

MODE-SHAPE JEMBATAN CABLE STAYED SUNGAI DAREH

Ariono Dhanisworo Indra Budhi

Direktorat Jenderal Bina Marga
Kementerian PUPR
Gedung Sapta Taruna Lantai 6
Jln. Pattimura No. 20
Jakarta Selatan 12110
ariono.dhanis@gmail.com

Herdianto Arifin

Direktorat Jenderal Bina Marga
Kementerian PUPR
Gedung Sapta Taruna Lantai 6
Jln. Pattimura No. 20
Jakarta Selatan 12110

Iwan Zarkasi

Direktorat Jenderal Bina Marga
Kementerian PUPR
Gedung Sapta Taruna Lantai 6
Jln. Pattimura No. 20
Jakarta Selatan 12110

Abstract

The Dareh River Bridge is a harp type cable stayed bridge with one symmetrical pylon. From the loading test it is known that the deflection in the middle of the span of the bridge is 55 mm, in the quarter span is 30 mm, and in three quarters the span is 32 mm. While the reverse deflection in the middle span is 27 mm, in a quarter span 20 mm, and in three quarters 23 mm span. These values are not significantly different from the value of the output given by the RM Bridge software, which is 56 mm in the middle span. After the model is matched, the Eigenvalue of RM Bridge is found, for the shape mode or half-span bending pattern, quarter-bending span, and torque. Then, these values are compared with the shape mode of the test results in the field, which for half the bending span produces a frequency of 1.18 Hz, a quarter of the bending span produces a frequency of 1.88 Hz, and a torque of 3.77 Hz, and the results are quite close. During the loading test, there was an explosion in the cable anchor area when the test load showed 240 tons, so the test was stopped at this point. This value is checked through the cable stress from the analysis of RM Bridge, and apparently there is no excessive stress, because the cable stress is only 262 MPa. Similarly, when loaded with the potential regional earthquake loads, the stress only increases to up to 313 MPa, which is still smaller than 0.45 fpu.

Keywords: bridge, cable stayed, bridge deflection, reverse deflection, shape mode

Abstrak

Jembatan Sungai Dareh adalah jembatan *cable stayed* tipe *harp* dengan satu pylon simetris. Dari hasil pengujian pembebanan diketahui bahwa lendutan di tengah bentang jembatan adalah 55 mm, di seperempat bentang adalah 30 mm, dan di tiga perempat bentang adalah 32 mm. Sedangkan lawan lendut di tengah bentang adalah 27 mm, di seperempat bentang 20 mm, dan di tiga perempat bentang 23 mm. Nilai-nilai ini tidak berbeda secara signifikan dibandingkan dengan nilai hasil keluaran perangkat lunak RM Bridge, yaitu 56 mm di tengah bentang. Setelah model dicocokkan, dicari Nilai Eigen dari RM Bridge, untuk *mode shape* atau pola setengah bentang *bending*, seperempat bentang *bending*, dan torsi. Kemudian nilai-nilai ini dibandingkan dengan *mode shape* hasil pengujian di lapangan, yang mana untuk setengah bentang *bending* menghasilkan frekuensi 1,18 Hz, seperempat bentang *bending* menghasilkan frekuensi 1,88 Hz, dan torsi 3,77 Hz, dan hasilnya cukup mendekati. Pada pengujian terjadi suara ledakan di area angkur kabel saat beban pengujian menunjukkan 240 ton, sehingga pengujian dihentikan pada angka 240 ton tersebut. Nilai ini diperiksa melalui tegangan kabel hasil analisis RM Bridge, dan ternyata tidak terjadi tegangan yang berlebihan, karena tegangan kabel hanya 262 MPa. Demikian pula bila dibebani dengan gempa yang ada di wilayah tersebut, tegangan hanya meningkat menjadi 313 MPa, yang masih lebih kecil daripada 0,45 fpu.

Kata-kata kunci: jembatan, *cable stayed*, lendutan jembatan, lawan lendut, *mode shape*

PENDAHULUAN

Perangkat lunak RM Bridge adalah suatu perangkat lunak buatan Bentley, yang dibuat spesifik untuk segala jenis jembatan (Bentley, 2011). Pada makalah ini dibahas tentang

pengujian pembebanan pada jembatan Sungai Dareh, kemudian hasilnya dibandingkan dengan keluaran perangkat lunak RM Bridge. Untuk mendukung hasil pengujian pembebanan dengan batasan-batasan tegangan teoritis, perlu dilakukan pemodelan jembatan dengan metode elemen hingga agar dapat diketahui bahwa perilaku jembatan hasil model teoritis tidak berbeda dengan perilaku fisik jembatan di lapangan. Hal ini berguna untuk pemeliharaan jembatan di masa depan.



Gambar 1 Jembatan Sungai Dareh dari Atas



Keterangan: Jumlah kabel tiap sisi adalah 6 dan total 24 kabel.

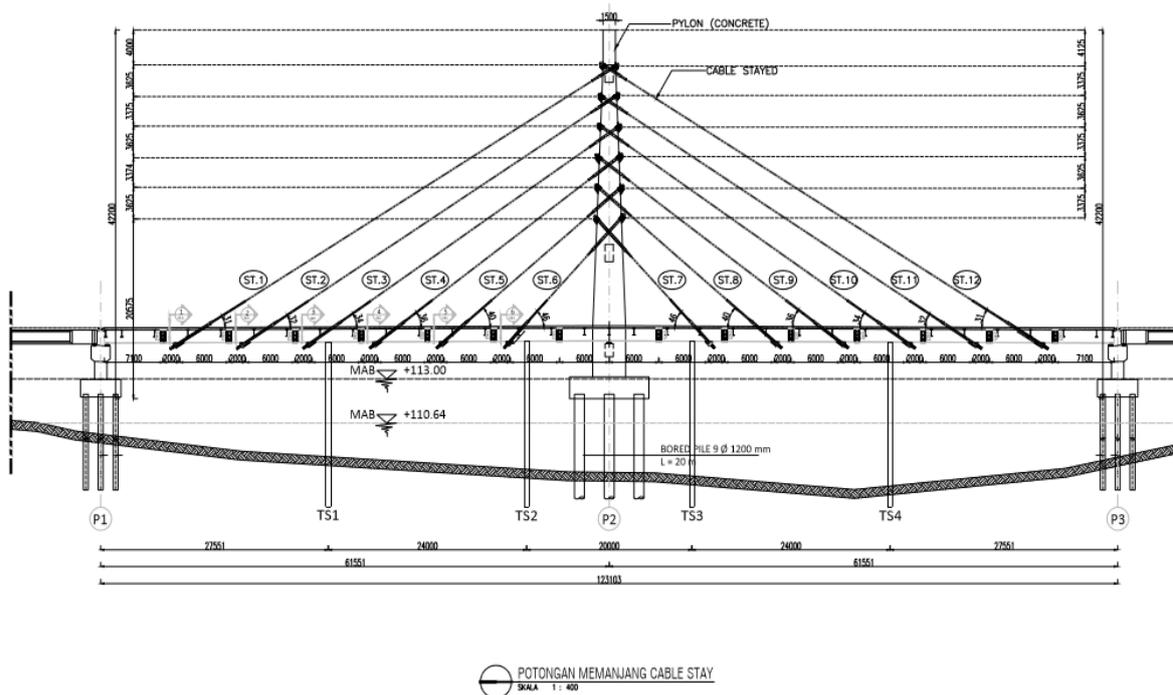
Gambar 2 Jembatan Sungai Dareh Tampak dari Dek

