

ANALISIS STABILITAS JEMBATAN CABLE-STAYED PRESTRESSED BOX GIRDER DENGAN VARIASI RASIO BENTANG TERHADAP LEBAR JEMBATAN

Arief Hidayat^{1*}, Bambang Supriyadi², Andreas Triwiyono³

^{1,2,3} Teknik Sipil, Teknik, Universitas Gadjah Mada

Jl. Grafika No. 2 Kampus UGM, Sleman, Yogyakarta

*Email: ariefhidaytt@mail.ugm.ac.id

Abstrak

Jembatan bentang panjang memiliki permasalahan khususnya akibat beban angin. Kegagalan struktur jembatan akibat beban angin dinamik terjadi pada jembatan Tacoma yang membuat runtuhnya jembatan karena ketidakstabilan aerodinamik. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui angka kestabilan aerodinamik dari 3 variasi lebar dek jembatan cable stayed 7 m, 12 m dan 18 m yang mana hasil dari penelitian ini akan menentukan kategori dari stabilitas aerodinamik dek jembatan. Metode pengujian penelitian ini adalah dengan menganalisis jembatan cable-stayed menggunakan software Midas Civil 19 dan hasil analisis yang didapat menunjukkan bahwa semakin besar rasio lebar dek terhadap bentang jembatan membuat frekuensi alami struktur semakin meningkat. Kestabilan aerodinamik jembatan pada ketiga model dek jembatan yang paling baik adalah pada bentang 18 m yang mana memiliki nilai P_b sebesar 0,039 dan masuk kedalam kategori a yang mana menandakan pengaruh dari beban angin dinamik pada struktur tidak terlalu signifikan berpengaruh.

Kata kunci: Jembatan, Cable Stayed, Stabilitas, Aerodinamik

PENDAHULUAN

Jembatan merupakan infrastuktur yang penting dalam pembangunan suatu daerah. Jembatan berfungsi untuk menghubungkan wilayah yang dibatasi oleh sungai, lembah, danau, laut, hingga melintasi jalan berlalu lintas padat dengan membangun flyover sehingga mobilisasi lancar dan mudah. Jembatan memiliki berbagai jenis berdasarkan materialnya seperti jembatan kayu, baja, beton dan jembatan komposit. Menurut bentangannya, jembatan dikategorikan menjadi dua, yaitu jembatan bentang panjang dan pendek. Jembatan bentang panjang adalah jembatan yang memiliki bentang utama lebih besar dari 200 m (Badan Standardisasi Nasional 2005).

Jembatan bentang panjang memiliki permasalahan khususnya akibat beban angin dinamik. Kegagalan struktur jembatan akibat beban angin dinamik terjadi pada jembatan Tacoma yang membuat runtuhnya jembatan karena ketidakstabilan aerodinamik. Keruntuhan jembatan Tacoma ini diklasifikasikan sebagai fenomena aerodinamik pada jembatan bentang panjang yang memiliki ketebalan dari dek yang tinggi serta lebar dari jembatan dibandingkan dengan bentang dari jembatan yang kurang ideal menahan beban aerodinamik. Akibatnya jembatan mengalami gerak berombak sampai akhirnya jembatan tersebut runtuh (Suangga dan Wiryana, 2008). Gaya angin dinamik dapat mengakibatkan tidak hanya masalah servis dan keselamatan khusus pada jembatan bentang panjang, tetapi juga ketidakstabilan seluruh struktur jembatan karena adanya sifat fleksibilitas struktur jembatan bentang panjang (Supriyadi dkk., 2017) oleh karena itu bentuk bentuk dari dek jembatan menjadi sangat penting khususnya untuk jembatan bentang panjang (Abdel-aziz dan Attia, 2015).

Beberapa penelitian mengenai jembatan panjang yang terkena beban angin dinamik sudah banyak diteliti, diantaranya adalah penelitian tentang analisis flutter pada jembatan cable stayed (Sukamta dkk., 2017) dengan menggunakan analisis numerik berdasarkan delapan turunan aerodinamik yang diekstraksi dan menggunakan metode flutter margin dari Zimmerman untuk memperkirakan kecepatan angin flutter pada hasil eksperimental didapatkan bahwa hasil dari analisis numerik mendekati hasil uji eksperimental. Supriyadi, dkk (2017) meneliti tentang pengaruh penambahan lebar dek terhadap stabilitas jembatan cable stayed dan mendapatkan hasil bahwa jembatan kabel khususnya untuk jembatan beton dengan sistem 2 plain yang memiliki ratio panjang dan lebar yang optimum tidak menunjukkan ketidakstabilan aerodinamik ketika memenuhi persyaratan $B > L/30$ ($B \geq 3,33\%$), semakin besar rasio lebar jembatan terhadap bentang utama jembatan, semakin besar pula berat sendiri serta beban layan yang bekerja pada struktur jembatan (Ohorella dan Harsoyo 2017). Pada penelitian ini

