

JEMBATAN GANTUNG ULTRA-PANJANG UNTUK JEMBATAN SELAT SUNDA

Wiratman Wangsadinata
Donald Essen Ireng
Guntorojati

Abstrak

Dalam makalah ini akan diuraikan secara singkat karakteristik yang khas dari sistem jembatan gantung ultra-panjang, yang dalam beberapa hal berbeda dengan jembatan gantung dengan bentang pendek. Kemudian akan ditunjukkan bagaimana beberapa karakteristik dari Jembatan Gantung Ultra-panjang Selat Sunda dibandingkan dengan karakteristik jembatan gantung berbentuk panjang lainnya di dunia.

Kata kunci: Jembatan gantung ultra- panjang, kekakuan gravitasi, kabel, pylon

PENDAHULUAN

Dari hasil pradesain Jembatan Selat Sunda sebagai bagian dari prastudi kelayakan yang telah dilaksanakan oleh PT. Wiratman atas penugasan PT. Bangunraha Sejahtera Mulia - Artha Graha Network dan yang telah diserahkan resmi kepada Pemerintah Pusat pada tanggal 13 Agustus 2009 [1], Jembatan Selat Sunda dengan panjang total 29 km, akan terdiri dari 5 seksi, di mana 2 seksi terdiri dari jembatan gantung ultra-panjang untuk melangkahi 2 palung yang lebar, sekaligus melangkahi alur laut internasional (Alur Laut Kepulauan Indonesia). Ke dua jembatan tersebut dikategorikan ke dalam jenis jembatan gantung ultra-panjang, karena panjang bentang tengahnya melampaui 2.000 m, yaitu 2.200 m. Ke dua bentang sampingnya adalah 800 m (Gambar 1).

Kelayakan konfigurasi jembatan seperti ini telah dikonfirmasi oleh hasil survai Puslitbang Geologi Kelautan, Balitbang ESDM, Kementerian ESDM, dan dipresentasikan dalam loka karya yang diselenggarakan di Jakarta tanggal 30 September 2010, yang menunjukkan bahwa posisi pylon dan blok anker sudah cukup baik, berada pada lokasi yang tanahnya stabil dan tidak pada lereng yang curam atau berpotensi untuk longsor. Di samping itu, dua buah palung yang dilalui tidak lebih dari 150 m

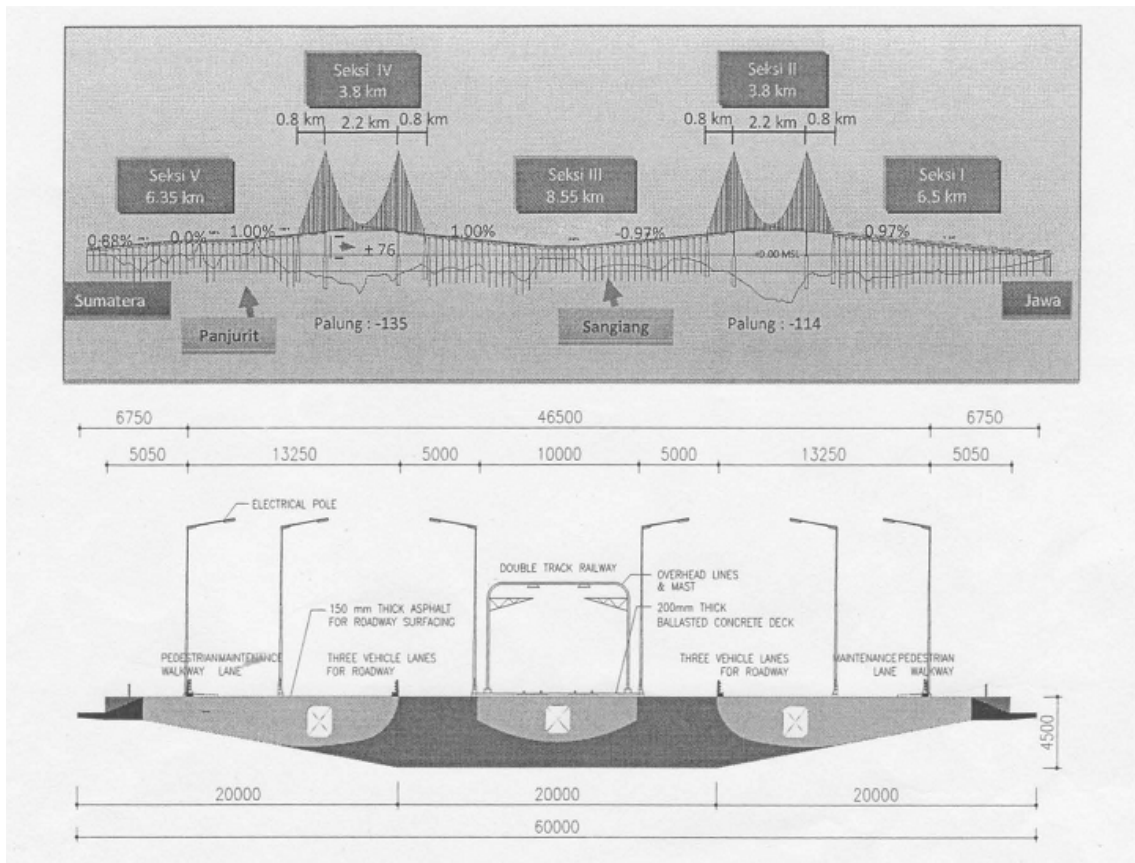
kedalamannya. Jenis dek Jembatan Gantung Ultra-panjang Selat Sunda diambil identik dengan dek Jembatan Selat Messina (Gambar 1), sedangkan rasio sag/span diambil 1/10. Dimensi unsur-unsur lainnya (kabel, pylon, jangkar, dll.) adalah seperti dilaporkan dalam pra-design [1].