Jembatan Sungai Dareh adalah jembatan *cable stayed* yang terletak sekitar 5 jam perjalanan darat dari kota Padang, Sumatera Barat. Bentang utama adalah 61,6 meter dan 61,6. Susunan kabel adalah *harp* dengan *pilon* berbentuk huruf A, seperti terlihat pada Gambar 1 hingga Gambar 4. Jembatan ini adalah duplikasi dari jembatan yang sudah ada.



Keterangan: Dek terbuat dari *box girder* pada *main girder* kanan-kirinya, dengan *cross girder* profil I, tampak angkur *cable stayed* berwarna merah.

Gambar 3 Jembatan Sungai Dareh Tampak Bawah Dek



Gambar 4 Potongan Memanjang Jembatan Sungai Dareh

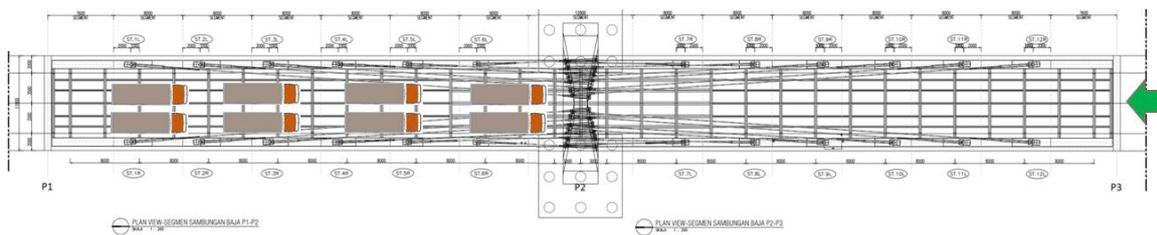
Pengujian Pembebanan

Pada jembatan ini dilakukan pengujian pembebanan berupa *static loading test* dan *dynamic loading test*. *Static loading test* adalah berupa 70% Uniform Distributed Load (UDL) berdasarkan SNI 1725:2016. Perhitungannya adalah sebagai berikut:

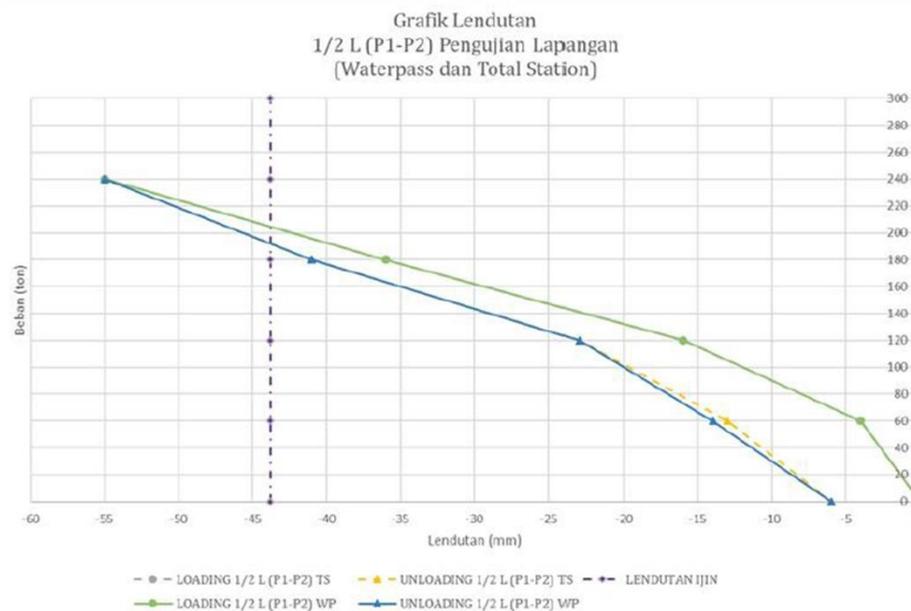
$$q = 9 \left(0,5 + \frac{15}{L} \right) = 9 \left(0,5 + \frac{15}{61,6} \right) = 6,7 \text{ kPa} = 0,67 \text{ ton/m}^2 \quad (1)$$

Luas lantai kendaraan : 61,6 meter x 7 meter = 431 m²
 Beban merata rencana total : 0,67 ton/m² x 431 m² = 289 ton
 70% dari beban merata rencana total : 0,7 x 289 = 202 ton

Pada pengujian ini tidak digunakan 202 ton, tetapi 240 atau 83% beban rencana total, dengan truk yang dibutuhkan berjumlah 8 truk di satu sisi, dengan asumsi beban 1 truk adalah 30 ton (lihat Gambar 5). Jika 2 sisi, jumlah truk adalah 16 buah. Pada pembebanan 240 ton terjadi suara keras di kabel jembatan dan terjadi getaran jembatan, sehingga pengujian tidak dilanjutkan. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 6.

