	0,00	1355,21	-564,10
CS16	-5466,99	-54,15	138,42	0,00	11019,83	-203,08
CS17	0,00	-54,15	-1356,51	0,00	-4443,14	-203,08
CS18	-454,14	-18,05	-1675,64	0,00	-3325,25	-22,56
CS19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CS20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CS21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CS22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CS23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CS24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CS25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CS26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CS27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CS28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CS29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CS30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CS31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CS32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MAX	0,00	167,37	1089,83	0,00	28752,55	1776,74
MIN	-24249,04	-487,38	-1675,64	-334,95	-24666,37	-16449,09

Tabel 14. Hasil analisis *staging* pada *top pylon*

Stage	Axial (kN)	Shear-X (kN)	Shear-Y (kN)	Torsion (kN-m)	Moment-X (kN-m)	Moment-Y (kN-m)
CS0	-40155,21	0,00	1801,98	0,00	34579,36	0,00
CS1	-40211,90	0,00	3807,55	0,00	99088,80	0,00
CS2	-39051,22	0,00	3407,63	0,00	96582,64	0,00
CS3	-39182,14	0,00	3417,48	0,00	96715,42	0,00
CS4	-37459,67	0,00	3206,54	0,00	91565,66	0,00
CS5	-35803,45	0,00	2992,39	0,00	86188,93	0,00
CS6	-34200,05	0,00	2767,24	0,00	80042,20	0,00
CS7	-34242,52	0,00	2112,28	0,00	56625,51	0,00
CS8	-34370,43	0,00	2126,99	0,00	56978,95	0,00
CS9	-32635,20	0,00	1945,03	0,00	52659,43	0,00
CS10	-30978,85	0,00	1766,28	0,00	48419,33	0,00
CS11	-29412,32	0,00	1562,06	0,00	43275,58	0,00
CS12	-30232,58	0,00	1123,09	0,00	23526,31	0,00
CS13	-30355,91	0,00	1136,08	0,00	23769,43	0,00
CS14	-28604,91	0,00	973,98	0,00	20775,53	0,00
CS15	-26954,85	0,00	815,86	0,00	17857,34	0,00
CS16	-25446,79	0,00	619,38	0,00	13971,33	0,00
CS17	-25796,02	0,00	206,22	0,00	-1596,03	0,00
CS18	-25904,93	0,00	216,58	0,00	-1439,94	0,00
CS19	-24244,18	0,00	82,32	0,00	-3453,99	0,00
CS20	-22709,07	0,00	-45,04	0,00	-5357,03	0,00
CS21	-21380,39	0,00	-219,17	0,00	-8096,93	0,00
CS22	-19751,33	0,00	-887,15	0,00	-22698,47	0,00
CS23	-19817,95	0,00	-880,87	0,00	-22621,70	0,00
CS24	-18702,20	0,00	-973,59	0,00	-23756,20	0,00
CS25	-17691,90	0,00	-1055,87	0,00	-24760,10	0,00
CS26	-16894,48	0,00	-1181,10	0,00	-26309,01	0,00
CS27	-14300,38	0,00	-2290,67	0,00	-40504,76	0,00
CS28	-14308,27	0,00	-2289,95	0,00	-40498,23	0,00
CS29	-14169,04	0,00	-2303,36	0,00	-40618,91	0,00
CS30	-14032,69	0,00	-2312,71	0,00	-40703,11	0,00
CS31	-13907,21	0,00	-2326,23	0,00	-40824,76	0,00
CS32	-8635,35	0,00	-3314,79	0,00	-49721,76	0,00
MAX	-8635,35	0,00	3807,55	0,00	99088,80	0,00
MIN	-40211,90	0,00	-3314,79	0,00	-49721,76	0,00

3) Pylon

Pylon direncanakan menggunakan beton bertulang dengan mutu beton f_c' 40 MPa dan mutu tulangan BJTS 420. Dimensi penampang *pylon* dan kemiringan *pylon* sebagai akibat konfigurasi kabel asimetris pada arah longitudinal ditentukan berdasarkan besarnya resultan gaya pada *pylon* yang dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