TRANSFER BEBAN

Suatu jembatan gantung sebenarnya merupakan sistem struktur yang sederhana. Secara sederhana beban-beban yang bekerja pada dek disalurkan ke kabel utama melalui kabel penggantung dan kemudian diteruskan ke pondasi terutama melalui pylon-nylon untuk komponen yang vertikal dan melalui blok-blok jangkar untuk komponen yang horizontal.

Bila dibebani oleh beban hidup misalnya, seperti pada struktur hiperstatik secara umum, unsur-unsur suatu jembatan gantung mengalami interaksi, di mana gaya-gaya dipikul oleh berbagai-bagai unsur struktur tersebut sesuai dengan kekakuan relatifnya.

Interaksi utama terjadi antara dek yang kekakuannya berhubungan dengan lentur, dan kabel-kabel utama yang kekakuannya terutama ditentukan oleh geometri dan gaya tarik yang bekerja di dalamnya. Mengingat gaya tarik tersebut pada jembatan gantung berhubungan dengan berat, kekakuan geometrik kabel sering juga disebut "kekakuan gravitasi".



Gambar 1. Penampang memanjang Jembatan Selat Sunda (atas) dan dek Jembatan Gantung Ultra Panjang Selat Sunda (bawah)

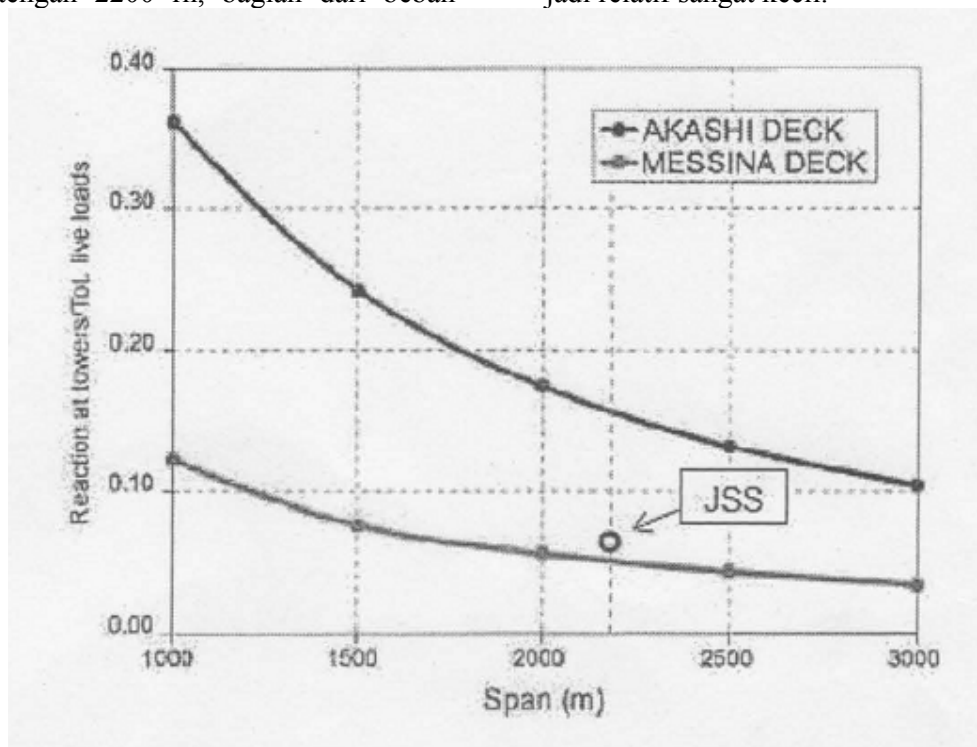
Perubahan dalam kekakuan relatif di antara dek (dalam lentur) dan kabel utama (akibat gaya tarik dan geometri) terhadap bentang merupakan parameter utama yang mendominasi perilaku jembatan gantung dalam banyak aspeknya. Sebagai contoh, dengan gaya tarik yang tetap, kekakuan kabel berkurang sebanding dengan bentang, sedangkan dengan penampang melintang yang tetap kekakuan dek juga berkurang tetapi sebanding dengan bentang berpangkat lebih tinggi.