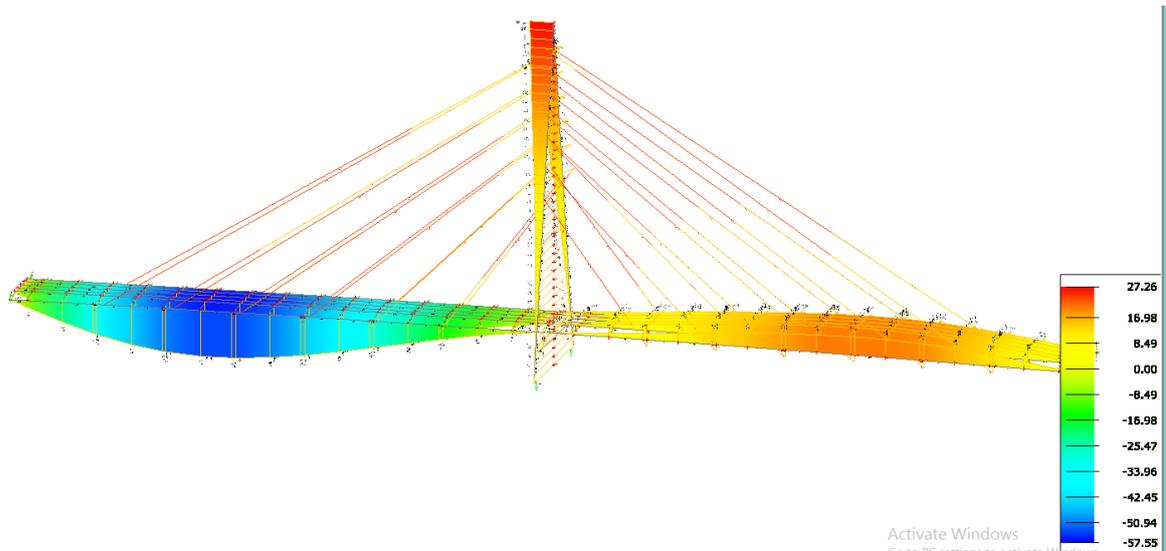


Gambar 5 Konfigurasi Truk *Loading* 1 Sisi

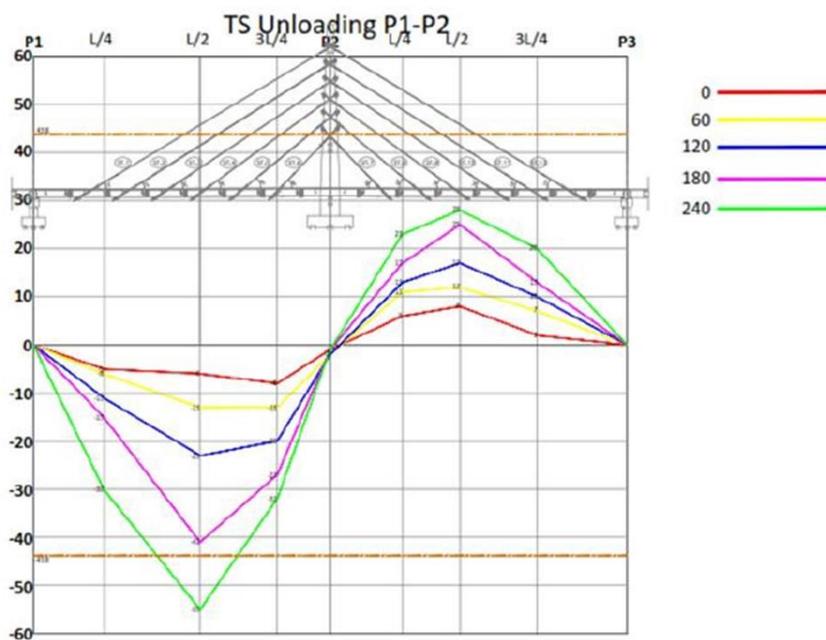


Gambar 6 Hubungan Lendutan dan Beban

Lendutan hasil pembebanan di lapangan dibandingkan dengan nilai lendutan truk hasil perangkat lunak RM Bridge, yang dapat dilihat pada Gambar 7. Tampak bahwa lendutan hasil elemen hingga RM Bridge adalah 57,55 mm, yang mendekati hasil yang terjadi di lapangan (55 mm). Lendutan izin adalah 61,5 mm, yang dihitung dengan cara $(L/800) * (240/300) = (61,6/800) * 0,8 = 77 * 0,8 = 61,6 \text{ mm}$.



Gambar 7 Lendutan Hasil Perangkat Lunak RM Bridge

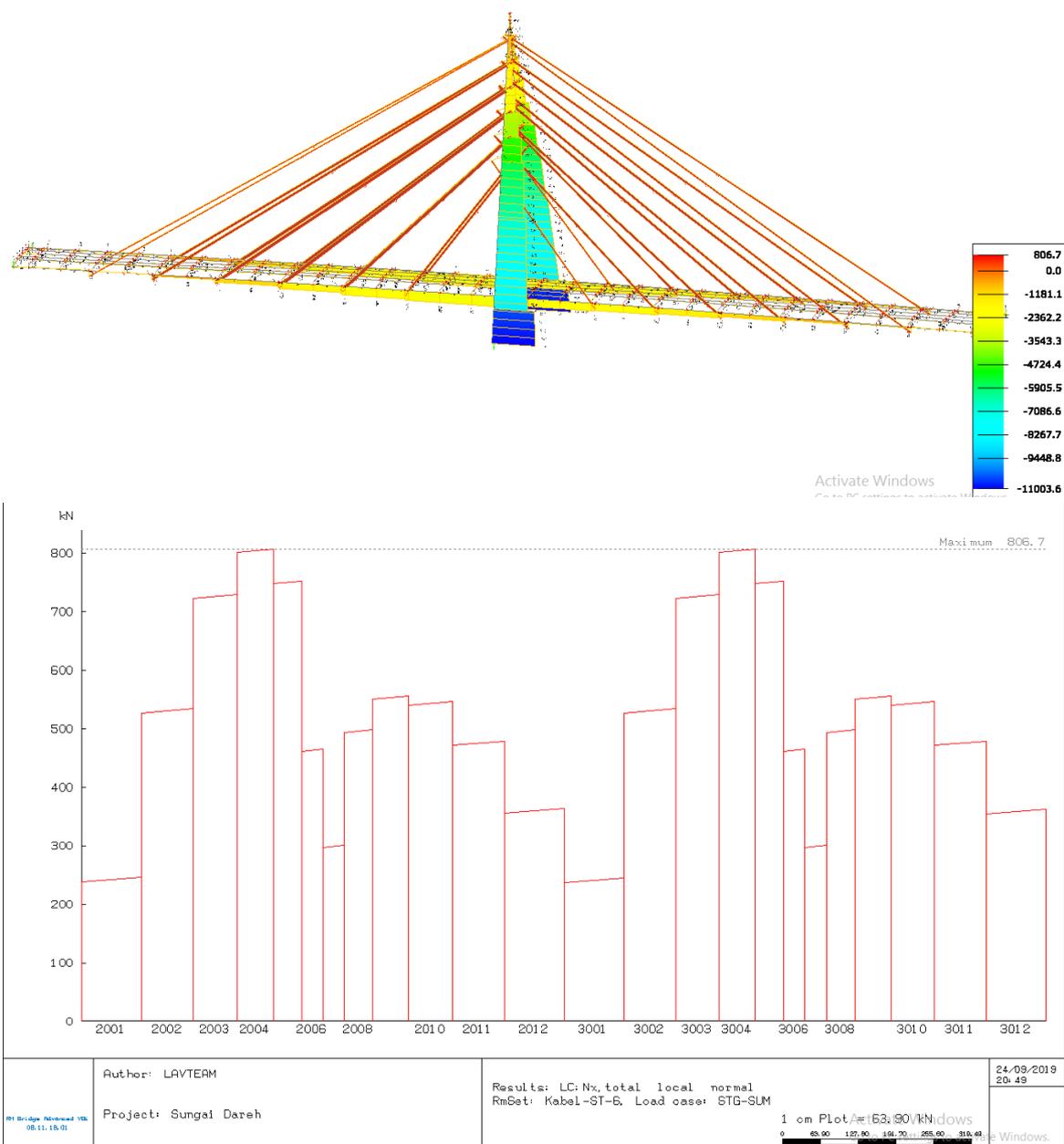


Gambar 8 Lendutan Balik Total Station

Lendutan balik hasil RM Bridge juga konsisten dengan hasil pengukuran. Lendutan balik hasil pengukuran adalah 28 mm, sedangkan lendutan bailk hasil RP Bridge adalah 27,26 mm (lihat Gambar 8).