digunakan ratio lebar terhadap bentang jembatan dengan ratio 3,18% (dek lebar 7m), 5,46% (dek lebar 12m), dan 8,18% (lebar dek 18m). Hua., dkk (2007) juga meneliti tentang analisis flutter untuk jembatan bentang panjang menggunakan program ANSYS yang mana penambahan jaringan pusat dengan 0% menyebabkan penurunan kinerja stabilitas akibat angin, termasuk divergensi torsi aerostatik dan stabilitas *flutter*.

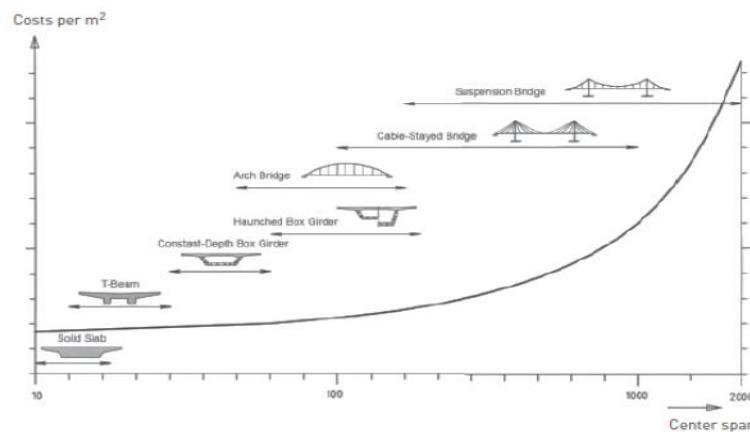
Hardono (2011) dan Tristanto, dkk (2016) meneliti tentang perilaku aerodinamika gelegar dari jembatan beruji kabel "Palibaja" menggunakan uji statis terowongan angin hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi angin dengan sudut serang 0 derajat maka model akan mengalami *negative lift* dan model lantai jembatan Palibaja kemungkinan terjadinya gaya angkat dalam arah gaya berat jembatan, dengan solusi perforasi lantai.

Kategori kestabilan aerodinamik jembatan pada penelitian ini menggunakan tingkat kerentanan jembatan terhadap angin dinamik dari pedoman perencanaan teknis jembatan beruji kabel, ada 3 kategori yaitu kategori a menunjukkan pengaruh angin dinamik pada struktur jembatan tidak signifikan, kategori b menandakan diperlukan perhatian terhadap bentuk penampang jembatan, dan kategori c Pengaruh angin dinamik sangat signifikan .

Tujuan dari penelitian ini adalah mencari nilai kestabilan aerodinamik dari 3 variasi lebar dek jembatan *cable stayed* yang mana hasil dari penelitian ini akan menentukan kategori dari stabilitas aerodinamik dek jembatan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pengetahuan lebih dalam kestabilan aerodinamik pada jembatan bentang panjang khususnya untuk jembatan *cable stayed*.

Jembatan Bentang Panjang

Jembatan bentang panjang memiliki panjang bentang utama lebih 200 m (lihat Gambar 3). Jembatan bentang panjang biasanya digantung menggunakan kabel secara langsung maupun tidak langsung. Sistem jembatan dengan menggunakan kabel dikategorikan menjadi *cable stayed bridge* dan *suspension bridge*. Kelebihan jembatan *cable stayed* tidak hanya rasio panjang bentang utama dan tinggi pylon yang lebih murah tetapi juga defleksi akibat pembebanan pada tengah bentang yang lebih kecil dibandingkan dengan jembatan *suspension* karena hal ini beberapa penelitian menunjukkan bahwa jembatan *cable stayed* lebih unggul daripada jembatan gantung (Supriyadi dan Muntohar 2007).