Pada bentang yang relatif pendek, ke dua macam kekakuan tersebut sama-sama berperan; baik dek maupun kabel memikul bagian yang signifikan dari beban hidup yang bekerja. Hal ini melahirkan konsep dek sebagai "gelegar pengaku", yang dengan bekerja sama dengan kabel utama memikul bagian yang signifikan dari beban hidup yang

bekerja melalui kekakuannya masing-masing. Untuk panjang bentang yang meningkat, pengurangan kekakuan kabel sebagian dikompensasi oleh bertambahnya tegangan tarik dan karenanya membesarnya ukuran kabel. Sebaliknya, mengingat ukuran dek tidak bergantung pada bentang, pada panjang bentang yang meningkat kekakuan relatif dek akan berkurang dengan drastis dan perannya sebagai pengaku terhadap pemikulan beban global menjadi hilang. Dek hanya berfungsi sebagai unsur yang menyalurkan beban hidup ke kabel-kabel penggantung dan secara global tidak lagi berperan dalam memikul beban hidup, karena seluruhnya dipikul oleh kabel utama. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2, yang menunjukkan bagian dari beban hidup total yang dipikul oleh dek sebagai fungsi dari panjang bentang untuk 2 jenis dek yang berbeda, yaitu dari Jembatan Akashi Kaikyo dan Jembatan Selat Messina. Pada Jembatan

Gantung Ultra Panjang Selat Sunda dengan bentang tengah 2200 m, bagian dari beban

hidup total yang dipikul oleh dek hanya 7.2%, jadi relatif sangat kecil.



Gambar 2. Bagian dari beban hidup yang dipikul oleh dek sebagai fungsi dari panjang bentang untuk 2 jenis dek [2].

Dari uraian di atas terlihat, bahwa kabel utama merupakan unsur utama yang memberi kekakuan pada jembatan; kabel utama merupakan tulang punggung dari struktur. Hal ini berarti, bahwa perilaku statik maupun dinamik suatu jembatan gantung ultra-panjang direpresentasikan oleh perilaku suatu catenary (rantai).

Uraian di atas mengenai transfer beban tidak saja berlaku untuk beban hidup vertikal, tetapi juga untuk beban lain secara umum, yang penting di antaranya adalah beban lateral akibat angin dan gempa serta beban hidup eksentrik yang menyebabkan momen puntir (torsi) pada dek.

Pada jembatan gantung ultra-panjang, beban angin pada dek terutama disalurkan ke pylon-nylon bukan melalui kekakuan lentur lateral dari dek, tetapi melalui kabel utama akibat efek bandul dari kabel-kabel penggantung. Beban angin dengan demikian disalurkan ke puncak pylon, sehingga sangat menentukan

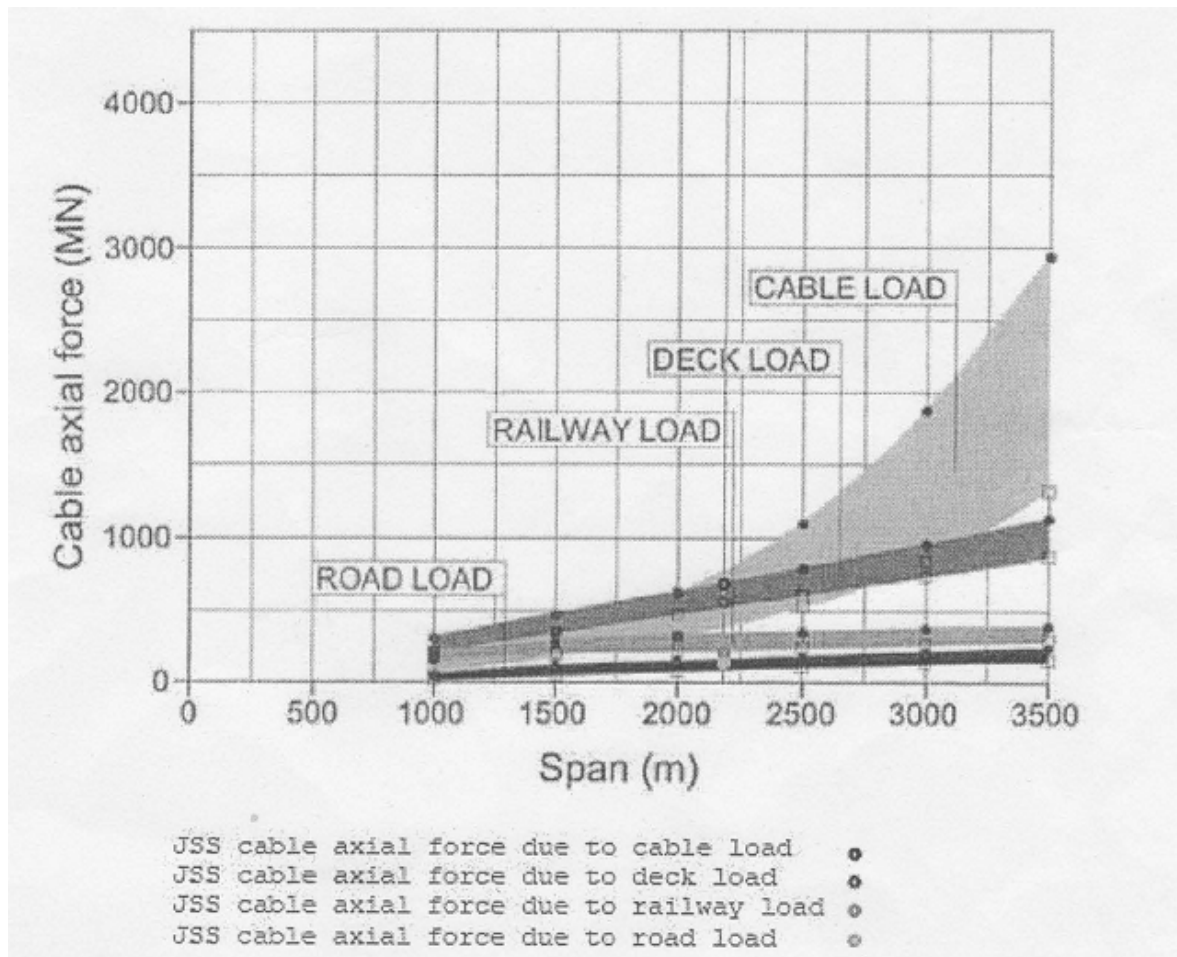
desain dari pylon.