Evaluasi Tegangan Kabel

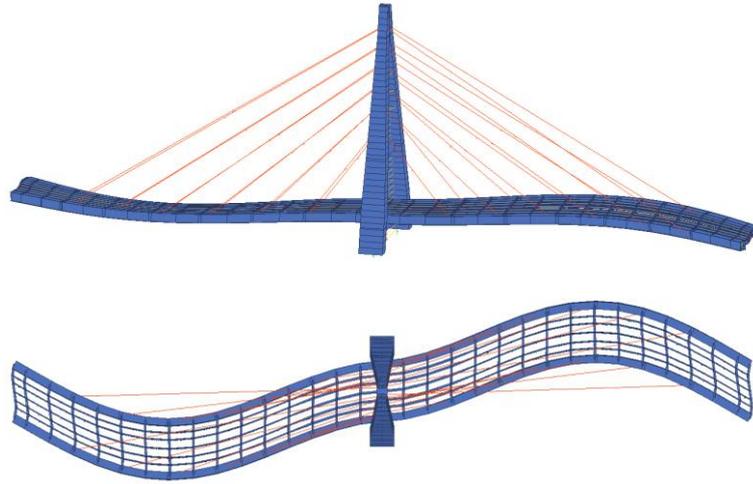
Saat pengujian terjadi suara keras di kabel pada beban 240 ton. Karena itu perlu dievaluasi tegangan kabel yang terjadi, apakah melebihi batas ambang 0,45 fpu.



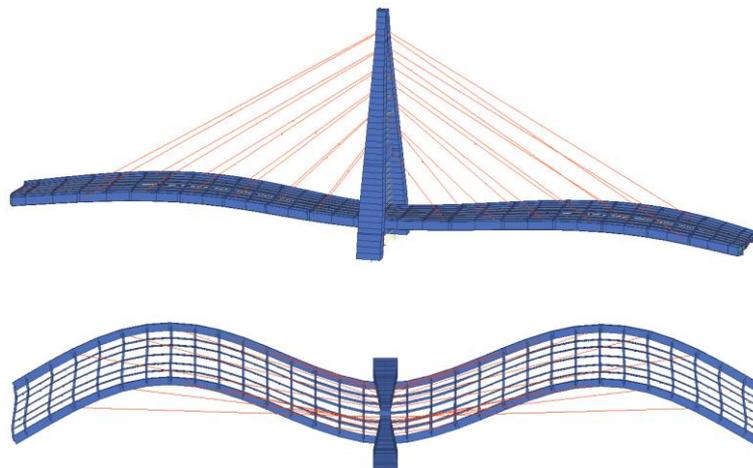
Gambar 9 Gaya Normal yang Terjadi pada Elemen Keluaran RM Bridge

Gaya normal yang terjadi pada kabel adalah 806 kN, sedangkan luas kabel adalah 3080 mm², sehingga tegangan kabel adalah 262 MPa. Tegangan izin adalah 0,45*1860 MPa atau sebesar 837 MPa. Dengan demikian, sebenarnya secara teoritis kabel masih aman. Suara keras yang terjadi kemungkinan berasal dari ankur, yang meleset dari dudukannya.

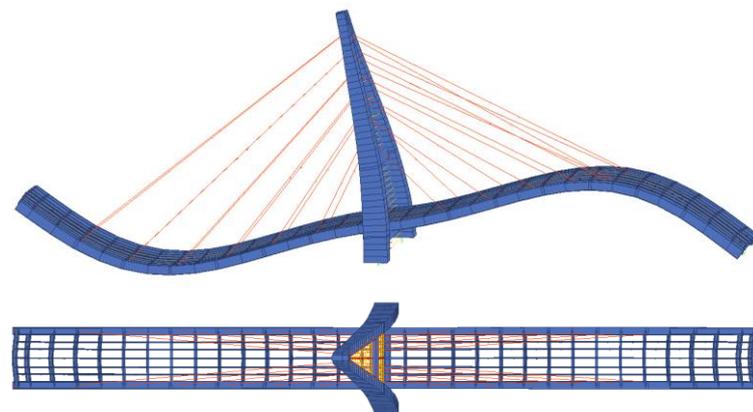
Dari hasil *running* RM Bridge, diperoleh *mode shape* yang dapat dilihat pada Gambar 10 sampai dengan Gambar 21. Untuk mengetahui apakah *mode shape* ini bersesuaian dengan *mode shape* hasil pengujian pembebanan, disajikan grafik FFT dari hasil pengujian pembebanan dinamik, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 22 sampai dengan Gambar 24.



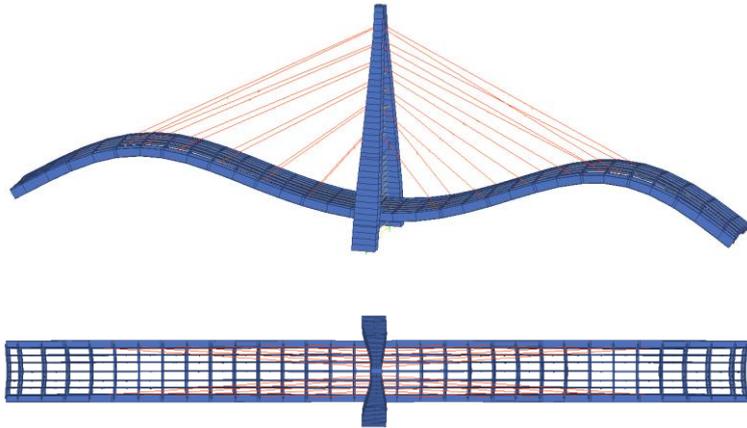
Gambar 10 Mode Shape 1 Bending S, dengan Frekuensi: 0,928 Hertz,
Top View Tampak Jembatan Bergerak ke Samping



