

Modifikasi Struktur Jembatan Kereta Api *Elevated* Simpang Joglo dengan Sistem *Cabled-Stayed Double Plane Bridge*

Koresy Kevin Hamonangan Sianipar, Hidajat Sugihardjo, dan Ahmad Basshofi Habieb
Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: hidayat@ce.its.ac.id

Abstrak—Jembatan adalah suatu konstruksi yang meneruskan jalan melalui suatu rintangan yang permukaannya lebih rendah. Jembatan cable-stayed adalah salah satu jenis jembatan bentang panjang dengan sistem cable supported dengan bentang lebih dari 150 m. Jenis jembatan ini sudah banyak dibangun di berbagai belahan dunia karena terbukti efektif dan efisien untuk bentang jembatan lebih 150 m. Struktur jembatan *cable-stayed* terdiri atas gelagar utama sebagai dek lantai kendaraan, kabel yang berfungsi menyalurkan beban dari gelagar utama menuju pylon, dan pylon sebagai penahan kabel. Perencanaan ini membahas “Modifikasi Struktur Jembatan Kereta Api *Elevated* Simpang Joglo dengan Sistem *Cable-stayed Double Plane Bridge*” yang melintasi simpang tujuh Joglo di Kecamatan Banjarsari, Kota Surakarta. Jembatan ini memiliki bentang 271,4 m terbagi dalam 2 bentang dengan lebar 9 m dan jumlah pylon berjumlah 2 buah. Konfigurasi kabel jembatan arah memanjang menggunakan tipe *semi harp pattern* dan arah melintang menggunakan sistem *double plane*. Gelagar utama direncanakan menggunakan *twin rectangular box girder*. Metode pelaksanaan pembangunan jembatan menggunakan metode *balanced cantilever* yang dianalisis dengan *backward analysis*. Perencanaan modifikasi dimulai dari studi literatur dan pengumpulan data, *preliminary design*, perhitungan pembebanan, desain struktur lantai kendaraan, desain struktur utama (*box girder*, *pylon* dan kabel), kontrol statis dan dinamis, kontrol perilaku aerodinamis, analisis *staging*, desain anker dan sambungan, perencanaan perletakan, hingga pembuatan gambar rencana. Hasil dari perencanaan ini didapatkan dimensi lantai kendaraan, dimensi box girder, dimensi kabel, dimensi *pylon*, dimensi anker dan sambungan, dan dimensi perletakan jembatan. Perencanaan modifikasi dibantu dengan *software* MidasCivil, SAP2000 dan Autocad. Peraturan yang digunakan adalah PM. 60 Tahun 2012, SNI 2833:2016, SNI 1729 : 2020 dan SNI 2847:2019.

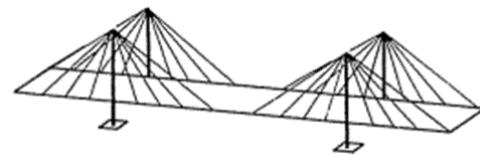
Kata Kunci—*Balanced Cantilever*, *Cabled-Stayed*, *Double-Plane*, *Harp-Pattern*, Jembatan, Kereta api, *Twin Rectangular Box Girder*.

I. PENDAHULUAN

INFRASTRUKTUR transportasi merupakan salah satu aspek penting dalam kehidupan bermasyarakat. Infrastruktur transportasi berfungsi untuk melancarkan hubungan antara tempat yang satu dengan tempat yang lainnya. Salah satu infrastruktur transportasi tersebut adalah jembatan. 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. Jembatan merupakan investasi tertinggi dari semua elemen yang dapat dijumpai pada sistem jalan raya. Setiap kerusakan jembatan dapat menyebabkan timbulnya gangguan dalam kelancaran perputaran roda ekonomi dan dapat menimbulkan kecelakaan bagi manusia [1].

Tabel 1.
Preliminary design kabel

Kabel	Asc,i (mm ²)	n	n ≈	A _{pakai} (mm ²)	d _{pakai} (mm ²)
6	3556,81	25,41	26	3640	68,1
5	3558,94	25,42	26	3640	68,1
4	3561,52	25,44	26	3640	68,1
3	3564,16	25,46	26	3640	68,1
2	3567,05	25,48	26	3640	68,1
1	2802,45	20,02	21	2940	61,2
7	3556,81	25,41	26	3640	68,1
8	3558,94	25,42	26	3640	68,1
9	3561,52	25,44	26	3640	68,1
10	3564,16	25,46	26	3640	68,1
11	4458,81	31,85	32	4480	75,5
12	2677,09	19,12	20	2800	59,7



(b) Two lateral planes (double plane)

Gambar 1. Sistem kabel *double plane*.

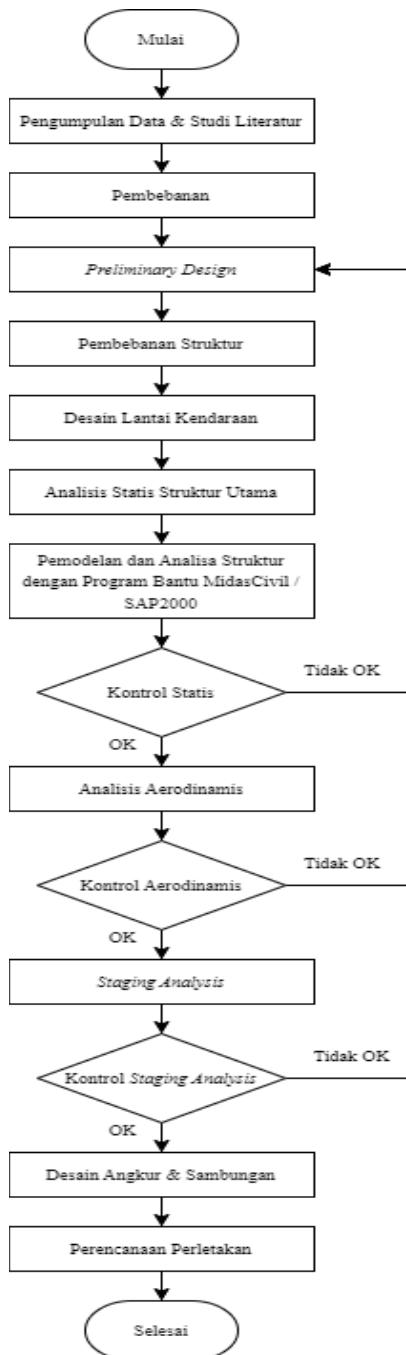


(c) Semi harp pattern

Gambar 2. Sistem kabel *semi-harp pattern*.