Beban hidup eksentrik yang menimbulkan momen puntir pada dek juga dipikul oleh kabel-kabel penggantung. Dalam hal ini, parameter yang sangat menentukan terhadap kekakuan torsional atau lebih baik dikatakan terhadap kekakuan rotasional dari dek, adalah jarak antara kabel-kabel utama yang memberi lengan momen untuk menyalurkan rotasi dek melalui gaya-gaya vertikal dalam kabel-kabel penggantung

PROBLEM SKALA

Issu Berat Sendiri dan Kuantitas Kabel

Telah ditunjukkan, bahwa ukuran kabel bertambah dengan meningkatnya panjang bentang. Gambar 3 menunjukkan perubahan gaya tarik kabel akibat berbagai pembebanan yang berbeda (berat sendiri kabel, berat dek, beban kereta rei, beban lalu lintas jalan) untuk dek dari jenis yang dipakai di Jembatan Selat Messina dan Jembatan Selat Sunda.



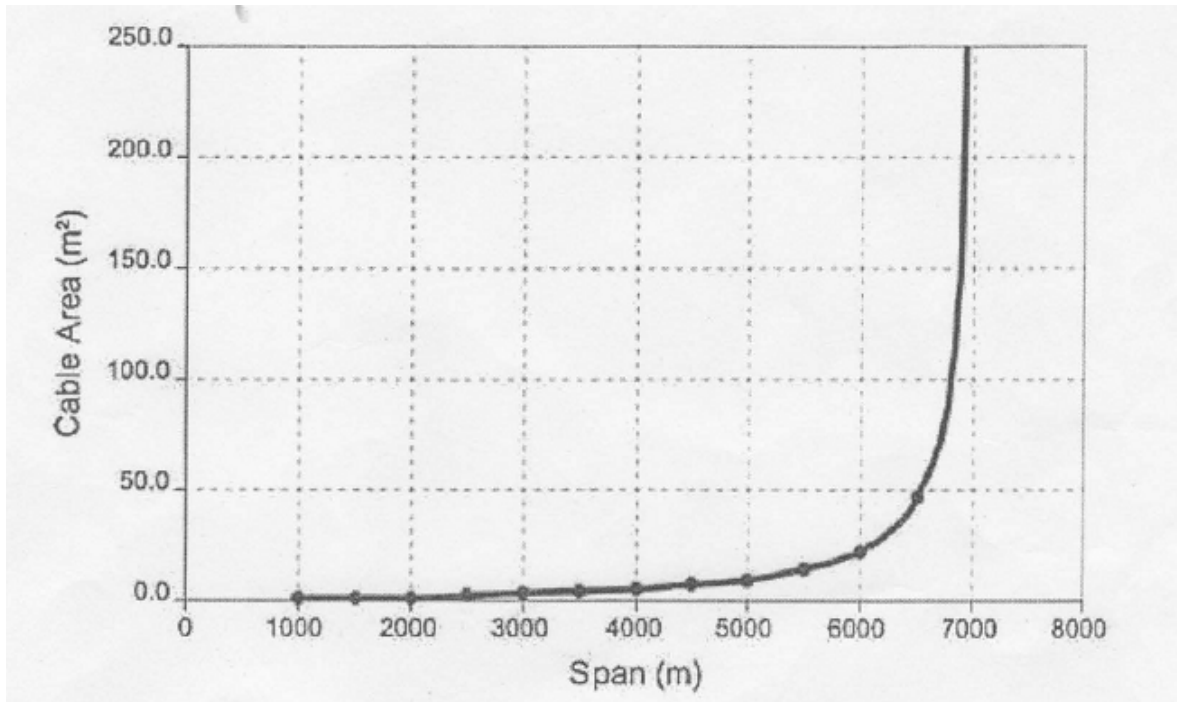
Gambar 3. Gaya tarik kabel akibat berbagai beban [2].

Dari gambar di atas dapat dilihat, bahwa untuk bentang sekitar 1000 m berat dek merupakan komponen terbesar dari gaya tarik kabel, dengan sumbangan yang signifikan dari beban kereta rel tetapi kurang dari berat sendiri kabelnya. Untuk panjang bentang yang meningkat, sumbangan dari berat dek meningkat sebanding dengan bentang. Beban lalu lintas jalan dan beban kereta rel bertambah, tetapi kurang dari sebanding, sedangkan untuk bentang yang sangat panjang beban hidup rata-rata berkurang karena mengecilnya probabilitas terjadinya.

Yang terlihat sangat menonjol adalah, bahwa untuk panjang bentang yang meningkat, sumbangan berat sendiri kabel meningkat lebih dari sebanding. Pada bentang 2000 m sumbangan berat sendiri kabel terhadap gaya

tarik kabel mulai melampaui sumbangan dari berat jalan rel. Untuk bentang yang lebih panjang lagi berat sendiri kabel menjadi penyumbang terbesar dari gaya tarik kabel.