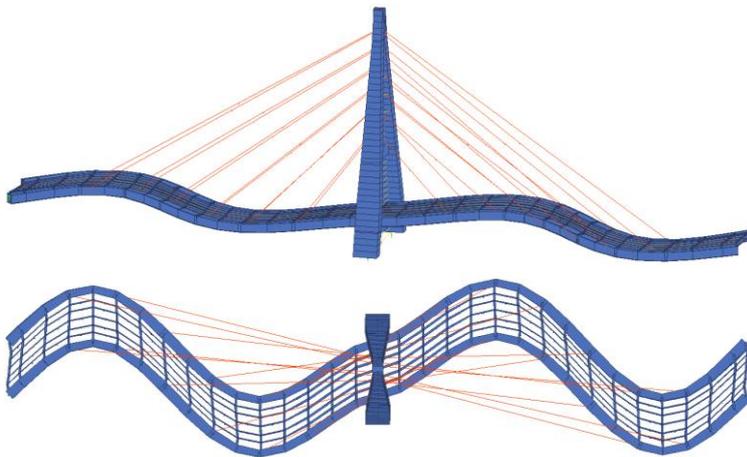
Gambar 11 Mode Shape 2 Bending V, dengan Frekuensi: 0,939 Hertz,
Top View Tampak Jembatan Bergerak ke Samping



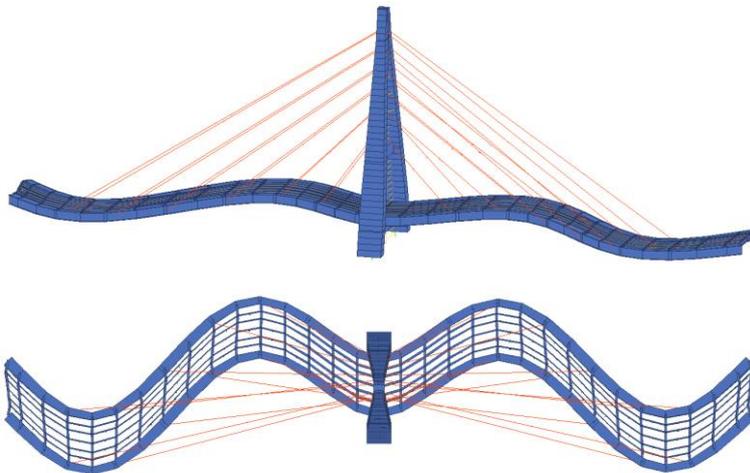
Gambar 12 Mode Shape 3 Bending S Murni, dengan Frekuensi: 1,237 Hertz,
Top View Tampak Jembatan tidak Bergerak ke Samping



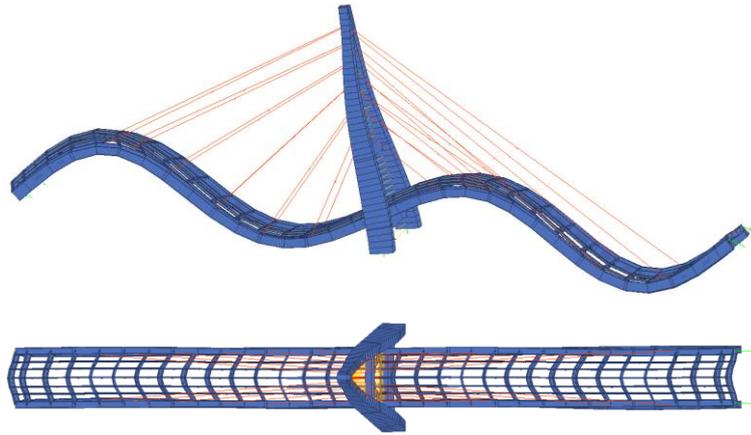
Gambar 13 Mode Shape 4 Bending Murni, dengan Frekuensi: 2.070 Hertz,
Top View Tampak Jembatan Tidak Bergerak ke Samping



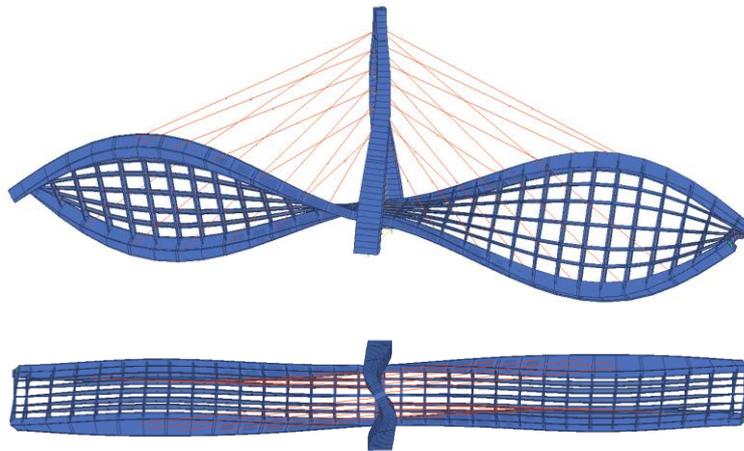
Gambar 14 Mode Shape 5 Bending, dengan Frekuensi: 2.590 Hertz,
Top View Tampak Jembatan Bergerak ke Samping



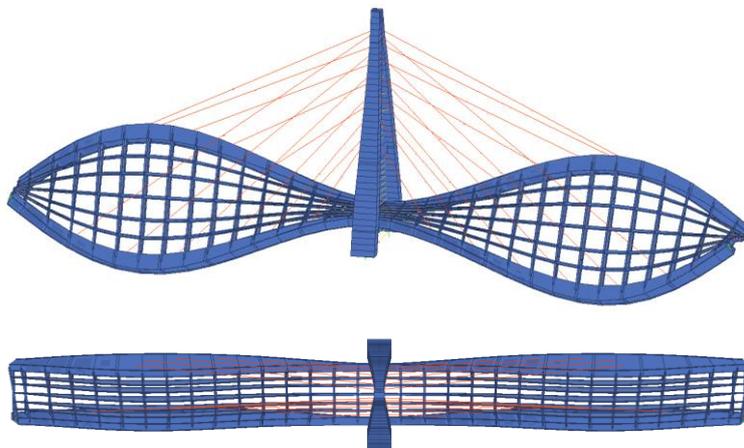
Gambar 15 Mode Shape 6 Bending, dengan Frekuensi: 2,616 Hertz,
Top View Tampak Jembatan Bergerak ke Samping