Gambar 3. Grafik hubungan biaya konstruksi jembatan dengan tipe jembatan yang ideal diterapkan pada masing-masing bentang. (Svensson, 2012)

Pembebanan Jembatan

Standar yang digunakan untuk perhitungan pembebanan jembatan adalah SNI 1725:2016 yang mengatur komponen beban jembatan terdiri dari atas berat sendiri (MS) adalah berat bahan dari jembatan dan elemen-elemen struktural bagian dari jembatan yang dipikulnya, ditambah dengan beban dari elemen non-struktural yang dianggap tetap, berat mati tambahan (MA) yaitu berat seluruh bahan yang membentuk suatu beban pada jembatan yang merupakan elemen non struktural, dan besarnya dapat berubah selama umur jembatan, beban lalu lintas (TD), beban pejalan kaki (TA), beban angin (EW), dan beban gempa (EQ) menggunakan SNI 2833:2016.

Stabilitas Aerodinamik

Menurut Kementerian Pekerjaan Umum (2015) tentang pedoman perencanaan jembatan beruji kabel, tingkat kerentanan jembatan terhadap beban dinamik angin dinyatakan dengan parameter P_b yang menunjukkan tingkat kerentanan jembatan terhadap angin dinamik berdasarkan kategori dari jembatan.

$$P_b = \left(\frac{\varphi b^2}{m_d}\right) \left(\frac{16V^2}{bL f_b^2}\right) \tag{1}$$

dengan:

- φ = kerapatan udara (kg/m^3)
- b = $\frac{1}{2}$ lebar dek jembatan (m)
- m_d = berat persatuan panjang dek
- V = kecepatan angin rata-rata dalam periode 1 jam (m/s)
- L = panjang bentang maksimum (m),
- f_b = frekuensi lentur alami (Hz)

Tabel 7. Tingkat kerentanan jembatan terhadap angin dinamik (Kementerian Pekerjaan Umum, 2015)

Tipe Kategori	Syarat	Keterangan
Kategori a	$P_b < 0,04$	Pengaruh angin dinamik pada struktur jembatan tidak signifikan
Kategori b	$0,04 \leq P_b \leq 1,00$	Diperlukan perhatian terhadap bentuk penampang jembatan
Kategori c	$P_b > 1,00$	Pengaruh angin dinamik sangat signifikan

METODE PENELITIAN

Beban angin merupakan hal yang harus diperhitungkan khususnya untuk struktur jembatan bentang panjang seperti *cable stayed bridge*, yang mana dapat mempengaruhi kinerja layan dan stabilitas struktur jembatan, untuk itu perlu dilakukan kajian lebih mendalam khususnya pada stabilitas aerodinamis dari struktur jembatan. Pemodelan jembatan dianalisis dengan menggunakan program Midas Civil 2019 untuk mengetahui kestabilan struktur jembatan terhadap angin dinamik. Prosedur penelitian dilakukan dengan mengumpulkan data referensi jembatan *cable stayed*, tinggi pylon, material dek, rasio lebar dek terhadap bentang jembatan.

Data Jembatan

Data-data jembatan yang digunakan baik itu data umum adalah data jembatan yang diasumsikan dari data jembatan bentang panjang pada umumnya. Data material dan mutu jembatan dapat dilihat pada Tabel 8.

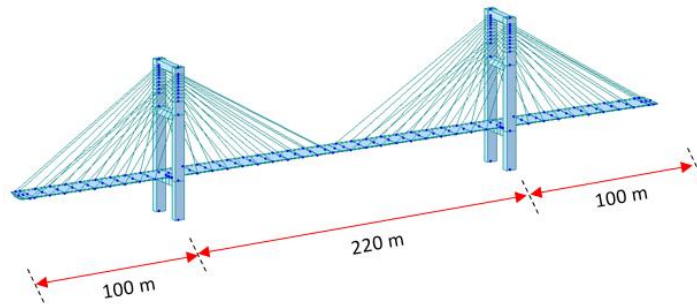
Tabel 8. Material dan mutu dari tiap komponen jembatan

Komponen	Material	Mutu	Keterangan
Pylon	Beton	$F_c 50$	$f'c = 50 \text{ Mpa}$
Dek	Beton	$F_c 50$	$f'c = 50 \text{ Mpa}$
Kabel	Steel strand	A416 – 270 (low)	$f_{py} = 1680 \text{ MPa} \ \& \ f_{pu} = 1860 \text{ MPa}$