Berdasarkan resultan gaya yang diperoleh, dimensi penampang dan kemiringan *pylon* terhadap horizontal dapat ditentukan. Untuk ukuran dimensi penampang *pylon* dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

Kemiringan *pylon* :

$$\theta = \text{atan} \left(\frac{\sum F_y}{\sum F_x} \right) = \text{atan} \left(\frac{-135106,58}{-47011,97} \right) = 70,81^\circ \approx 70^\circ$$

B. Perencanaan Struktur Sekunder

Perencanaan Struktur Sekunder meliputi lantai *orthotropic*, diafragma dan *bottom floorbeam*, *railing*, dan

C. Pemodelan dan Analisis Struktur

Pemodelan struktur jembatan *cabl-stayed* dilakukan dengan program bantu MIDASCIVIL v.2022. Jembatan dimodelkan dengan *fishbone method*, dimana gelagar hanya dimodelkan dengan satu *frame* untuk penampang gelagar berupa *single trapezoidal box girder*. Pemodelan jembatan *cabl-stayed* pada program MIDASCIVIL dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

Tabel 17.
Hasil analisis *staging* pada low *pylon*

Stage	Axial (kN)	Shear-X (kN)	Shear-Y (kN)	Torsion (kN-m)	Moment-X (kN-m)	Moment-Y (kN-m)	Stage	Axial (kN)	Shear-X (kN)	Shear-Y (kN)	Torsion (kN-m)	Moment-X (kN-m)	Moment-Y (kN-m)
CS0	-54640,75	497,04	-20974,62	-1403,38	-234985,15	6014,95	CS18	-44268,52	459,34	-12135,75	-1432,68	-197641,95	5825,58
CS1	-49075,57	540,43	-33917,71	-1372,25	-287553,13	6232,68	CS19	-43121,23	452,29	-11492,53	-1438,01	-194820,54	5790,18
CS2	-48673,81	540,43	-32436,11	-1372,25	-281531,81	6232,68	CS20	-42081,30	445,24	-10856,06	-1443,33	-191998,61	5754,79
CS3	-48760,30	533,38	-32547,31	-1377,57	-282099,44	6197,29	CS21	-41355,77	441,71	-9927,11	-1445,73	-187922,21	5737,07
CS4	-47637,82	526,33	-31293,36	-1382,90	-276751,29	6161,89	CS22	-40086,22	441,71	-7613,68	-1445,73	-180621,83	5737,07
CS5	-46583,84	519,28	-30063,59	-1388,22	-271595,64	6126,50	CS23	-40118,56	434,66	-7644,39	-1451,05	-180761,25	5701,67
CS6	-45630,62	515,75	-28734,56	-1390,62	-266060,99	6108,78	CS24	-39524,16	427,59	-7302,95	-1456,39	-179310,66	5666,20
CS7	-47638,69	515,75	-24080,16	-1390,62	-246862,29	6108,78	CS25	-38994,64	420,47	-6958,60	-1461,77	-177787,15	5630,41
CS8	-47721,58	508,70	-24165,38	-1395,94	-247225,15	6073,38	CS26	-38780,91	416,88	-6224,13	-1464,21	-174402,13	5612,42
CS9	-46527,81	501,65	-23131,62	-1401,27	-242830,83	6037,99	CS27	-37101,33	416,88	-3908,09	-1464,21	-169128,72	5612,42
CS10	-45409,97	494,60	-22107,96	-1406,59	-238471,32	6002,59	CS28	-37091,24	409,61	-3917,29	-1469,69	-169179,70	5575,94
CS11	-44455,13	491,07	-20926,63	-1408,99	-233502,65	5984,88	CS29	-37317,15	402,21	-3896,63	-1475,29	-169061,88	5538,76
CS12	-46480,55	491,07	-17452,89	-1408,99	-219398,70	5984,88	CS30	-37507,69	394,63	-3805,01	-1481,02	-168531,06	5500,72
CS13	-46562,00	484,02	-17523,26	-1414,31	-219704,29	5949,48	CS31	-37758,96	390,80	-3297,25	-1483,62	-165703,96	5481,50
CS14	-45328,42	476,97	-16664,69	-1419,64	-215975,82	5914,08	CS32	-34717,43	390,80	-548,02	-1483,62	-156300,96	5481,50
CS15	-44188,66	469,92	-15815,29	-1424,96	-212276,52	5878,69	MAX	-34717,43	540,43	-548,02	-1372,25	-156300,96	6232,68
CS16	-43285,45	466,39	-14748,27	-1427,36	-207712,45	5860,97	MIN	-54640,75	390,80	-33917,71	-1483,62	-287553,13	5481,50
CS17	-44198,60	466,39	-12082,79	-1427,36	-197407,75	5860,97							