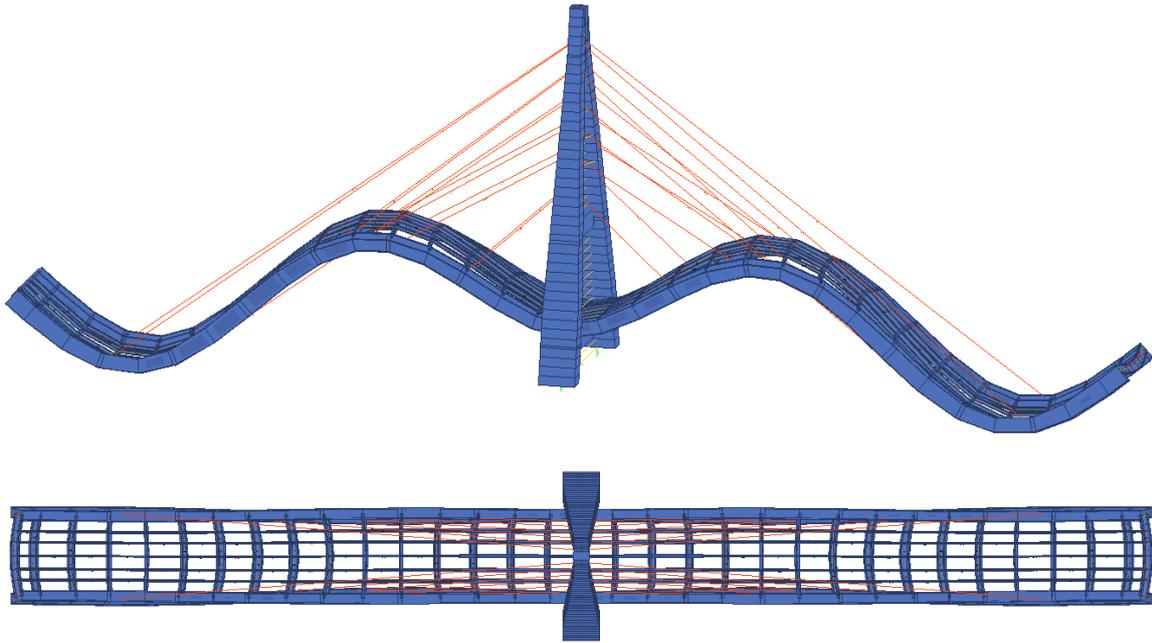
Gambar 16 Mode Shape 7 Bending Seperempat, dengan Frekuensi: 3,206 Hertz,
Top View Tampak Jembatan Tidak Bergerak ke Samping



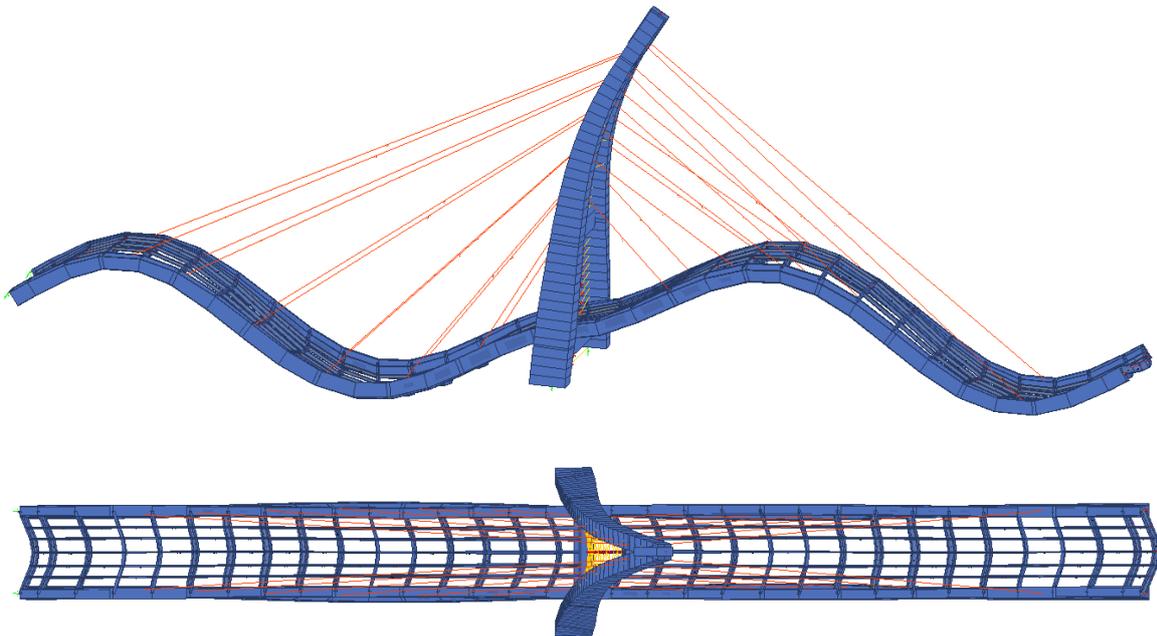
Gambar 17 Mode Shape 8 Torsi Murni, dengan Frekuensi: 3,296 Hertz,
Top View Tampak Jembatan Tidak Bergerak ke Samping



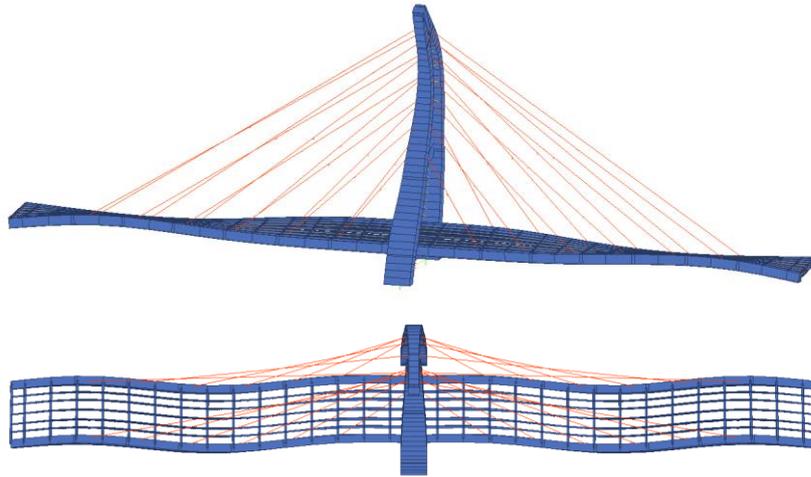
Gambar 18 Mode Shape 9 Torsi Murni, dengan Frekuensi: 3,451 Hertz,
Top View Tampak Jembatan Tidak Bergerak ke Samping