Simpang Tujuh Joglo berada di Kelurahan Kadipiro, Kecamatan Banjarsari, Surakarta. Simpang ini merupakan pertemuan jalan nasional dari arah Semarang, Surabaya, Jakarta dan dari Kota Surakarta yang melewati dua perlintasan sebidang dengan Kereta Api dengan konsep melingkar. Konsep perlintasan sebidang ini membuat kemacetan mencapai tujuh jam sehari berdasarkan frekuensi perjalanan kereta api di perlintasan kereta api di perlintasan Simpang Joglo yang rata-ratanya 30 kali dalam sehari. Seiring dengan diaktifkannya Kereta Api Bandara relasi Solo Balapan – Bandara Adi Soemarno dan peningkatan jumlah kendaraan yang meintas di Simpang Joglo, maka diperlukan solusi dengan membuat jembatan kereta api *elevated* untuk menutup perlintasan sebidang ini.

Jembatan kereta api *elevated* Simpang Joglo memulai masa konstruksi pada Desember 2021. Jembatan ini didesain dengan konstruksi rangka batang baja dengan panjang total 274 m. Jembatan ini dibagi menjadi 3 bentang dengan 4 pilar. Dengan bentang 274 m, Jembatan Kereta Api *Elevated* Simpang Joglo diklasifikasikan sebagai jembatan bentang panjang. Dengan desain jembatan menggunakan rangka batang, untuk panjang 274 m ini dibutuhkan banyak batang baja dan membuat tinggi rangka hingga mencapai 30 m.



Gambar 3. Diagram alir penyelesaian perencanaan.

Penggunaan banyak batang baja membuat berat struktur jembatan ini menjadi lebih berat sehingga tidak efisien.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Jembatan bentang panjang adalah jembatan yang memiliki panjang bentang ≥ 100 m sesuai dengan persyaratan Bina Marga. Jembatan bentang panjang dapat dibuat dalam dua tipe, yaitu jembatan pelengkung (*arch bridge*) dan jembatan kabel (*cable supported bridge*). Jembatan kabel terbagi lagi menjadi dua jenis, yaitu jembatan beruji kabel (*cable-stayed*) dan jembatan gantung (*suspension*).

Jembatan *cable-stayed* merupakan struktur jembatan yang memiliki sederetan kabel yang menjadi tumpuan yang dihubungkan dengan pylon sebagai penahan utama untuk menyalurkan beban yang bekerja pada lantai dek jembatan menuju pondasi. Komponen utama jembatan *cable-stayed*

Tabel 2.
Kontrol gaya *stressing* kabel

No. Kabel	Gaya <i>Stressing</i> kN	n	A_{perlu} (m ²)	F_{ijin} (45% f_u)(kN/m ²)	Gaya Ijin Max (kN)	Cek Gaya ijin max > Gaya <i>Stressing</i>
1	1676,83	73	0,01022	837000	8554,14	OK
2	1479,22	73	0,01022	837000	8554,14	OK
3	1411,93	43	0,00602	837000	5038,74	OK
4	1132,73	43	0,00602	837000	5038,74	OK
5	837,85	37	0,00518	837000	4335,66	OK
6	463,17	22	0,00308	837000	2577,96	OK
7	450,43	37	0,00518	837000	4335,66	OK
8	1057,58	55	0,0077	837000	6444,9	OK
9	1501,10	61	0,00854	837000	7147,98	OK
10	1696,86	73	0,01022	837000	8554,14	OK
11	1732,19	85	0,0119	837000	9960,3	OK
12	1736,07	85	0,0119	837000	9960,3	OK

Tabel 3.
Kontrol kombinasi beban layan kabel

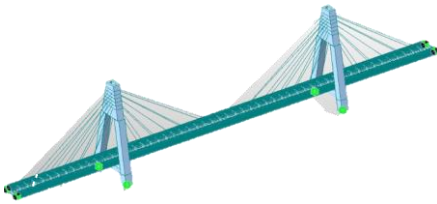
No. Kabel	Gaya <i>Stressing</i> kN	n	A_{perlu} (m ²)	F_{ijin} (45% f_u)(kN/m ²)	Gaya Ijin Max (kN)	Cek Gaya ijin max > Gaya <i>Stressing</i>
1	1676,83	73	0,01022	837000	8554,14	OK
2	1479,22	73	0,01022	837000	8554,14	OK
3	1411,93	43	0,00602	837000	5038,74	OK
4	1132,73	43	0,00602	837000	5038,74	OK
5	837,85	37	0,00518	837000	4335,66	OK
6	463,17	22	0,00308	837000	2577,96	OK
7	450,43	37	0,00518	837000	4335,66	OK
8	1057,58	55	0,0077	837000	6444,9	OK
9	1501,10	61	0,00854	837000	7147,98	OK
10	1696,86	73	0,01022	837000	8554,14	OK
11	1732,19	85	0,0119	837000	9960,3	OK
12	1736,07	85	0,0119	837000	9960,3	OK

Tabel 4.
Kontrol kabel satu putus

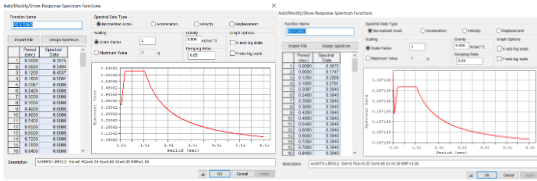
No. Kabel	Gaya <i>Stressing</i> kN	n	A_{perlu} (m ²)	F_{ijin} (45% f_u)(kN/m ²)	Gaya Ijin Max (kN)	Cek Gaya ijin max > Gaya <i>Stressing</i>
1	5604,27	73	0,01022	837000	8554,14	OK
2	5826,42	73	0,01022	837000	8554,14	OK
3	4116,45	43	0,00602	837000	5038,74	OK
4	3871,51	43	0,00602	837000	5038,74	OK
5	2905,23	37	0,00518	837000	4335,66	OK
6	1205,26	22	0,00308	837000	2577,96	OK
7	1702,08	37	0,00518	837000	4335,66	OK
8	3764,23	55	0,0077	837000	6444,9	OK
9	5109,19	61	0,00854	837000	7147,98	OK
10	6204,97	73	0,01022	837000	8554,14	OK
11	0	85	0,0119	837000	9960,3	OK
12	5631,21	85	0,0119	837000	9960,3	OK

terdiri atas pylon, gelagar dan kabel. Masing-masing komponen mempunyai berbagai tipe dan bentuk sesuai fungsinya [2].