trotoar.

1) Lantai Orthotropic

Perencanaan lantai *orthotropic* yang terdiri dari pelat lantai, *ribs*, dan *top floorbeam* dilakukan dengan pendekatan analitis yang disebut sebagai metode Pelikan-Esslinger untuk mendapatkan nilai tegangan pada beberapa lokasi [8]. Hasil kontrol tegangan untuk seluruh elemen *orthotropic* dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

Sambungan yang digunakan pada elemen lantai *orthotropic* berupa sambungan las yang detailnya dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

2) Diafragma dan Bottom Floorbeam

Perencanaan diafragma dan *bottom floorbeam* dilakukan dengan melakukan kontrol kapasitas profil terhadap gaya yang terjadi sebagaimana dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

Sambungan yang digunakan pada batang diafragma dan *bottom floorbeam* menggunakan sambungan baut dan las yang detailnya dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

3) Railing

Railing direncanakan menggunakan baja mutu BJ41 dengan elemen yang terdiri dari pipa horizontal berupa *circular hollow* Ø3,5” dan tiang sandaran berupa *rectangular hollow* 200×200×8. Detail sambungan yang digunakan pada railing dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

4) Trotoar

Trotoar direncanakan menggunakan beton bertulang mutu *f_c*’ 30 MPa dengan lebar 1 m dan tebal 0,3 m. Untuk tulangan yang digunakan adalah mutu BJTS 420 dan *shear connector* tipe B sesuai AWS D1 [9]. Penulangan yang digunakan terdiri dari tulangan lentur D13-150 dan tulangan susut/suhu D10-150.

1) Vibrating Mode Shape dan Mass Participation

Berdasarkan hasil analisis struktur jembatan *cabl-stayed* pada program MIDASCIVIL dapat diketahui *vibration mode shape* dengan rincian berupa frekuensi dan periode alami struktur jembatan *cabl-stayed* pada **Error! Reference source not found.**

Selain itu, dapat diketahui pula besarnya *mass participation* dari struktur jembatan *cabl-stayed* yang telah memenuhi minimal partisipasi 90% untuk arah longitudinal dan transversal [10] seperti yang dapat dilihat pada Tabel 11.

2) Perencanaan Struktur Primer

Perencanaan struktur primer dimulai dari merencanakan kabel, gelagar, kemudian *pylon*.

a. Kabel

Dimensi kabel yang diperoleh sesuai **Error! Reference source not found.** selanjutnya akan mengalami penyesuaian akibat iterasi *pretension load* pada kabel sebagaimana dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

Selanjutnya, dimensi kabel sesuai pada **Error! Reference source not found.** dikontrol terhadap gaya *pretension*, gaya akibat kombinasi pembebanan jembatan, dan gaya akibat adanya satu kabel putus. Hasil kontrol kabel terhadap gaya-gaya tersebut tersaji pada grafik yang dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

Berdasarkan hasil kontrol sesuai **Error! Reference source not found.**, dapat diketahui bahwa kabel telah memenuhi batas kontrol terhadap gaya-gaya yang terjadi.

b. Gelagar

Perencanaan gelagar sebagai *single trapezoidal box girder* dilakukan dengan melakukan kontrol kapasitas penampang terhadap gaya dalam yang terjadi akibat kombinasi beban statik dan dinamik. Hasil kontrol penampang gelagar terhadap gaya yang terjadi dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

Selain melakukan kontrol terhadap gaya dalam yang terjadi, gelagar juga dikontrol terhadap lendutan yang terjadi.