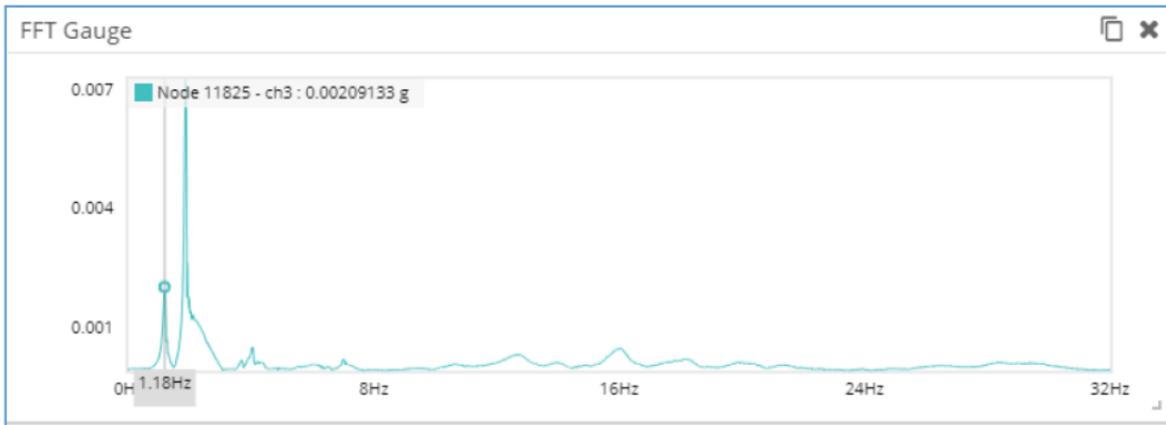
Gambar 19 Mode Shape 10 Bending Seperempat, dengan Frekuensi: 3,801 Hertz,
Top View Tampak Jembatan Tidak Bergerak ke Samping



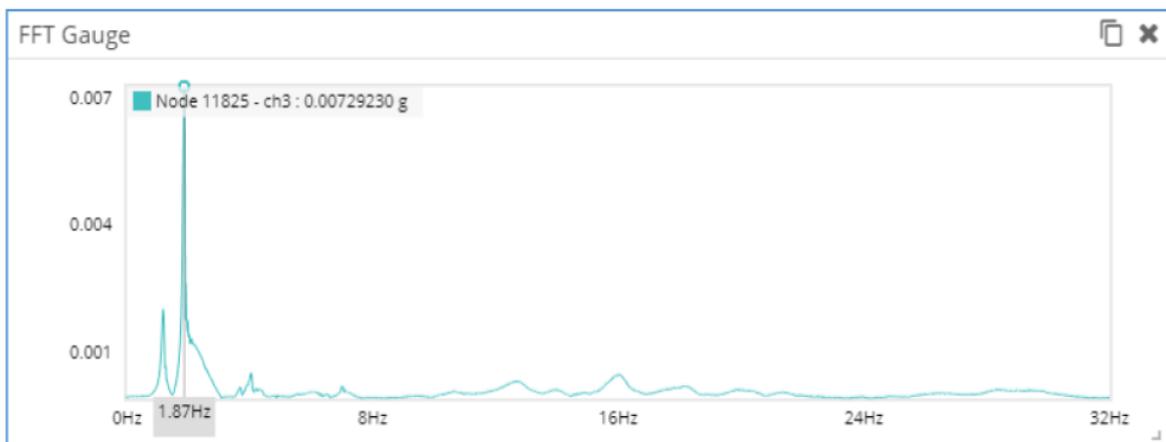
Gambar 20 Mode Shape 11 Bending Seperempat, dengan Frekuensi: 3,807 Hertz,
Top View Tampak Jembatan Tidak Bergerak ke Samping



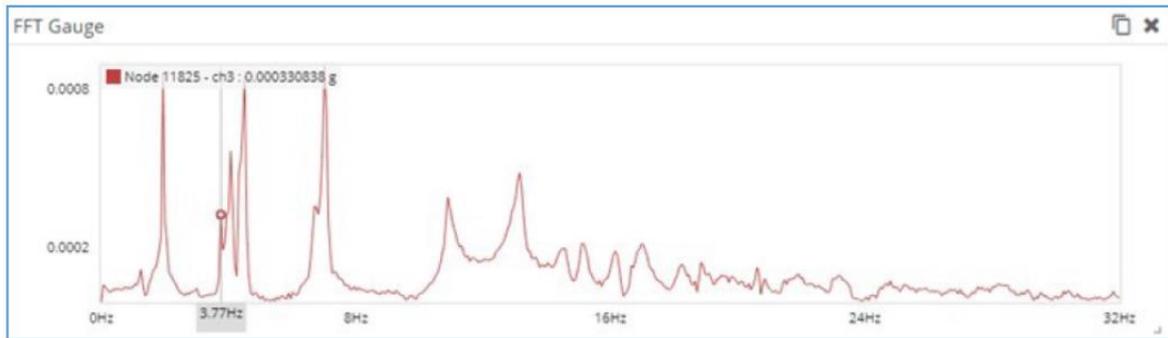
Gambar 21 Mode Shape 12 Torsi dengan Sedikit Pergerakan ke Samping, Frekuensi: 4,279 Hertz



Gambar 22 FFT Frekuensi 1,18 Hertz Bersesuaian dengan Mode Shape Ketiga, yaitu Bending S (1,237 Hertz)



Gambar 23 FFT Frekuensi 1,87 Hertz Bersesuaian dengan Mode Shape Keempat, yaitu Bending (2,07 Hertz)

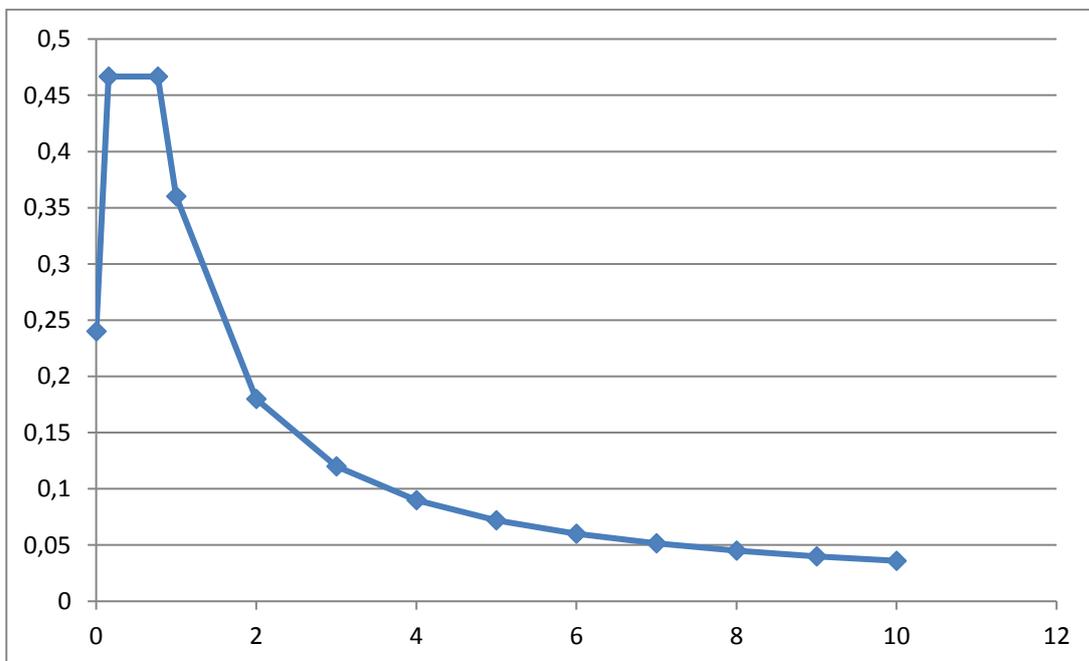


Gambar 24 Frekuensi FFT 3,77 Hertz Bersesuaian dengan Mode Shape Torsi dan Bending Seperempat