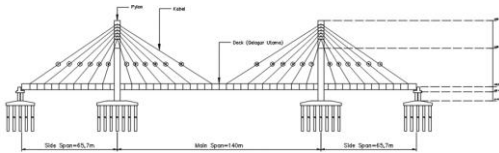
Konstruksi jembatan *cable-stayed* terdiri atas sistem struktur yang meliputi suatu gelagar menerus yang didukung oleh penunjang berupa kabel yang dibentang miring dan dihubungkan ke pylon sebagai tumpuan utamanya. Kabel – Kabel tersebut umumnya menyebar dari satu atau lebih tiang penyangga. Untuk jembatan dengan bentang panjang yang cukup panjang diperlukan struktur kabel yang berfungsi sebagai pylon – pylon penghubung dalam memikul sebagian besar dari beban jembatan yang kemudian dilimpahkan ke pondasi. Beban – beban yang bekerja pada jembatan dipikul oleh gelagar. Beban yang dipikul oleh gelagar akan menjadi gaya – gaya yang bekerja pada gelagar. Gaya- gaya yang dipikul oleh gelagar disalurkan ke kabel dan pylon. Gaya yang ditanggung oleh oleh kabel kemudian di teruskan menuju pylon. Kemudian pylon menyalurkan gaya – gaya dari kabel



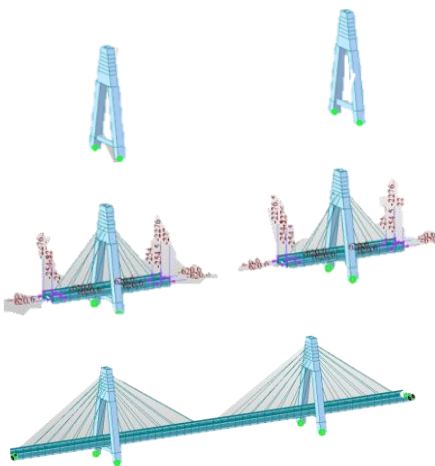
Gambar 4. Pemodelan struktur model jembatan pada program bantu analisa struktur midascivil.



Gambar 5. Respon spektrum arah X (kiri) dan arah Y (kanan).



Gambar 6. Struktur kabel.



Gambar 7. Tahapan staging analysis.

dan gelagar ke pondasi kemudian menyalurkan gaya – gaya tersebut kedalam tanah.

Pada konfigurasi *double plane* seperti pada Gambar 1, gelagar utama ditahan oleh struktur kabel pada kedua sisi. Angkur kabel dapat pasang di bagian dalam atau di luar gelagar utama. Sistem kabel dua bidang dapat berupa bidang vertikal sejajar atau dua bidang miring yang pada sisi atas menyatu. Kabel akan terlihat sangat miring mendekati arah horizontal sehingga harus melakukan pelebaran jembatan [3].

Kabel pada tipe *semi-harp* seperti pada Gambar 2 merupakan kombinasi tipe *harp* dan *fan* dimana kabel diletakkan secara menyebar pada bagian atas pylon. Pada sistem ini sudut yang dibentuk oleh kabel dan pylon lebih kecil dibandingkan pada tipe *harp* sehingga dapat mengurangi kekakuan dari penghubung horizontal antara pylon dan pelat lantai [3].

III. METODOLOGI

Urutan penyelesaian perencanaan ini dapat dilihat pada began alir pada Gambar 3.

Tabel 5. Rekapitulasi penulangan *pylon* bawah

Jenis Penulangan	Dimensi Tulangan
Tulangan Lentur	216 @4D32
Tulangan Geser	4D25 – 150
Tulangan Longitudinal Torsi	312 @D32
Tulangam Geser Torsi	4D25 – 200

Tabel 6.

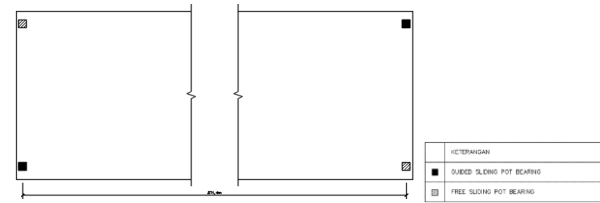
Rekapitulasi penulangan *pylon* atas

Jenis Penulangan	Dimensi Tulangan
Tulangan Lentur	744 @D32
Tulangan Geser Arah Y	10D25 – 50
Tulangan Geser Arah Z	4D25 – 250

Tabel 7.

Rekapitulasi penulangan *lower cross beam*

Jenis Penulangan	Dimensi Tulangan
Tulangan Lentur	744 @D32
Tulangan Geser Arah Y	2D25 – 250
Tulangan Geser Arah Z	2D25 – 250



Gambar 8. Perencanaan perletakan jembatan.

Adapun pada perencanaan ini akan dimodifikasi perencanaan struktur menggunakan material baja dengan data-data sebagai berikut:

1. Nama Jembatan : Kereta Api *Elevated* Simpang Joglo
2. Lokasi : Kadipiro, Banjarsari, Surakarta
3. Bentang : 271,4 m (65,7+140+65,7)
4. Lebar : 9 m
5. Jumlah pilar : 2 buah
6. Struktur pylon : 2 buah
7. Sistem Struktur : *Cable-stayed* dengan gelagar baja

IV. HASIL PERENCANAAN

A. Pembebanan Struktur Jembatan

Pembebanan jembatan kereta api didasarkan pada PM. No.60 Tahun 2012 [4].

1) *Beban Mati*

Beban mati meliputi atas berat sendiri jembatan dan beban mati tambahan berupa bantalan kayu dan rel R54.

- Berat sendiri : (dihitung program bantu)
- Beban bantalan kayu : 1,53 kN/m
- Beban rel R54 : 0,543 kN/m

2) *Beban Hidup*

Beban Hidup berdasarkan rencana muatan 1921 (RM21). Diambil kondisi 5 gandar dengan muatan gandar 17 ton.

3) *Beban Kejut*

Beban kejut diperoleh dengan perkalian faktor kejut (i) dengan beban kereta.

$$i = 0,2 \frac{25}{(50 + L)} = 0,06545 ; L = 5 m$$

Tabel 8.
Staging analysis box girder

Stage	Axial (kN)	Shear Y (kN)	Shear Z (kN)	Torsion (kN.m)	Moment Y (kN.m)	Moment Z (kN.m)
CS0	11101	2782.69	5071.37	341.52	92847.6	16159.88
CS1	10741	1630.47	4103.26	276.48	119550.89	8135.41
CS2	8743	1603.57	3897.9	266.63	138184.42	7990.1
CS3	9501	1673.06	4050.15	289.75	155522.99	8355.68
CS4	7208	1701.26	4285.58	310.12	125503.79	8416.63
CS5	6172	1678.92	4394.23	307.07	105280.8	8246.36
CS6	4513	1658.83	4326.63	362.46	119965.78	7797.77
CS7	5351	1773.72	4692.47	404.47	131789.4	8337.71
CS8	3743	1680.76	4453.14	357.93	94516.87	7882.36
CS9	2060	1805.22	4847.89	406.98	115380.96	8450.6
CS10	2762	1959.73	5350.34	452.24	125950.25	9172.63
CS11	1643	1741.56	4689.59	348.54	83677.49	8147.13
CS12	375	1849.19	5104.12	388.82	95883.52	8616.76
CS13	1007	2031.04	5704.1	419.44	102631.29	9461.42
CS14	230	1693.92	4636.29	274.45	61905.6	7885.02
CS15	445	1684.76	4735.59	274.89	61620.04	7828.62
CS16	176	1823.74	5369.7	280.24	62576.91	8671.19
CS17	446	1838.51	5703.24	210.17	62030.27	8677.91
CS18	616	1836.89	5726.62	23.01	62163.61	8670.19
CS19	16	1727.96	11088.67	49.12	53361.26	8620.47
CS20	0	0	0	0	0	0
MAX	11101	2782.69	11088.67	452.24	155522.99	16159.88