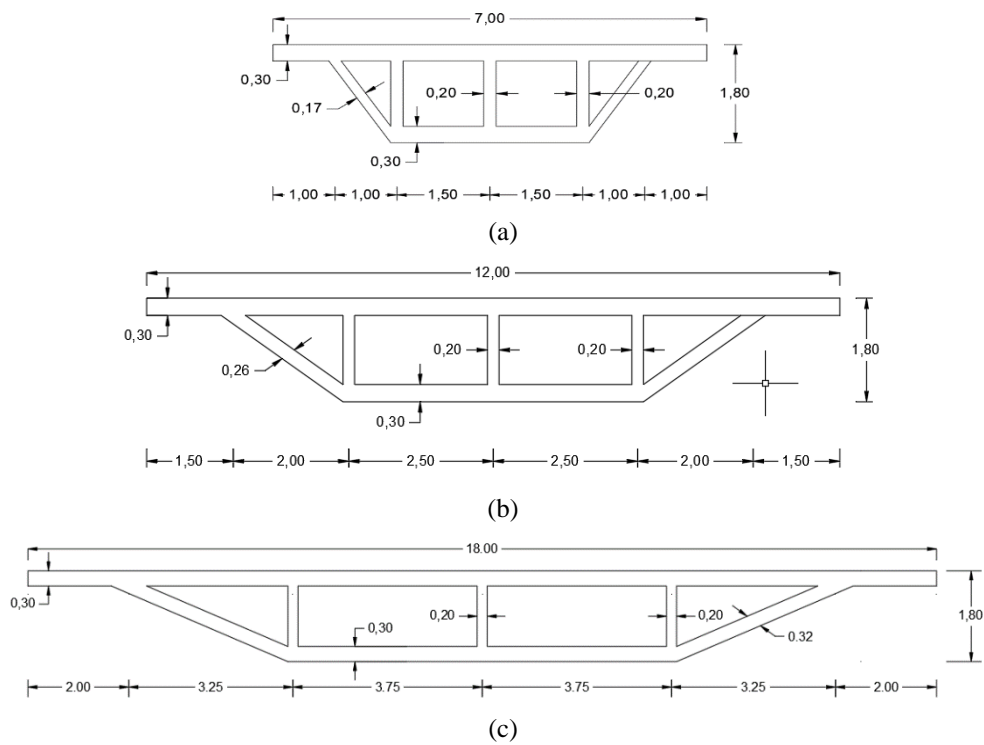
Geometri Jembatan

Jembatan yang digunakan adalah jembatan yang memiliki total bentang 420 m dengan bentang utama sebesar 220 m dan bentang sisi jembatan 100 m (lihat Gambar 4). Dek yang digunakan adalah prestressed box girder (solid) dengan lebar dek yang digunakan pada penelitian ini adalah 7 m, 12 m, dan 17 m (lihat Gambar 5). Struktur pylon jembatan menggunakan beton bertulang dan memiliki ukuran lebar 22 m, untuk lebar jembatan 7 m dan lebar 12 m, dan 28 m untuk jembatan lebar 18 m. Tinggi *pylon* untuk kesemua bentang yang digunakan adalah 90 m (lihat

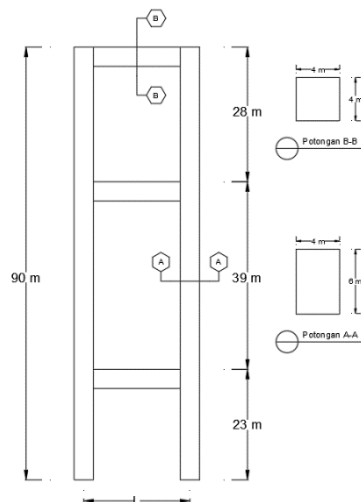
Gambar 6).



Gambar 4. Geometri jembatan *cable stayed* (*boundary condition*)



Gambar 5. Geometri dek jembatan 7 m (a), 12 m (b) dan 18 m (c)