ANALISIS BEBAN GEMPA

Untuk meyakinkan bahwa struktur aman dari beban gempa, dilakukan analisis beban gempa response spektrum sesuai dengan SNI 2833:2016. Arah yang ditinjau adalah arah X (arah memanjang jembatan) dan *mode shape* yang diperhitungkan adalah 80, karena *mass participation ratio* arah X telah mencapai 91,91.

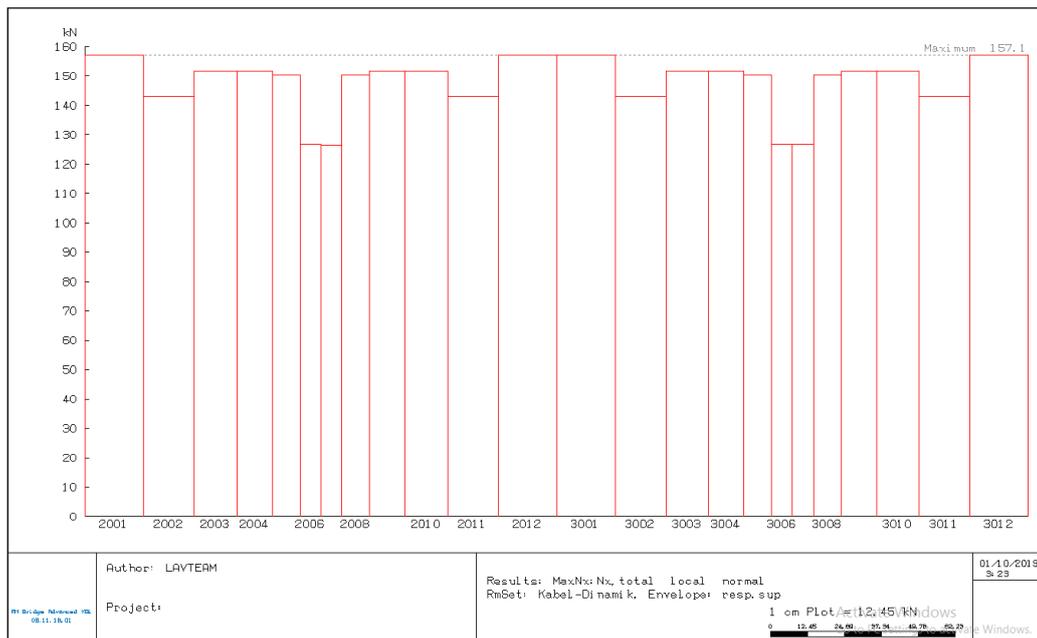
Dari hasil analisis diperoleh gaya kabel yang terjadi selama gempa, seperti terlihat pada Gambar 26. Gaya kabel yang terjadi akibat beban gempa adalah 157 kN, sehingga tegangan kabel adalah 51 MPa. Jika angka ini ditambah dengan tegangan kabel yang terjadi saat pengujian, yaitu 262 MPa, diperoleh tegangan sebesar 313 MPa. Nilai ini masih lebih rendah daripada $0,45 \cdot 1860$ MPa atau 837 MPa, sehingga secara teoritis kabel masih aman.



Gambar 25 Beban Response Spektrum yang Harus Ditampung oleh Struktur

Tabel 1 Mode Shape yang Digunakan untuk Analisis Beban Gempa

Mode	phi*M*phi	X	Y	Z	SUM-X	SUM-Y	SUM-Z	HERTZ
70	0,1072E+03	0,00	0,09	0,00	91,86	51,07	87,17	18,515
71	0,1182E+03	0,01	0,00	0,00	91,87	51,07	87,17	18,606
72	0,3146E+03	0,00	0,00	0,00	91,87	51,07	87,17	18,930
73	0,9179E+03	0,00	0,13	0,00	91,87	51,21	87,17	19,101
74	0,1912E+03	0,04	0,00	0,00	91,91	51,21	87,17	19,177
75	0,1103E+03	0,00	0,83	0,00	91,91	52,03	87,17	19,293
76	0,1778E+03	0,00	0,00	0,00	91,91	52,04	87,17	19,321
77	0,1354E+03	0,00	0,00	0,00	91,91	52,04	87,17	19,527
78	0,6669E+03	0,00	0,00	0,00	91,91	52,04	87,17	20,290
79	0,3387E+03	0,00	0,00	0,00	91,91	52,04	87,17	20,415
80	0,3974E+03	0,00	0,00	0,64	91,91	52,04	87,81	20,513



Gambar 26 Gaya Kabel yang Terjadi akibat Pembebanan Gempa

KESIMPULAN DAN SARAN

Jembatan Sungai Dareh dapat dilalui beban lalu lintas dengan beban lalu lintas yang tidak melampaui 240 ton (83% UDL). Perilaku Jembatan Sungai Dareh sudah sesuai harapan *mode shape* yang terjadi, untuk *bending* 1,18 Hertz, *bending* seperempat bentang 1,87 Hertz, dan torsi 3,77 Hertz. Kekakuan yang diperoleh dari model sama atau mendekati kekakuan di lapangan, dengan lendutan maksimal 56 mm. Jembatan ini juga sudah di-*running* dengan beban gempa dan terbukti masih kuat secara kekuatan kabel.

Pengujian serupa sebaiknya dilakukan pula untuk jembatan yang mengalami *staggering construction*, seperti Jembatan Teluk Kendari dan Jembatan Pulau Balang. Kedua jembatan ini termasuk jembatan *cable stayed*, tetapi lebih besar dari segi ukuran dan analisisnya lebih kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. 2016. *Pembebanan untuk Jembatan*. SNI 1725:2016. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. 2016. *Perencanaan Jembatan terhadap Beban Gempa*. SNI 2833:2016. Jakarta.
- Bentley. 2011. *RM Bridge V8i Manual (SELECTseries 1)*. Vienna: Bentley System Austria.