Tabel 9.
Staging analysis pylon bawah

Stage	Axial (kN)	Shear Y (kN)	Shear Z (kN)	Torsion (kN.m)	Moment Y (kN.m)	Moment Z (kN.m)
CS0	44537	3705.59	3638.58	15961.39	5592.43	23902.39
CS1	48753	0.02	3068.76	10986.04	5667.3	68061.44
CS2	46557	0.01	3024.01	10188.85	5542.41	62483.42
CS3	48404	0.01	3178.59	10922.59	5679.49	66891.34
CS4	45628	0.02	3383	9768.17	5587.99	60072.3
CS5	43712	0.01	3410.05	8624.72	5494.45	53196.58
CS6	42641	0	3774.51	448.42	5534.06	517.29
CS7	44007	0	4124.46	469.78	5695.21	513.28
CS8	41148	0	3884.21	379.91	5483.32	530.16
CS9	39101	0	4310.98	311.96	5485.38	182.56
CS10	40492	0	4792.19	324.45	5680.99	180.21
CS11	37555	0	4141.94	257.77	5359.18	192.74
CS12	35519	0	4536.71	160.39	5354.78	73.68
CS13	36927	0	5110.28	165.02	5573.78	72.8
CS14	33919	0	4080.24	125.39	5170.87	80.26
CS15	31830	0	4119.19	14.49	5088.51	24.32
CS16	33242	0	4711.67	14.99	5548.13	24.22
CS17	33227	0	4716	15.01	5538.23	24.27
CS18	20150	0	592.48	0	6399.45	0.03
CS19	20150	0	592.48	0	6399.45	0.03
CS20	20150	0	592.48	0	6399.45	0.03
MAX	48753	3705.59	5110.28	15961.39	6399.45	68061.44

$$Q_{kejut} = Q_{kereta} \times i = 55,6363 \text{ kN/m}$$

4) *Beban Lantai*

Beban lateral merupakan bentuk beban horizontal diambil besar 20% dari beban kereta sebesar 17 kN/m.

5) *Beban Pengereman & Traksi*

Beban rem dan traksi merupakan bentuk beban horizontal yang diambil besar 25% dari beban kereta sebesar 21,25 kN/m.

6) *Beban Rel Longitudinal*

Beban rel longitudinal merupakan salah satu bentuk beban horizontal digunakan sebesar 10 kN/m .

7) *Beban Angin*

Beban angin yang digunakan ada dua , yaitu: beban angin tanpa kereta sebesar 3 kN/m² dan beban angin dengan kereta sebesar 1,5 kN/m².

8) *Beban Gempa*

Beban gempa yang digunakan sesuai dengan peraturan gempa yang berlaku. Peraturan yang dipakai adalah SNI 2833:2016. Beban gempa direncanakan dengan respon spektrum kota Surakarta.

Tabel 10.
Staging analysis pylon atas

Stage	Axial (kN)	Shear Y (kN)	Shear Z (kN)	Torsion (kN.m)	Moment Y (kN.m)	Moment Z (kN.m)
CS0	35457.84	0.01	1043.14	0.04	5095.1	0.04
CS1	46239.4	0.02	1411.14	0.01	11120.77	0.05
CS2	42188.89	0.01	1477.42	0	9770.58	0.04
CS3	45060.91	0.01	1614.29	0.01	10745.11	0.05
CS4	38745.8	0.01	1360.74	0.01	8920.95	0.04
CS5	34909.2	0.01	1143.93	0	7114.47	0.04
CS6	31164.05	0.01	764.4	0	4477.57	0.02
CS7	32212.47	0.01	809.64	0	4750.57	0.02
CS8	27777.79	0.01	614.9	0	3400.25	0.03
CS9	21857.43	0.01	560.34	0	2031.21	0.01
CS10	22361.51	0.01	584.96	0	2102.91	0
CS11	19658.85	0.01	451.6	0	1652.2	0.01
CS12	13908.42	0	282.98	0	565.82	0
CS13	14040.97	0.01	291.6	0	578.11	0
CS14	12929.62	0	217.16	0	450.39	0.01
CS15	8697.9	0	17.96	0	0.02	0
CS16	8709.09	0	18.78	0	0.02	0
CS17	8709.31	0	18.79	0	0.02	0
CS18	6602.34	0	0.01	0	0	0
CS19	6602.34	0	0.01	0	0	0
CS20	6602.34	0	0.01	0	0	0
MAX	46239.4	0.02	1614.29	0.04	11120.77	0.05

Tabel 11.
Staging analysis lower cross beam

Stage	Axial (kN)	Shear Y (kN)	Shear Z (kN)	Torsion (kN.m)	Moment Y (kN.m)	Moment Z (kN.m)
CS0	949.64	0	713.72	0.01	1996.51	260.7
CS1	808.79	0	713.72	0	2067.68	46.07
CS2	812.83	0	713.72	0	2078.87	44.68
CS3	833.7	0	713.72	0	2052.81	48.19
CS4	891.98	0	713.72	0	2030.03	42.31
CS5	908.7	0	713.72	0	2030.5	36.9
CS6	989.81	0	713.72	0	1981.19	8.76
CS7	1053.21	0	713.72	0	1928.58	9.26
CS8	1020.82	0	713.72	0	1969.03	7.14
CS9	1119.89	0	713.72	0	1913.2	6.63
CS10	1209.85	0	713.72	0	1841.97	6.93
CS11	1094.06	0	713.72	0	1940.68	5.36
CS12	1186.77	0	713.72	0	1889.3	3.47
CS13	1295.24	0	713.72	0	1805	3.58
CS14	1106.3	0	713.72	0	1956.8	2.65
CS15	1129.86	0	713.72	0	1955.23	0.26
CS16	1288.71	0	713.72	0	1858.17	0.27
CS17	1287.66	0	713.72	0	1858.03	0.27
CS18	854.95	0	713.72	0	2514.61	0
CS19	854.95	0	713.72	0	2514.61	0
CS20	854.95	0	713.72	0	2514.61	0
MAX	1295.24	0	713.72	0.01	2514.61	260.7

B. *Preliminary Design*

Gelagar memanjang direncanakan menggunakan profil WF dengan perkiraan tinggi balok.