Secara teoretis dapat dihitung berapa ukuran kabel untuk panjang bentang yang meningkat untuk sifat-sifat baja kabel, berat dek dan beban hidup tertentu. Untuk kasus Jembatan Selat Messina dan Jembatan Gantung Ultra Panjang Selat Sunda diperoleh gambaran seperti ditunjukkan dalam Gambar 4. Seperti dapat dilihat, kurvanya berbentuk siku, dimana bentang teoretis maksimum yang bisa dicapai adalah sekitar 7000 m. Jadi gagasan T.Y. Lin untuk membuat jembatan untuk menyebrangi Selat Gibraltar antara Spanyol dan Marocco dengan bentang 5000 m adalah tidak mustahil sama sekali.



Gambar 4. Perubahan luas penampang kabel dengan perubahan bentang [2].

Dari uraian di atas terlihat, bahwa pada jembatan gantung ultra-panjang, kabel merupakan komponen yang paling berat dan paling mahal dari struktur atas, dan ukuran kabel yang besar langsung berpengaruh terhadap ukuran pylon, pondasi dan blok jangkar, karena unsur-unsur ini memikul dan mendukung berat kabel dan gaya tarik di dalamnya.

Membatasi berat kabel dengan demikian harus menjadi target desain yang paling utama untuk mencapai kelayakan finansial yang tinggi dari suatu jembatan gantung ultra-panjang.

Berhubung berat kabel bersumber dari beban yang harus dipikul dan dari tegangan tarik baja maksimum yang diizinkan, segala usaha harus dilakukan untuk hal-hal sebagai berikut:

- Pilih konfigurasi dek yang sering-ringannya dengan menerapkan baja mutu tinggi agar berat dapat dikurangi.
- Pilih perlengkapan dek, lapisan permukaan

dan peralatan yang sering-ringannya, tetapi tetap memenuhi persyaratan kinerja yang berlaku.

- Gunakan jenis baja dengan kekuatan setinggi-tingginya untuk kabel utama.
- Pilih faktor-faktor keamanan parsial dan tegangan yang diizinkan dengan sebaik-baiknya untuk kasus struktur yang dominan memikul berat sendiri dan beban mati yang tinggi.
- Gunakan rasio sag/span yang sebesar-besarnya yang memungkinkan dilihat dari persyaratan lainnya.

Tabel 1. Berat dek dan kabel utama

Jembatan	Berat dek (t/m)	Berat kabel (t/m)
Akashi Kaikyo	23	12
Selat Messina	18	32
Selat Sunda	18	18

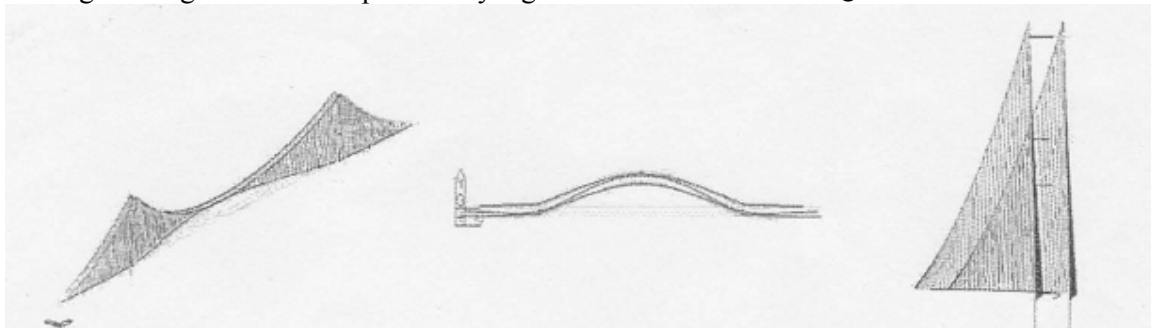
KARAKTERISTIK DINAMIK DAN STABILITAS AEROELASTIK

Telah ditunjukkan di atas, bahwa kekakuan kabel berubah dengan meningkatnya panjang bentang dan menjadi dominan secara progresif dalam menentukan perilaku statik. Hal yang sama juga terjadi pada perilaku dinamik dari jembatan. Berikut akan ditunjukkan bentuk ragam-ragam pertama alami dan waktu getarnya untuk Jembatan Gantung Ultra-panjang Selat Sunda menurut pra-desain [1].