Kontrol lendutan gelagar :

$$\delta_{ijin} \geq \delta ; 245 \text{ mm} \geq 150,72 \text{ mm (memenuhi)}$$

c. Pylon

Pylon yang direncanakan terdiri dari dua bagian yakni sisi atas (*top pylon*) dan sisi bawah (*low pylon*). *Top pylon* dan *low pylon* direncanakan menggunakan beton bertulang untuk mengakomodir seluruh gaya dalam yang terjadi pada *pylon* baik akibat beban statik maupun dinamik dengan rincian hasil rencana penulangan seperti yang dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

3) Kontrol Stabilitas Aerodinamis

a. Cek Angka Mathivat

Besarnya angka *Mathivat* dapat ditentukan dengan menghitung rasio f_r/f_b yang harus berkisar atau mendekati angka 2,5. Nilai dari frekuensi diperoleh sesuai **Error! Reference source not found.** untuk torsi pertama (f_r) pada *mode* ke-5 dan lentur vertikal pertama (f_b) pada *mode* ke-2.

Tabel 19.

Rekapitulasi hasil kontrol pelat koneksi angkur untuk setiap kabel

No. Kabel	Unit Kabel	P_u (kN)	ϕP_n (kN)	Kontrol
M1	6-73	2883,55	25149,8	OK
M2	6-187	9721,46	33900	OK
M3	6-187	11327,27	33900	OK
M4	6-151	10332,95	31900	OK
M5	6-151	11141,09	31900	OK
M6	6-151	10375,39	31900	OK
M7	6-151	5064,92	31900	OK
S1	6-109	6976,91	28275	OK
S2	6-109	6814,97	28275	OK
S3	6-73	5664,77	25149,8	OK
S4	6-73	4893,16	25149,8	OK
S5	6-73	4907,75	25149,8	OK
S6	6-73	7139,79	25149,8	OK
S7	6-73	3838,87	25149,8	OK

Tabel 20.

Rekapitulasi kontrol tegangan beton dan rencana penulangan pada daerah pengukuran

No. Kabel	Unit Kabel	P_u (kN)	P_r (kN)	Kontrol	Tulangan	
					Bursting	Bursting
M1	6-73	2883,55	7485,96	OK	D16-150	4D16
M2	6-187	9721,46	15802,4	OK	D16-150	4D16
M3	6-187	11327,3	15802,4	OK	D16-150	4D16
M4	6-151	10333	12419,5	OK	D16-150	4D16
M5	6-151	11141,1	12419,5	OK	D16-150	4D16
M6	6-151	10375,4	12419,5	OK	D16-150	4D16
M7	6-151	5064,92	12419,5	OK	D16-150	4D16
S1	6-109	6976,91	9531,34	OK	D16-150	2D16
S2	6-109	6814,97	9531,34	OK	D16-150	2D16
S3	6-73	5664,77	7485,96	OK	D16-150	4D16
S4	6-73	4893,16	7485,96	OK	D16-150	4D16
S5	6-73	4907,75	7485,96	OK	D16-150	4D16
S6	6-73	7139,79	7485,96	OK	D16-150	4D16
S7	6-73	3838,87	7485,96	OK	D16-150	4D16

$$\frac{f_T}{f_B} = \frac{2,275}{0,904} = 2,51 \approx 2,5 \text{ (memenuhi)}$$

b. Kontrol Efek Vortex-Shedding

Kontrol efek *vortex-shedding* dilakukan dengan melihat tingkat keamanan fisiologis dari jembatan *cabl-stayed* berdasarkan amplitudo dan percepatan osilasi yang terjadi. Evaluasi grafik kontrol keamanan fisiologis jembatan *cabl-stayed* dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.** dan **Error! Reference source not found.**

Berdasarkan hasil evaluasi kontrol keamanan fisiologis, dapat diketahui bahwa jembatan *cabl-stayed* berada di Zona A (*Acceptable*) baik berdasarkan amplitudo osilasi maupun percepatan osilasi .