$$d > \frac{1}{12}L ; \quad L = 5 \text{ m} ; \quad d > 0,42 \text{ m}$$

Gelagar melintang direncanakan menggunakan profil *custom plate girder* dengan perkiraan tinggi balok.

$$d > \frac{1}{9}L ; \quad L = 9 \text{ m} ; \quad d > 1 \text{ m}$$

Gelagar utama menggunakan box girder disebelah kiri dan kanannya (*twin rectangular box girder*). Adapun rumus pendekatan yang dipakai untuk mendesain gelagar adalah melalui perbandingan tinggi gelagar dengan bentang jembatan untuk dimensi box baja [5].

$$\frac{1}{40}L \geq h \geq \frac{1}{100}L ; \quad L = 271,4 \text{ m} ; \quad 6,785 \text{ m} \geq h \geq 2,714 \text{ m}$$

Perencanaan dimensi kabel didekatkan dengan persamaan sesuai Peraturan PU No.08/SE/M/2015 [6].

$$Asc, i \cong \frac{(g + p + \frac{P}{30d})(\lambda_i + \lambda_{i+1}) \cos \phi_i}{2(f_{cbd} \cdot \sin \phi_i \cdot \cos \phi_i - \gamma_{cb} a_1)}$$

Tabel 14.
Sambungan struktur lantai kendaraan

Elemen	Sambungan	Pelat Sambung
Gelagar	Sambungan Baut M22 ASTM	Siku L
Memanjang – Gelagar	A490M HTB 4 buah	100.100.14
Melintang		
Gelagar	Sambungan Momen:	Pelat 20 mm
Melintang – Box Girder	Sambungan Las E70XX 6mm dan Sambungan Baut M30 ASTM A490M HTB 32 buah pada sayap dan 16 buah pada badan	
Ikatan Tumbuk	Sambungan Baut M16 ASTM A490M HTB	Pelat 20 mm
Ikatan Angin Antar Box Girder	Sambungan Las E70XX 3mm Sambungan Baut M36 ASTM A490M 98 buah pada badan dan 108 buah pada sayap	Pelat 4,5 mm Pelat 30 mm (sayap) Pelat 20 mm (badan)

Tabel 15.
Hasil estimasi risiko *value at risk*

Kabel	n	Tegangan Izin Pelat saat <i>Stressing</i>		
		fyp (MPa)	fyt (MPa)	Kontrol fyp > fyt
1	73	230.107	19.22455	OK
2	73	230.107	20.24676	OK
3	43	232.622	23.38087	OK
4	43	232.622	22.60594	OK
5	37	229.6481	20.41497	OK
6	22	239.8346	14.10662	OK
7	37	229.6481	6.37296	OK
8	55	236.6246	15.326	OK
9	61	227.6533	19.43474	OK
10	73	230.107	20.45871	OK
11	85	223.4461	19.34431	OK
12	85	223.4461	16.60632	OK

Tabel 16.
Kontrol tegangan izin beton.

Kabel	n	Tegangan Izin Pelat saat <i>Stressing</i>		
		fyp (MPa)	fyt (MPa)	Kontrol fyp > fyt
1	73	50,30	22,55	OK
2	73	50,30	23,46	OK
3	43	52,31	26,85	OK
4	43	52,31	25,23	OK
5	37	52,89	23,28	OK
6	22	52,68	16,21	OK
7	37	52,89	8,22	OK
8	55	52,9	18,18	OK
9	61	51,33	24,15	OK
10	73	50,3	23,08	OK
11	85	48,9	22,12	OK
12	85	48,9	18,52	OK

Hasil *preliminary design* kabel dan jumlah kanel dapat dilihat pada Tabel 1.

Perencanaan tinggi *pylon* berdasarkan Peraturan PU SE No.08/SE/M/2015 Pasal 4.7.1 bahwa perkiraan tinggi *pylon* sekitar 0,19 – 0,25 dari bentang terpanjang jembatan [6].

Ambil H/bentang = 0,25. Bentang terpanjang = 140 m. H = 0,25. 140 m = 35m

C. Perencanaan Lantai Kendaraan

Terdapat empat perencanaan lantai kendaraan yang digunakan.

1) Gelagar Memanjang

Dimensi gelagar memanjang menggunakan profil WF 800×300×14×22 dengan BJ 41.

Tabel 12.
Kebutuhan tulangan *bursting*

Kabel	n	P (kN)	T _{pencar} (kN)	A _{perlu} (mm ²)	As pasang (mm ²)	n
1	73	5453,25	143,51	574,03	283,53	3
2	73	5674,09	149,32	597,27	283,53	3
3	43	4021,57	129,73	518,91	283,53	2
4	43	3777,69	121,86	487,44	283,53	2
5	37	2835,41	100,37	401,47	283,53	2
6	22	1179,25	33,88	135,54	283,53	2
7	37	1001,79	35,46	141,85	283,53	2
8	55	3068,22	92,27	369,11	283,53	2
9	61	4505,49	132,51	530,06	283,53	2
10	73	5581,69	146,88	587,55	283,53	3
11	85	6086,18	154,08	616,32	283,53	3
12	85	5094,63	128,98	515,91	283,53	2

Tabel 13.
Kebutuhan tulangan *spalling*

Kabel	n	P (kN)	T _{spalling} (kN)	A _{perlu} (mm ²)	As pasang (mm ²)	n
1	73	5453,25	109,1	436,26	283,53	2
2	73	5674,09	113,48	453,93	283,53	2
3	43	4021,57	80,43	321,72	283,53	2
4	43	3777,69	75,55	302,22	283,53	2
5	37	2835,41	56,71	226,83	283,53	2
6	22	1179,25	23,59	94,34	283,53	2
7	37	1001,79	20,04	80,14	283,53	2
8	55	3068,22	61,37	245,46	283,53	2
9	61	4505,49	90,11	360,44	283,53	2
10	73	5581,69	111,63	446,54	283,53	2
11	85	6086,18	121,72	486,89	283,53	2
12	85	5094,63	101,89	407,57	283,53	2

Kontrol Kapasitas Lentur :

$$M_n = M_p = 176000 \text{ kg.m} ; \phi M_n \geq M_u$$

$$158400 \text{ kg.m} \geq 79191,532 \text{ kg.m (OK)}$$

Kontrol Geser :

$$V_n = 0,6.fy.Aw.Cv = 145320 \text{ kg} ; \phi V_n \geq V_u$$

$$130788 \text{ kg} \geq 40366,2 \text{ kg (OK)}$$

Kontrol Lentutan :

$$\Delta \geq \Delta_{ijin} ; 0,163 \text{ cm} < 0,7125 \text{ cm (OK)}$$

2) Gelagar Melintang

Dimensi gelagar melintang menggunakan profil *custom plate girder* 1500×500×20×30 dengan BJ 41.