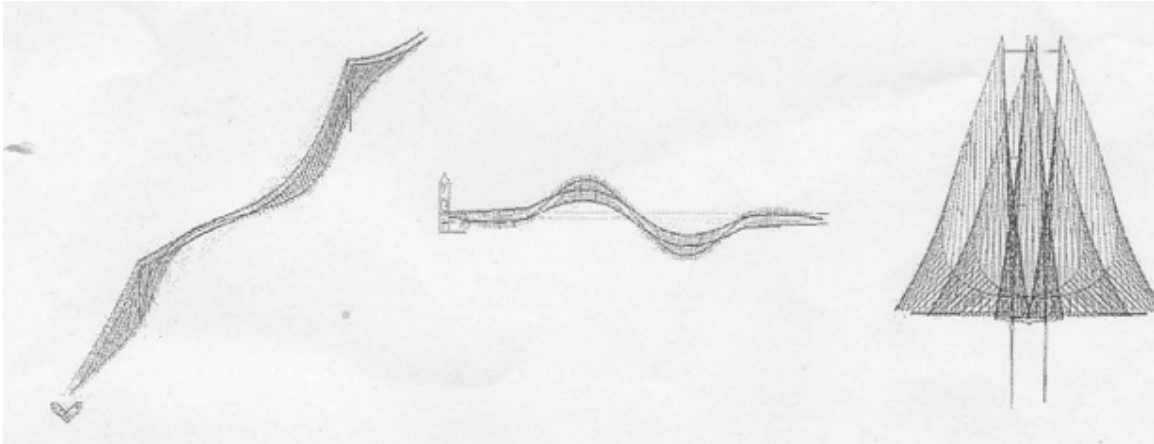
- Dua ragam lateral pertama, yaitu yang simetris dan yang anti-simetris ditunjukkan berturut-turut dalam Gambar 5 dan Gambar 6. Ragam lateral pertama yang simetris memiliki waktu getar alami 23,1 detik, sedangkan ragam lateral pertama yang anti-simetris memiliki waktu getar 10,9 detik. Keduanya berkaitan dengan gerak lateral bandul dari dek dan kabel yang didominasi oleh kekakuan geometrik kabel. Ragam lateral pertama yang simetris biasanya merupakan ragam pertama absolut dari jembatan, yaitu ragam dengan waktu getar terpanjang.
- Dua ragam vertikal pertama, yaitu yang simetris dan yang anti-simetris ditunjukkan berturut-turut dalam Gambar 7 dan Gambar 8. Ragam vertikal pertama yang simetris memiliki waktu getar 12,4 detik, sedangkan ragam vertikal pertama yang anti-simetris memiliki waktu getar 13,9 detik. Ragam vertikal pertama yang simetris melibatkan partisipasi regangan tarik di dalam kabel yang tinggi, sehingga didominasi oleh kekakuan aksial kabel, sedangkan ragam vertikal pertama yang

anti-simetris didominasi oleh kekakuan geometrik dari kabel. Bergantung pada konfigurasi kabel, masing-masing ragam dapat memiliki waktu getar yang lebih panjang dari yang lainnya bergantung pada bentangnya dan biasanya merupakan ragam kedua absolut dari jembatan. Ragam-ragam ini sering disebut "ragam lentur" karena bentuk deformasi dari deknya. Tetapi sebutan tersebut dapat menyesatkan, mengingat yang dominan adalah kekakuan kabel, bukan kekakuan dek. Karena itu, lebih baik ragam tersebut disebut "ragam vertikal".

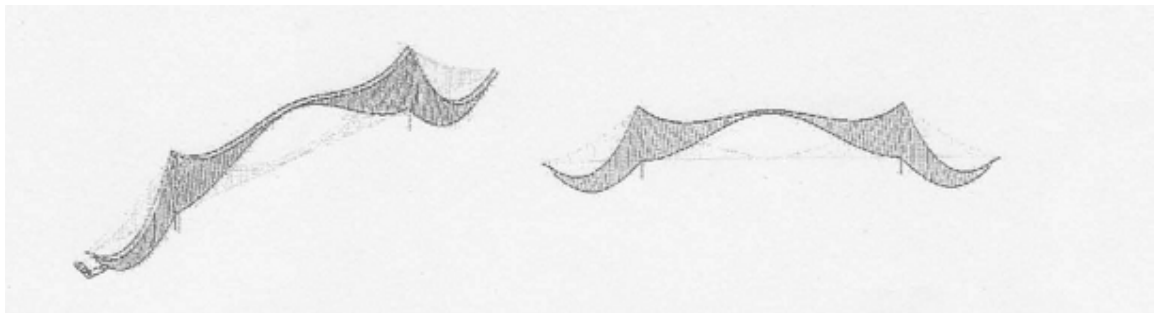
- Dua ragam rotasional pertama, yaitu yang simetris dan yang anti-simetris ditunjukkan berturut-turut dalam Gambar 9 dan Gambar 10. Ragam rotasional pertama yang simetris memiliki waktu getar 8,6 detik, sedangkan ragam rotasional pertama yang anti-simetris memiliki waktu getar 8,5 detik. Ragam rotasional yang simetris melibatkan partisipasi regangan yang tinggi di dalam kabel, sehingga didominasi oleh kekakuan aksial kabel, sedangkan ragam rotasional yang anti-simetris didominasi oleh kekakuan geometrik dari kabel. Bergantung pada konfigurasi kabel, masing-masing ragam dapat memiliki waktu getar yang lebih panjang dari yang lainnya bergantung pada bentangnya. Ragam-ragam ini sering disebut "ragam torsional" karena bentuk deformasi dari deknya. Tetapi sebutan tersebut kembali dapat menyesatkan, mengingat yang dominan adalah kekakuan kabel, bukan kekakuan dek. Karena itu, lebih baik ragam ini disebut "ragam rotasional".