c. Kontrol Efek Flutter

Kontrol efek *flutter* ditentukan berdasarkan kecepatan angin rencana pada jembatan. Kecepatan angin rencana harus bernilai lebih kecil dari kecepatan angin kritis aktual untuk mencegah terjadinya *flutter* pada jembatan *cabl-stayed*.

$$V_{kritis-aktual} \geq V_{DZ}$$

$$175,1 \text{ m/s} \geq 31,35 \text{ m/s (memenuhi)}$$

4) Analisis Staging

Metode pelaksanaan (*staging*) dari jembatan *cabl-stayed* pada penelitian ini didesain menggunakan *cantilever method*. Pekerjaan dimulai dengan (1) pekerjaan *pylon* beton bertulang yang pada sisi-sisinya terdapat segmen gelagar yang ditopang oleh perancah sementara, (2) pemasangan

Tabel 18.

Jenis dan tipe *pot bearing* rencana

Jenis <i>Pot bearing</i>	Tipe
<i>Guided Bearing</i>	PU-11000-H30% ±50
<i>Free Bearing</i>	SPL-9000 ±50

kabel pada titik-titik angkur gelagar, (3) pemasangan *segment lifter* di atas gelagar yang sudah terpasang, dan (4) pemasangan segmen-segmen gelagar berikutnya dengan diangkat oleh *segment lifter*. Secara sederhana proses *staging* jembatan *cabl-stayed* dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

Staging pada jembatan *cabl-stayed* terdiri dari total 33 tahapan. Pada tahap analisis *staging* ini, dilakukan kontrol kembali elemen struktur primer meliputi kabel, gelagar, dan *pylon* terhadap gaya yang terjadi selama masa *staging*. Hasil analisis *staging* pada kabel dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

Untuk hasil analisis *staging* gelagar, *top pylon*, dan *low pylon* secara berturut-turut dapat dilihat pada **Error! Reference source not found., Error! Reference source not found., dan Error! Reference source not found.**

Berdasarkan hasil analisis *staging*, diketahui bahwa seluruh gaya yang terjadi selama masa *staging* pada elemen meliputi kabel, gelagar, dan *pylon* yang direncanakan masih lebih kecil dari kapasitas maksimumnya sehingga jembatan dapat dikatakan aman terhadap gaya yang terjadi selama masa *staging*.

D. Detail Lainnya

Detail lain yang dibahas adalah desain angkur, sambungan struktur, desain perletakan, dan desai *expansion joint*.

1) Desain Angkur

Angkur kabel yang digunakan pada perencanaan ini sesuai dengan spesifikasi teknis dari *VSL Stay Cable System : Technical Catalogue 2018* tipe *VSL SSI 2000*. Berdasarkan kebutuhan jumlah *strand* kabel pada **Error! Reference source not found.** maka digunakan angkur dengan total kebutuhan empat unit kabel, yaitu unit 6-73, 6-109, 6-151, dan 6-187.

a. Angkur Mati pada Gelagar

Angkur mati pada gelagar direncanakan menggunakan pelat koneksi baja mutu BJ41 sebagai penghubung antara gelagar dengan angkur. Pelat koneksi akan dikontrol terhadap gaya tarik kabel yang terjadi dan sambungan direncanakan menggunakan las sudut. Hasil kontrol pelat koneksi angkur untuk setiap kabel dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

Seluruh pelat koneksi disambung pada gelagar dengan menggunakan sambungan las filet mutu E70xx tebal 8 mm .

b. Angkur Hidup pada Pylon

Perencanaan angkur hidup pada pylon dilakukan dengan melakukan kontrol tegangan pada beton terhadap gaya tarik kabel yang terjadi. Selain itu, direncanakan pula penulangan akibat gaya-gaya internal berupa *bursting* dan *spalling* yang terjadi di sekitar pengangkur [11]. Hasil kontrol tegangan beton pada pylon dan detail penulangannya pada **Error! Reference source not found.**