Kontrol Kapasitas Lentur :

$$M_n = M_p = 718791,175 \text{ kg.m} ; \phi M_n \geq M_u$$

$$646912,058 \text{ kg.m} \geq 401060,29 \text{ kg.m (OK)}$$

Kontrol Geser :

$$V_n = 0,6.fy.Aw.Cv = 432000 \text{ kg} ; \phi V_n \geq V_u$$

$$388800 \text{ kg} \geq 160640,27 \text{ kg (OK)}$$

Perencanaan Stiffener :

$$R_u - \phi R_b \leq As.fy ; As \geq 30,2 \text{ cm}^2$$

Ambil stiffener dengan ukuran bs = 170 mm ts = 25 mm

$$bs > \frac{bf}{3} - \frac{tw}{2} ; 170 \text{ mm} \geq 156,67 \text{ mm (OK)}$$

$$ts > \frac{tf}{2} ; 25 \text{ mm} \geq 15 \text{ mm} \text{ (OK)}$$

Kontrol Lendutan :

$$\Delta \geq \Delta_{ijin} ; 0,163 \text{ cm} < 0,7125 \text{ cm} \text{ (OK)}$$

3) Ikatan Tumbuk

Dimensi ikatan tumbuk menggunakan profil baja siku L 120×120×20 dengan BJ 41.

Kontrol Batang Tarik :

$$P_n = fy \cdot Ag = 110500 \text{ kg} \text{ (leleh tarik penampang bruto)}$$

$$\phi P_n \geq T_{max} ; 99450 \text{ kg} \geq 46264,12 \text{ kg} \text{ (OK)}$$

$$P_n = fu \cdot Ae = 123229,6 \text{ kg} \text{ (runtuh penampang netto)}$$

$$\phi P_n \geq T_{max} ; 92422,2 \text{ kg} \geq 46264,12 \text{ kg} \text{ (OK)}$$

Kontrol Batang Tekan :

$$P_n = fcr \cdot Ag = 82333,62 \text{ kg} ; \phi P_n \geq T_{max}$$

$$74100,26 \text{ kg} \geq 45961,14 \text{ kg} \text{ (OK)}$$

4) Ikatan Angin

Dimensi ikatan angin menggunakan profil baja PSR bundar 139,8 mm tebal 4,5 mm dengan BJ 41.

Kontrol Batang Tarik :

$$P_n = fy \cdot Ag = 56800 \text{ kg} \text{ (leleh tarik penampang bruto)}$$

$$\phi P_n \geq T_{max} ; 51120 \text{ kg} \geq 8830,63 \text{ kg} \text{ (OK)}$$

$$P_n = fu \cdot Ae = 63343,36 \text{ kg} \text{ (runtuh penampang netto)}$$

$$\phi P_n \geq T_{max} ; 47507,52 \text{ kg} \geq 8830,63 \text{ kg} \text{ (OK)}$$

Kontrol Batang Tekan :

$$P_n = fcr \cdot Ag = 11180,83 \text{ kg} ; \phi P_n \geq T_{max}$$

$$10062,75 \text{ kg} \geq 8972,23 \text{ kg} \text{ (OK)}$$

D. Permodelan Analisis Struktur Model Jembatan

Model bangunan jembatan dimodelkan dengan menggunakan program bantu analisa struktur MidasCivil 2019. Bentuk pemodelan model bangunan jembatan pada program bantu dapat dilihat pada Gambar 4.

Untuk faktor modifikasi respons (R) gempa pada perencanaan ini berorientasi pada SNI 2833-2016, jembatan pada arah X nilai faktor modifikasi respon (R) sebesar 1.5, untuk arah Y nilai faktor modifikasi respon (R) sebesar 3 seperti pada Gambar 5 [7].

E. Box Girder

Dimensi ikatan angin menggunakan *rectangular box girder* 4000×1000×100×100 ditambah dengan stiffener 100×500 dengan BJ 41.

Analisis Kuat Aksial :

$$P_n = fy \cdot An = 56800 \text{ kg} \text{ (kuat tarik)}$$

$$\phi P_n \geq P_u ; 36450000 \text{ kg} \geq 2261088,98 \text{ kg} \text{ (OK)}$$

$$P_n = fcr \cdot Ag = 53838124,64 \text{ kg}$$

$$\phi P_n \geq P_u ; 48454312,18 \text{ kg} \geq 3531323,24 \text{ kg} \text{ (OK)}$$

Analisis Kuat Geser :

$$V_n = 0,6 \cdot fy \cdot Aw \cdot Cv = 5400000 \text{ kg} \text{ (kuat tarik)}$$

$$\phi V_n \geq V_{uy} ; 4860000 \text{ kg} \geq 1718812,62 \text{ kg} \text{ (OK)}$$

$$V_n = 0,6 \cdot fy \cdot Aw \cdot Cv = 11400000 \text{ kg}$$

$$\phi V_n \geq V_{uz} ; 10260000 \text{ kg} \geq 1456352,81 \text{ kg} \text{ (OK)}$$

Analisis Kuat Lentur :

$$M_n = M_p = 36800000 \text{ kg.m} \text{ (arah Z)}$$

$$\phi M_n \geq M_{uz} ; 33120000 \text{ kg.m} \geq 16766308,23 \text{ kg.m} \text{ (OK)}$$

$$M_n = M_p = 63050000 \text{ kg.m}$$

$$\phi M_n \geq M_{uy} ; 56745000 \text{ kg.m} \geq 25784081,42 \text{ kg.m} \text{ (OK)}$$

Kombinasi Lentur Aksial :

$$\frac{Pr}{2 \cdot Pc} + \left(\frac{Mrx}{Mcx} + \frac{Mry}{Mcy} \right) \leq 1 ; 0,991 \leq 1$$

Analisis Kuat Torsi :

$$T_c = 0,9 \cdot fcr \cdot C = 22172057,5 \text{ kg}$$

$$\phi T_c \geq T_u ; 19954851,75 \text{ kg.m} \geq 1574723 \text{ kg.m} \text{ (OK)}$$

Kontrol Stiffener :

$$I \leq d_o t^3 J ; J = 2,5 \left(\frac{D}{d_o} \right)^2 - 2 \geq 0,5 \text{ (memenuhi)}$$

F. Struktur Kabel

Spesifikasi kabel yang digunakan ASTM A416M-74 Grade 270 diameter 15,2 mm untu satu *strand*.

Penomoran diberikan kepada salah satu susunan kabel dan kabel lainnya dinomori sesuai pasangan identiknya di tampilakn pada Gambar 6.

Setiap kabel diberi gaya tarik (*stressing*) dengan nilai berbeda terlebih dahulu sebelum dibebani. Hal ini bertujuan untuk mengatur posisi gelagar agar sesuai dengan posisi akhir sebelum menerima beban hidup seperti pada Tabel 2.