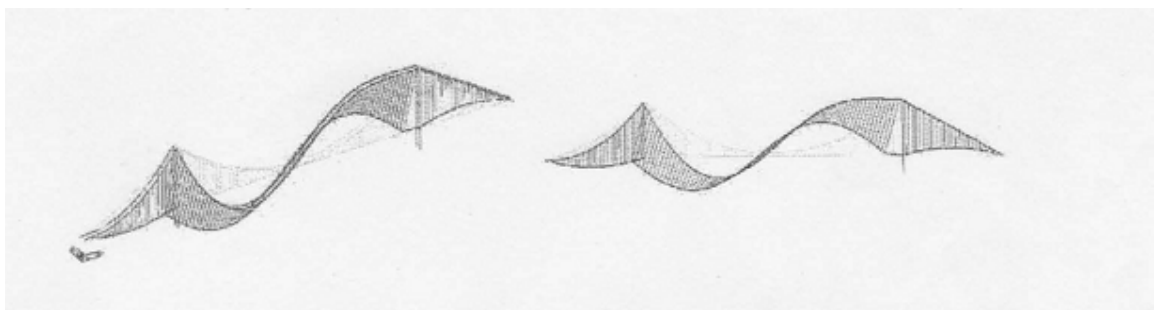
Gambar 5. Ragam lateral pertama yang simetris dari Jembatan Gantung Ultra-Panjang Selat Sunda dengan waktu getar 23,2 detik (Ragam no.1).



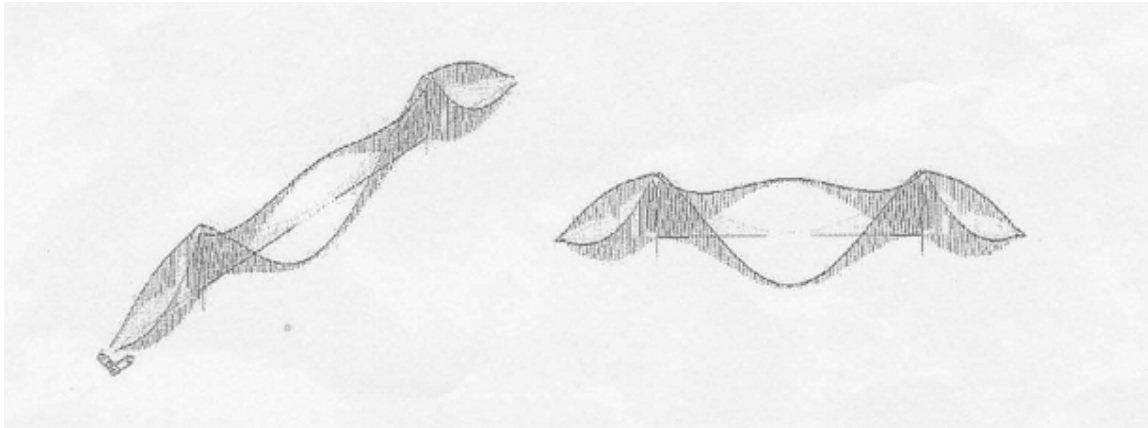
Gambar 6. Ragam lateral pertama yang anti-simetris dari Jembatan Gantung UltraPanjang Selat Sunda dengan waktu getar 10,9 detik (Ragam no.4).



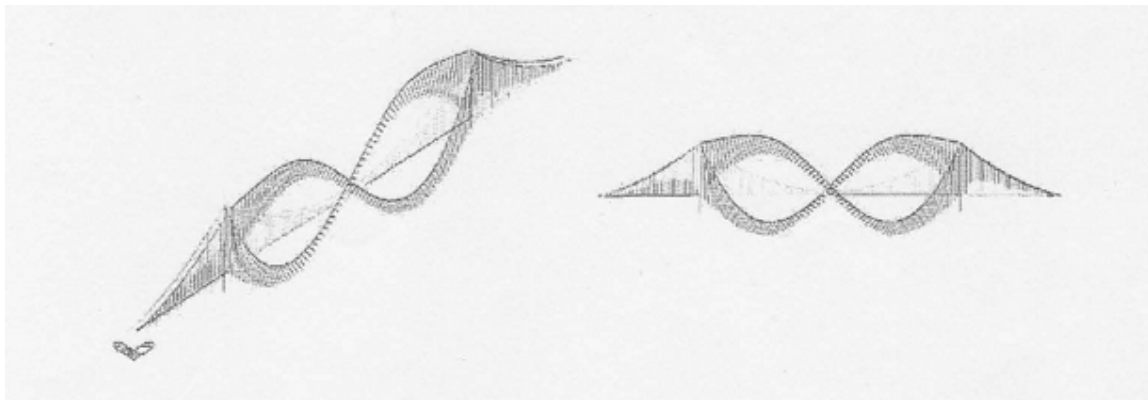
Gambar 7. Ragam vertikal pertama yang simetris dari Jembatan Gantung Ultra-Panjang Selat Sunda dengan waktu getar 12,4 detik (Ragam no.3)



Gambar 8. Ragam vertikal pertama yang anti-simetris dari Jembatan Gantung Ultrapanjang Selat Sunda dengan waktu getar 13,9 detik (Ragam no.2)



Gambar 9. Ragam rotasional pertama yang simetris dari Jembatan Gantung Ultrapanjang Selat Sunda dengan waktu getar 8,6 detik (Ragam no. 7)



Gambar 10. Ragam rotasional pertama yang anti-simetris dari Jembatan Gantung Ultra-panjang Selat Sunda dengan waktu getar 8,5 detik (Ragam no. 8).