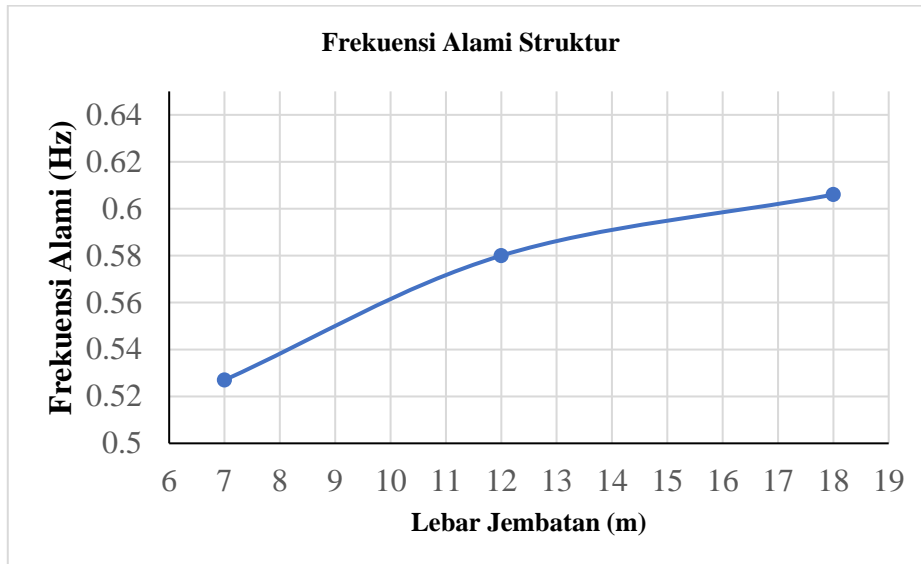


Gambar 6. Geometri pylon jembatan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Frekuensi Alami Struktur

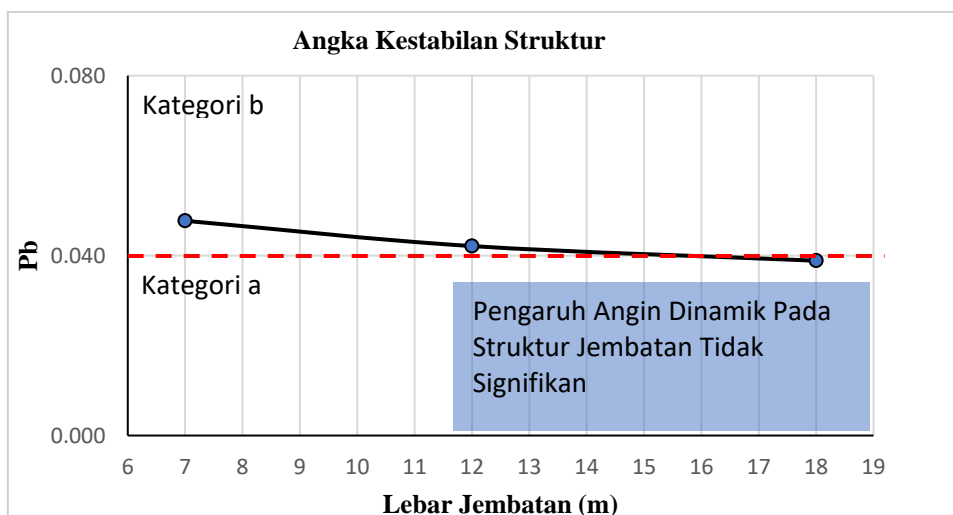
Nilai frekuensi alami pada struktur jembatan didapatkan dari hasil pemodelan menggunakan *software* Midas Civil 2019 didapatkan bahwa nilai frekuensi alami pada lebar dek jembatan 7 m adalah 0,29 Hz, 12 m adalah 0,42 Hz, dan 18 m dengan nilai 0,52 Hz (lihat Gambar 7). Dari nilai frekuensi alami struktur yang diperoleh diketahui bahwa semakin besar rasio lebar terhadap bentang jembatan maka semakin besar nilai frekuensi alami struktur.



Gambar 7. Frekuensi alami struktur jembatan

Stabilitas Aerodinamik

Berdasarkan rumus stabilitas aerodinamik dari pedoman perencanaan jembatan *cable stayed* didapatkan angka kestabilan aerodinamik untuk kecepatan angin rata-rata (V) 15 m/s untuk jembatan dengan lebar dek 7 m memiliki angka kestabilan aerodinamik (P_b) sebesar 0,048, dan 12 m mendapatkan angka kestabilan aerodinamik (P_b) sebesar 0,042 kedua dek jembatan masuk dalam kategori b yang mana menandakan bahwa diperlukan perhatian terhadap bentuk penampang jembatan sedangkan untuk jembatan dengan lebar dek 18 m memiliki nilai P_b sebesar 0,039 dan masuk kedalam kategori a yang artinya pengaruh beban angin dinamik pada struktur tidak terlalu berpengaruh terhadap dek jembatan.