2) Sambungan Struktur Primer

a. Sambungan Gelagar dengan Gelagar

Pada sambungan gelagar dengan gelagar digunakan sambungan las gruv (tumpul) Penetrasi Joint Komplet (PJK). Sesuai dengan persyaratan logam pengisi las gruv PJK untuk logam dasar A913 Gr. 60 dan 65 (mendekati mutu baja gelagar berupa BJ55) pada SNI 1729-2020 Pasal J2 Poin 6, maka digunakan logam pengisi 80 ksi (E80xx) dengan ketebalan beragam sesuai dengan tebal pelat tertipis yang disambung. Untuk menyambung *ribs* dengan *ribs*, digunakan bantuan berupa *ribs infill* pada pertemuan *ribs* dengan *ribs*. Detail sambungan gelagar dengan gelagar dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

b. Sambungan Gelagar dengan Pylon

Sambungan yang direncanakan harus mampu menahan semua gaya yang terjadi pada daerah hubungan gelagar-*pylon* dengan membuat sambungan yang monolit. Sebagai referensi, *Queensferry Crossing Bridge* sebagai salah satu jembatan *cabl-stayed* yang berada di dekat kota Edinburgh, Skotlandia juga menggunakan konsep serupa dimana hubungan antara gelagar baja dengan *pylon* beton bertulang harus dibuat cukup kaku. Titik hubungan tersebut disebut sebagai '*power joint*' [12]. Sambungan gelagar dengan *pylon* akan menggunakan *shear connector* berupa *headed stud* tipe B sesuai dengan AWS D1 [9] dan *prestressing* dengan *stress bar* sesuai dengan *VSL CT Stress Bar Systems : Technical Catalogue 2023*. *Stress bar* yang digunakan terdiri dari *bar* diameter 56 mm untuk arah transversal dan diameter 75 mm untuk arah longitudinal jembatan. Detail skema sambungan gelagar dengan *pylon* pada tampak atas pada **Error! Reference source not found.**

3) Desain Perletakan

Perletakan yang digunakan berupa *pot bearing* sesuai dengan spesifikasi teknis dari *VSL Structural Bearing : Technical Catalogue 2023* tipe *VPot bearings*. Jenis *pot bearing* yang digunakan terdiri dari *multidirectional (free bearing)* dan *unidirectional (guided bearing)*. *Pot bearing* yang digunakan ditempatkan pada bagian bawah gelagar sesuai dengan *layout* perletakan pada **Error! Reference source not found.**

Berdasarkan hasil perencanaan, maka digunakan *pot bearing* dengan rincian yang dapat dilihat pada **Error! R**

ference source not found. Baik *guided bearing* maupun *free bearing* rencana, telah mampu mengakomodir besarnya gaya dan *displacement* pada perletakan jembatan *cabl-stayed*.

4) Desain Expansion Joint

Pada penelitian ini direncanakan *expansion joint* berupa *modular expansion joint* yang berfungsi untuk mengakomodasi *movement/displacement* yang cukup besar pada jembatan. *Modular expansion joint* merupakan gabungan dari dua atau lebih gabungan *strip seal joint* yang dapat mengakomodasi *movement* lebih dari 100 mm [13]. *Modular joint expansion* yang digunakan sesuai dengan spesifikasi teknis *MAURER Swivel-Joist Expansion Joint* untuk *movement of support bars to one side only*.

Berdasarkan hasil perencanaan, maka digunakan *expansion joint* tipe DS160. Tipe *expansion joint* tersebut telah mampu mengakomodir besarnya *displacement* yang terjadi pada lantai kendaraan .