Kabel kemudian dicek kembali terhadap gaya dalam kombinasi beban layan yang maksimum seperti pada Tabel 3.

Sebagai perumpamaan kabel putus yaitu Kabel 11. Kabel 11 dipilih karena nilai gaya kabel 11 lebih besar dari lainnya, kemudian dilakukan iterasi ulang MidasCivil pada Tabel 4.

G. Struktur Pylon

Pylon direncanakan dengan beton sesuai dengan SNI 2847:2019 [8].

1) Pultbelon Bawah

Dimensi *pylon* bawah 4m × 4m dengan profil beton masif mutu beton (*f'c*) 30 MPa dan mutu tulangan (*fy*) 400 MPa.

Penulangan Lentur :

Menggunakan program bantu spColumn arah Y dan Z serta perbesaran momen.

Penulangan Geser :

$$\phi(V_c + V_s) \geq V_u$$

$$44560 \text{ kN} \geq 43890 \text{ kN} \text{ (OK) Arah Y}$$

$$26138 \text{ kN} \geq 17183 \text{ kN} \text{ (OK) Arah Z}$$

Penulangan Torsi :

$$\phi T_n \geq T_u ; 139230,39 \text{ kN.m} \geq 118346 \text{ kN} \text{ (OK)}$$

Rekapitulasi penulangan *pylon* bawah dapat dilihat pada Tabel 5.

2) Pylon Atas

Dimensi *pylon* atas 4m×14m dengan profil beton *box* tebal 1m dengan mutu beton (f_c) 30 MPa dan mutu tulangan (f_y) 400 MPa.

Penulangan Lentur :

Menggunakan program bantu spColumn arah Y dan Z serta perbesaran momen.

Penulangan Geser :

$$\phi(V_c + V_s) \geq V_u$$

$$85081 \text{ kN} \geq 2303 \text{ kN} \text{ (OK) Arah Y}$$

$$83135 \geq 9348 \text{ kN} \text{ (OK) Arah Z}$$

Pengecekan Tulang Geser Terhadap Tension Kabel :

$$\phi A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \geq M_u ; 19627 \text{ kN.m} \geq 15295 \text{ kN} \text{ (OK)}$$

Rekapitulasi penulangan *pylon* bawah dapat dilihat pada Tabel 6.

3) Lower Cross Beam

Dimensi *lower cross beam* 1,5m × 2,5m dengan profil beton *box* tebal 1m dengan mutu beton (f_c) 30 MPa dan mutu tulangan (f_y) 400 MPa.

Penulangan Lentur :

Menggunakan program bantu spColumn arah Y dan Z serta perbesaran momen.

Penulangan Geser :

$$\phi(V_c + V_s) \geq V_u$$

$$4654 \text{ kN} \geq 3427 \text{ kN} \text{ (OK) Arah Y}$$

$$4561 \text{ kN} \geq 1021 \text{ kN} \text{ (OK) Arah Z}$$

Rekapitulasi penulangan *pylon* bawah dapat dilihat pada Tabel 7.

H. Perilaku Aerodinamis

Kegagalan struktur jembatan bentang panjang adalah efek angin. Kontrol terhadap stabilitas aerodinamis pada jembatan *cable-stayed* perlu dilakukan. Analisa stabilitas pada desain ini meliputi *vortex-shedding* (efek pusaran angin) dan *flutter* (efek ayunan) [3].

1) Angka Mathivat

Angka Mathivat merupakan angka yang dihitung berdasarkan perbandingan frekuensi lentur (f_B) dan frekuensi torsi (f_T).

$$f_B = 0,7979 ; f_T = 2,2029 ; \frac{f_B}{f_T} = \frac{2,2029}{0,7979} = 2,76 > 2,5 \text{ (OK)}$$

2) Efek Pusaran Angin (*Vortex-Shedding*)

Amplitudo Getaran :

$$\hat{v} = \frac{\pi F_o}{\delta m} v_{max} = \frac{\pi}{0,05} \times \frac{2648,975 \text{ N}}{20161520,5 \text{ N}} \times 0,019 \text{ m} = 1,53 \text{ mm}$$

Percepatan Gaetaran :

$$\ddot{v} = 4\pi^2 f_b^2 \hat{v} = 4\pi^2 \times 0,7979^2 \times 0,0015 \text{ m} = 0,0514 \text{ m/s}$$

Nilai amplitudo dan percepatan digrafik efek psikologis dapat disimpulkan bahwa desain jembatan ini berada pada area (A), yang berarti desain dapat diterima (*acceptable*) [3].

3) Efek Analysis

Hasil akhir perhitungan *flutter* adalah didapatkannya nilai kecepatan kritis aktual struktur ($V_{kritis, aktual}$). Apabila nilai kritis aktual struktur lebih besar dari nilai kecepatan angin rencana, maka struktur dinyatakan aman.

$$V_{kritis \text{ aktual}} = 72,22 \frac{\text{m}}{\text{s}} > V_{rencana} = 15,95 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ (OK)}$$

I. Stagning Analysis

Metode pelaksanaan (*Staging Analysis*) konstruksi jembatan *cable stayed* dimulai dengan pekerjaan *pylon* dari beton bertulang dengan, pemasangan gelagar pada sisi *pylon* menggunakan perancah, pemasangan kabel, kemudian pemasangan *form traveler* pada gelagar yang telah terpasang untuk memasang gelagar berikutnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.

Sedangkan untuk metode analisisnya dilakukan dengan metode *demolishing procedure* melalui *backward solution*. Dimulai dari keadaan final jembatan, kemudian dilanjutkan dengan melepas bagian per bagian hingga sampai keadaan awal dimana menggunakan program bantu MidasCivil.

Dalam setiap tahapan *staging* gaya pada *box girder*, *pylon* bawah, *pylon* atas, *lower cross beam* akan mengalami perubahan sampai tahap akhir pelaksanaan *staging*. Hasil rekapitulasi gaya di setiap tahapan *staging* dapat dilihat pada Tabel 8, Tabel 9, Tabel 10, dan Tabel 11.

Berdasarkan analisis gaya dalam, elemen struktur tersebut aman dalam proses pelaksanaan karena nilai maksimum lebih kecil dari gaya dalam desain.

J. Perencanaan Angkur & Sambungan

Perencanaan angkur dan sambungan yang digunakan ada tiga sebagai berikut:

1) Sambungan Struktur Lantai Kendaraan

Pada perencanaan sambungan struktur lantai kendaraan, direncanakan menggunakan baut dan las. Mutu pelat penyambung yang digunakan BJ-41 dengan mutu Baut A490 HTB dan mutu las E70XX berdasarkan SNI 1729:2020 [9] Hasil perhitungan sambungan struktur sekunder dapat dilihat pada Tabel 12.