Gambar 8. Angka kestabilan struktur jembatan *cable stayed*

Dari hasil stabilitas aerodinamik (lihat Gambar 8) diketahui bahwa semakin meningkatnya lebar jembatan angka kestabilan aerodinamik menunjukkan kondisi yang semakin baik atau pengaruh angin dinamik pada struktur jembatan tidak signifikan. Hal ini dapat terjadi karena nilai frekuensi bending yang meningkat dikarenakan dari persamaan 1 frekuensi bending menjadi faktor pembagi sehingga menghasilkan nilai p_b yang semakin rendah (kategori kestabilan aerodinamik meningkat).

KESIMPULAN

Dari hasil analisis yang dilakukan pada jembatan *cable stayed* dapat disimpulkan semakin besar rasio lebar dek terhadap bentang jembatan membuat frekuensi alami struktur semakin meningkat dengan nilai 0,29 Hz untuk lebar dek 7 m (3,18%), 0,42 Hz untuk lebar dek 12 m (5,46%), dan 0,52 Hz untuk lebar dek 18 m (8,18%). Kestabilan aerodinamik jembatan pada ketiga model dek jembatan yang paling balik adalah pada jembatan dengan lebar 18 m yang mana memiliki nilai P_b sebesar 0,039 dan masuk kedalam kategori a yang mana menandakan pengaruh dari beban angin dinamik pada struktur tidak terlalu signifikan berpengaruh hal ini dapat terjadi dikarenakan nilai frekuensi bending yang meningkat dan menjadi faktor pembagi sehingga menghasilkan nilai p_b yang semakin rendah (kategori kestabilan aerodinamik meningkat).

SARAN

Pengaruh aerodinamik pada struktur jembatan perlu dilakukan penelitian lebih lanjut guna mengetahui secara signifikan pengaruh angin dinamik pada struktur jembatan khususnya jembatan *cable stayed* dengan menggunakan pengujian *wind tunnel* dan memodelkan jembatan dengan program selain Midas Civil seperti ANSYS dan program analisis struktur lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-aziz, A., dan Walid, A.A, 2015, Aeroelastic Investigation of Different Deck Sections for Suspension Bridges by Numerical Analysis, *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, No.12, Vol 4, 49–57.
- Badan Standardisasi Nasional, 2005, *Standar Pembebanan Untuk Jembatan*, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional, 2016, *Standar Pembebanan Untuk Jembatan*, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional, 2016, *Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa*, Jakarta
- Hardono, S., 2011, Perilaku Aerodinamika Gelegar Dari Jembatan Beruji Kabel "Palibaja" Menggunakan Uji Statis Terowongan Angin dengan Model Section, *Jurnal Jalan-Jembatan*, Vol.28, No.2, hal 137-150.
- Hua, X. G., Z. Q., Chen, Y. Q. Ni., dan. M. Ko., 2007, Flutter Analysis of Long-Span Bridges Using ANSYS, *Wind and Structures, An International Journal*, No.10, Vol.10, 61–82.
- Kementerian Pekerjaan Umum, 2015, *Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel*, Jakarta.
- Ohorella, S., dan Harsoyo, 2017, Analisis Kestabilan Cable Stayed Bridge Akibat Pengaruh Rasio Lebar Terhadap Bentang Jembatan, *Jurnal Teknisia*, No.2, Vol.22, 359-371.
- Suangga, M., dan Andi, W, 2008, Analisis Flutter Jembatan Tacoma Narrows Lama. *Seminar dan Pameran Haki*, Agustus, Jakarta.
- Sukamta, Ireng, G., dan Fariduzzaman, 2017, Flutter Analysis of Cable Stayed Bridge, *Procedia Engineering*, Vol.171, 1173–1177.
- Supriyadi, B., dan Muntohar, A.S., 2007, *Jembatan*, Beta Offset, Yogyakarta.
- Supriyadi, B., Siswosukarto, S., Masagala, A.A., dan Hadjoh, I.E.S., 2017, The Effect of Deck Width Addition Toward Stability of Cable Stayed Bridge: Case Study of Siak Sri Indrapura Bridge, In *International Symposium on Civil and Environmental Engineering*, eds. M.J. Zainorizuan et al. Melaka.
- Svensson, H., 2012, *BMC Public Health Cable-Stayed Bridges*, Berlin.