Seperti halnya perilaku statik, juga perilaku dinamik jembatan gantung secara dominan ditentukan oleh kekakuan kabel utamanya. Yang berubah secara menyolok pada jembatan gantung ultra-panjang adalah kabel-kabel utamanya yang menjadi unsur paling dominan yang menentukan berat dan massa, sehingga juga mendominasi pembagian gaya inersia. Dengan lain perkataan, bentuk ragam dan frekuensi alami suatu jembatan gantung ultra-panjang secara progresif mendekati ragam dan frekuensi suatu kabel bebas (stand-alone cable), di mana pengaruh dari unsur-unsur jembatan lainnya secara progresif mengecil. Hal ini khususnya berlaku untuk ragam-ragam vertikal dan rotasional, yang frekuensinya

semakin mendekat dengan meningkatnya panjang bentang. Pada keadaan batas, bila ke dua kabel utama menjelma menjadi kabel bebas, ke dua macam ragam tersebut menjadi identik dengan frekuensi yang tepat sama.

Dalam desain jembatan gantung ke dua ragam tersebut harus benar-benar terpisah untuk mencegah respons jembatan terhadap angin yang sangat berbahaya berupa instabilitas aeroelastik atau terjadinya gejala flutter akibat bergabungnya ragam rotasional dan ragam vertikal dari jembatan. Untuk suatu konfigurasi dan rasio sag/span tertentu, beberapa faktor dengan tingkat keutamaan yang berbeda, berperan dalam mempertahankan pemisahan

frekuensi dari ke dua ragam tersebut. Faktor-faktor utama tersebut adalah antara lain:

Rasio antara kekakuan rotasional dan kekakuan lentur dari dek. Nilai yang tinggi dari parameter ini meningkatkan frekuensi rotasional. Parameter ini dapat diatur di dalam desain, walaupun lebih sulit dan kurang efektif untuk bentang-bentang yang semakin panjang.

Distribusi inersia yang berbeda antara dek dan kabel utama. Massa kabel utama terpusat dalam bidang gantungan kabel, sedangkan massa dek kurang lebih tersebar merata di antara bidang-bidang kabel. Hal ini menyebabkan keadaan di mana frekuensi ragam rotasional akan meningkat lebih cepat dari pada frekuensi ragam vertikal untuk panjang bentang yang meningkat.

Sifat-sifat pylon, khususnya rasio antara kekakuan lentur dalam arah longitudinal dan kekakuan rotasional terhadap sumbu vertikal. Kekakuan lentur berpartisipasi dalam ragam vertikal, sedangkan kekakuan rotasional berpartisipasi dalam ragam rotasional jembatan.

Kekakuan longitudinal dari hubungan kabel utama dengan dek. Bila hubungan tersebut hanya berupa kabel-kabel penggantung,

kekakuan tersebut adalah kecil. Karena itu, pada jembatan-jembatan gantung tertentu kabel-kabel utama dihubungkan langsung dengan dek di tengah-tengah bentang, yang dapat merubah nilai-nilai relatif frekuensi ragam vertikal maupun frekuensi ragam rotasional.

Tabel 2 menunjukkan karakteristik dinamik beberapa jembatan gantung untuk diperbandingkan dengan Jembatan Gantung Ultra-panjang Selat Sunda. Dari tabel tersebut terlihat, bahwa rasio frekuensi rotasional/vertikal untuk Jembatan Gantung Ultra-panjang Selat Sunda sebesar 1.61 adalah baik sekali, artinya ragam rotasional pertama cukup jauh keberadaannya dari ragam vertikal pertama, sehingga kecil sekali kemungkinan bergabungnya ke dua frekuensi tersebut. Menurut uji coba terowongan angin Jembatan Selat Messina, gejala *flutter* baru akan terjadi pada kecepatan angin 90 m/et atau 324 km/jarn, Jembatan Gantung Ultra-panjang Selat Sunda yang mempunyai jenis dek yang sama dengan Jembatan Selat Messina, tetapi dengan bentang yang lebih pendek, paling tidak akan mempunyai kecepatan flutter yang sama 324 km/jam, Kecepatan angin setinggi itu belum pernah dan tidak akan pernah terjadi di Selat Sunda, berarti Jembatan Gantung Ultra-panjang Selat Sunda adalah bebas *flutter*.

Tabel 2. Rasio frekuensi rotasional vertikal untuk ragam-ragam pertama beberapa jembatan gantung

Jembatan	Bentang (m)	Jenis dek	Rasio frekuensi
Severn	988	Satu Kotak	2,65
Humber	1410	Satu Kotak	2,80
Storebaelt	1624	Satu Kotak	2,79
Xihoumen	1650	Dua Kotak	~2,00
Akashi	1991	Rangka	2,35
Selat Sunda	2200	Tiga Kotak	1,61
Selat Messina	3300	Tiga Kotak	1,36

DAFTAR PUSTAKA

1. Wiratman and Associates., *Prastudi Kelayakan Jembatan Selat Sunda*, Laporan ke PT. Bangungraha Sejahtera Mulia-Artha Graha Network, 26 Juni 2009.
2. Brancaloni, F. et al. *The Messina Strait Bridge: A Challenge and a Dream.*, Stretto diMessina, CRC Press, 2010.