2) Sambungan Angkur Mati (Pada Box Girder)

Angkur kabel pada *box girder* dipasang sesuai dengan jumlah strand kabel yang telah dihitung. Selanjutnya akan dilakukan kontrol tegangan pelat baja pada saat *stressing* (pemberian gaya tarik).

$$f_{yp} = 0,8 \cdot f_y \cdot \sqrt{\frac{A_{p'}}{A_p} - 0,2} ; f_{yt} = \frac{P}{A_p} ; f_{yp} > f_{yt}$$

Untuk perhitungan kontrol pada angkur mati dapat dilihat pada Tabel 13.

Kontrol penampang pelat pada angkur dengan:

Kuat lentur pelat sayap :

$$\phi R_b = \phi \cdot 6,25 \cdot t_f^2 \cdot f_y = 13281,25 \text{ kN}$$

Kuat Lelah Pelat Badan :

$$\phi R_b = \phi(5k + N) \cdot t_w \cdot f_y = 12750 \text{ kN}$$

Kuat Tekuk Dukung Pelat Badan :

$$\phi R_b = 0,39 t_w^2 \left[1 + \left\{ 4 \left(\frac{N}{d} \right) - 0,2 \right\} \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{E \cdot f_y \cdot t_f}{t_w}} = 24819,448 \text{ kN}$$

Kuat Tekuk Lentur Dukung Pelat Badan :

$$\phi R_b = \frac{12,08 t_w^3}{h} \sqrt{E \cdot f_y} = 21354 \text{ kN}$$

Dari semua perhitungan diatas dipakai nilai ϕR_b yang terkecil sebesar 12750 kN.

Kontrol :

$$\phi R_b = 12750 \text{ kN} > P = 6086,18 \text{ kN} \text{ (OK)}$$

3) Sambungan Angkur Hidup (Pada Pylon)

Angkur kabel dipasang sesuai jumlah strand dan gaya stressing nya yang telah dihitung. Pada daerah pengankuran perlu disediakan tulangan untuk menahan pecaran (*bursting*) dan pengelupasan (*spalling*) agar lokasi pengankuran tidak hancur atau angkur tertarik kedalam beton saat kabel dilakukan *stressing*. Kontrol tegangan beton saat *stressing* dapat dilihat pada Tabel 14.

Perhitungan pada daerah pengankuran dengan menggunakan tulangan D19.

Bursting :

$$T_{pencar} = 0,25 \cdot T \cdot \left(1 - \frac{C_2}{h} \right) ; A_{Spertu} = \frac{T_{pencar}}{f_y}$$

$$d_{pencar} = 0,5(h - 2e) ; n = \frac{A_{Spertu}}{A_{Spakai}} ; spasi = \frac{d_{pencar}}{n}$$

Kebutuhan tulangan *bursting* dapat dilihat pada Tabel 15.

Spalling :

$$A_{Spertu} = \frac{2\% T}{f_y} ; n = \frac{A_{Spertu}}{A_{Spakai}}$$

Kebutuhan tulangan *spalling* dapat dilihat pada Tabel 16.

K. Perencanaan Perletakan

Dalam perencanaan perletakan jembatan ini terdapat dua macam perletakan pot bearing, yaitu tipe *free bearing* (*multidirectional*) dan *guided bearing* (*unidirectional*) seperti pada Gambar 8. Pot bearing tipe *free bearing* merupakan jenis perletakan yang memungkinkan gerakan dua arah horizontal, baik lateral maupun transversal. Pot bearing tipe *guided bearing* merupakan jenis perletakan yang memungkinkan gerakan satu horizontal saja, arah lain dikekang.

Guided Sliding Bearing :

V = 7694 kN ; H = 6847 kN ; *Longitudinal Movement* = 26 mm ; *Transversal Movement* = 2 mm

Free Sliding Bearing :

V = 7694 kN ; *Longitudinal Movement* = 26 mm ; *Transversal Movement* = 2 mm

Pengambilan pot bearing berdasarkan brosur Freyssinet Mechanical Bearings. Pada perencanaan jembatan ini digunakan tipe *free bearing* GL 8000 dan tipe *guided bearing* GG 24000 – 7200.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari analisis dan perhitungan yang dilakukan disimpulkan sebagai berikut: (1) Hasil perhitungan pada struktur lantai kendaraan telah memenuhi syarat terhadap kontrol kuat penampang, kontrol geser dan lendutan yang mengacu kepada SNI 1729:2020. (2) Hasil analisis struktur primer yang dilakukan telah memenuhi syarat terhadap kontrol kuat penampang, kontrol geser, kontrol aksial, kontrol interaksi aksial dan lentur dan lendutan yang mengacu kepada SNI 1729:2020 dan SNI 7860:2020 untuk struktur baja dan SNI 2847:2019 untuk struktur beton. (3) Angkur telah memenuhi syarat terhadap kontrol tegangan izin baja dan beton, kontrol penampang pelat pada angkur. (4) Sambungan baut dan las telah memenuhi syarat terhadap kontrol kuat geser baut, kontrol kuat tumpu baut, kontrol kuat kritis slip baut dan kontrol kekuatan luasan las. (5) Jembatan *cable-stayed* yang telah direncanakan telah aman dari kontrol stabilitas aerodinamis dengan angka keamanan Mathivat 2,76 dimana nilai ini mendekati persyaratan 2,5. (6) Kabel pada jembatan *cable-stayed* masih mampu menopang berat struktur jika salah satu kabel putus (tidak langsung runtuh). (7) Metode pelaksanaan (*staging analysis*) yang direncanakan telah memenuhi kontrol – kontrol yang telah disyaratkan.

Saran yang dapat diberikan dari hasil penelitian ini Diharapkan dilakukan perencanaan jembatan *cable-stayed* lebih teliti dalam dengan mempertimbangkan aspek teknis, ekonomis, dan estetika. Sehingga perencanaan dapat dimodelkan sesuai dengan kondisi lapangan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, *Buku Saku Petunjuk Kontruksi Jembatan*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2022.
- [2] B. Herbudiman and E. Widyarningsih, "Analisis tahapan konstruksi jembatan *cable stayed* dengan metode kesetimbangan kantilever," *Reka Rencana: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 6, no. 2, pp. 75–85, 2020.
- [3] R. Walther, *Cable Stayed Bridges*. London: Thomas Telford, 1999.
- [4] Kementerian Perhubungan, *Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM.60 Tahun 2012 Tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api*. Jakarta: Kementerian Perhubungan, 2012.
- [5] W. Podolny and J. B. Scalzi, *Construction and Design of Cable-Stayed Bridges*. Virginia: John Wiley & Sons, 1986.
- [6] 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.
- [7] Badan Standarisasi Nasional, *SNI 2833: Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2016.
- [8] Badan Standarisasi Nasional, *SNI 2833: Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2019.
- [9] Badan Standarisasi Nasional, *SNI 1729: Spesifikasi Untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2020.