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan perencanaan yang telah dilakukan, berikut merupakan beberapa kesimpulan yang dapat ditarik pada penelitian ini: (1) Seluruh elemen struktur sekunder meliputi lantai *orthotropic*, batang diafragma, *floorbeam*, *railing*, dan trotoar telah memenuhi seluruh batas kontrol yang disyaratkan. (2) Seluruh elemen struktur primer meliputi kabel, gelagar, dan *pylon* telah memenuhi seluruh batas kontrol yang disyaratkan. (3) Kontrol stabilitas aerodinamis meliputi cek angka *Mathivat*, efek *vortex-shedding*, dan *flutter* telah memenuhi batas yang disyaratkan. (4) Pelaksanaan konstruksi jembatan menggunakan *cantilever method* dan seluruh elemen jembatan *cabl-stayed* memenuhi batas kontrol yang disyaratkan selama masa konstruksi berlangsung. (5) Sambungan yang digunakan pada jembatan meliputi sambungan baut dan sambungan las telah memenuhi seluruh batas kontrol. Untuk hubungan gelagar dengan *pylon* menggunakan desain sambungan yang dikombinasikan dengan *headed stud* dan *stress bar*. (6) Desain angkur menggunakan total variasi 4 unit kabel dan telah memenuhi seluruh batas kontrol yang disyaratkan. (7) *Expansion joint* yang digunakan telah memenuhi besarnya *displacement* yang terjadi pada lantai kendaraan.

Saran yang diberikan sebagai bentuk evaluasi dan pengembangan lebih lanjut dari penelitian-penelitian serupa berikutnya, maka terdapat beberapa saran yang dapat dilakukan: (1) Perencanaan lantai *orthotropic* tidak hanya menggunakan pendekatan analitis, tetapi juga mengembangkan penggunaan analisis *Finite Element Method (FEM)* sehingga didapatkan hasil yang lebih akurat dan mendekati kondisi sebenarnya. (2) Perencanaan jembatan perlu meninjau kondisi trase jalan eksisting agar memperoleh hasil perencanaan yang lebih akurat dan mendekati kondisi sebenarnya. (3) Perencanaan metode pelaksanaan jembatan perlu dikembangkan lebih detail lagi dengan meninjau lebih banyak referensi-referensi pelaksanaan jembatan *cabl-stayed* yang telah dilakukan di dunia selama ini agar nantinya studi tidak hanya berhenti pada analisis dan rencana, tetapi juga cukup memungkinkan untuk dikembangkan lebih lanjut dan direalisasikan. (4) Perencanaan jembatan pada tahap kontrol aerodinamis dapat dikembangkan dengan

penggunaan *wind tunnel*, sehingga didapatkan hasil yang lebih akurat dan mendekati kondisi sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, *Buku Saku Petunjuk Kontruksi Jembatan*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2022.
- [2] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, *Surat Edaran Menteri PUPR No. 08/SE/M/2015: Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2015.
- [3] M. S. Troitsky, *Cable-Stayed Bridges: Theory and Design*, 2nd ed. Oxford: BSP Professional Books, 1988.
- [4] R. Walther, *Cable Stayed Bridges*. London: Thomas Telford, 1999.
- [5] J. Vianny X, V. S, and S. S, "Behavior of asymmetric cable stayed bridge for long span," *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, vol. 9, no. 7, pp. 600–605, May 2020, doi: 10.35940/ijtee.G5437.059720.
- [6] W. Podolny and J. B. Scalzi, *Construction and Design of Cable-Stayed Bridges*. Virginia: John Wiley & Sons, 1986.
- [7] G. Parke and N. Hewson, *ICE Manual of Bridge Engineering*, 2nd ed. Westminster: Thomas Telford Limited, 2008.
- [8] C. P. Heins and D. A. Firmage, *Design of Modern Steel Highway Bridges*. New York: John Wiley and Sons, 1979.
- [9] American Welding Society, *Structural Welding Code-Steel*, 24th ed. United States: American Welding Society, 2020.
- [10] American Association of State Highway and Transportation Officials, *AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design, 2nd Edition, 2022 Interim Revisions*, 2nd ed. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011.
- [11] American Association of State Highway and Transportation Officials, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 9th Edition*, 9th ed. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020.
- [12] J. C. Kærn and J. E. Hansen, "Queensferry crossing cable-stayed composite bridge," *civil engineering papers*, vol. 1, no. 2–3, pp. 4143–4152, Sep. 2017, doi: 10.1002/cepa.471.
- [13] S. H. Dahir and D. B. Mellott, "Bridge deck expansion joints," *Transp Res Rec*, no. 1118, pp. 16–24, 1988.