

ANALISIS KESTABILAN *CABLE STAYED BRIDGE* AKIBAT PENGARUH RASIO LEBAR TERHADAP BENTANG JEMBATAN

Sumaiyah Ohorella¹, Harsoyo²

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta
email: sumaiyahohorella95@gmail.com

²Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta
email: harsoyo@uii.ac.id

ABSTRACT

Cable stayed is one of the long spans bridge structure that can minimize the use of pillars so that access under the bridge can be utilized optimally. The main structure of the cable stayed bridge is a cable connected from the bridge deck to the pylon. Problems in long spans bridge structure is wind can provide significant changes in the structure of the bridge. Based on previous experience and research, shows that the influence of wind can cause security and service problems. It can even cause instability in the entire bridge structure due to the flexible nature of its structure. This study aims to analyze the stability of the cable stayed bridge due to the influence of the span ratio to the width of the bridge. The width of the bridge is varied from 14 m to 24 m every 1 m addition modeled using the SAP2000 v.14 program. The object of research using Jembatan Merah Putih, Ambon. The structural response is observed as the natural vibration frequency, internal force and deformation of the structure. The larger the ratio of bridge width to the main span of the bridge, the greater the weight itself and the load of the service work on the bridge structure. So the values of the inner forces that are generated on the main structure include the tower and the bridge deck will be greater for each additional width of the bridge. For the bridge width ratio to bridge span of 0.093 to 0.133, the width of the bridge 14 m to 22 m remains stable against the aerodynamic effect due to wind according to Leondhart, $B \geq L / 30$ and still qualifies the maximum deflection according to AASHTO ($\delta_{max} = \frac{L_{total}}{800}$) and AISC ($\delta_{maks} = \frac{L}{150}$).

Keywords: *Cable Stayed, Pylon, Leondhart, Displacement*

PENDAHULUAN

Permasalahan pada struktur jembatan bentang panjang yaitu angin dapat memberikan perubahan yang cukup signifikan pada struktur jembatan tersebut. Berdasarkan pengalaman dan penelitian terdahulu, menunjukkan bahwa pengaruh angin dapat menyebabkan masalah keamanan dan pelayanan. Hal tersebut bahkan dapat menyebabkan ketidakstabilan pada seluruh struktur jembatan karena sifat fleksibel dari strukturnya.

Efek yang timbul akibat aliran angin tersebut diketahui sebagai *flutter* yang telah menyebabkan runtuhnya *Tacamo Narrow Bridge* di Amerika pada tahun 1940. Akibatnya, maka timbul gaya yang bekerja pada gelagar dan bersifat periodik. Jembatan

tersebut runtuh akibat angin dengan kecepatan 42 mph (18,8 m/s) sehingga struktur jembatan bergetar sampai akhirnya jembatan tersebut runtuh (Made Suangga & Andi Wiryana, 2008). Fenomena ini diklasifikasikan sebagai fenomena aerodinamik pada jembatan bentang panjang. Perencanaan jembatan bentang panjang mensyaratkan kestabilan terhadap *flutter* sebagai salah satu aspek penting dalam perencanaan.

Oleh karena itu, masih harus dikembangkan penelitian mengenai rasio antara panjang bentang jembatan terhadap lebarnya sehingga jembatan *cable stayed* menjadi stabil terhadap pengaruh akibat beban angin. Pada penelitian ini memvariasikan lebar jembatan yaitu mulai dari lebar jembatan 14 m sampai 24 m dan menggunakan Jembatan

Merah Putih sebagai objek penelitian dengan panjang bentang tengah 300 m yang merupakan tipe jembatan *cable stayed*.

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Berapakah besar deformasi yang terjadi pada struktur jembatan *cable stayed* pada arah memanjang jembatan pada sumbu X (U_1), arah melintang jembatan pada sumbu Y (U_2) dan arah gravitasi jembatan sumbu Z (U_3) pada setiap kombinasi beban terhadap variasi lebar jembatan?
2. Berapakah lebar jembatan yang masih tetap stabil terhadap pengaruh aerodinamik akibat beban angin serta masih memenuhi syarat lendutan maksimum AASHTO dan AISC?

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui nilai deformasi yang terjadi pada struktur jembatan *cable stayed* baik pada arah memanjang jembatan pada sumbu X (U_1), arah melintang jembatan pada sumbu Y (U_2) dan arah gravitasi jembatan sumbu Z (U_3)
2. Menentukan dan mengetahui rasio antara bentang dan variasi lebar jembatan yang masih stabil terhadap pengaruh akibat beban angin serta memenuhi syarat lendutan maksimum AASTHO dan AISC.

TINJAUAN PUSTAKA

Tabel 1 berikut merupakan beberapa penelitian sejenis sebagai pertimbangan yang sudah dilakukan untuk menghindari plagiasi sekaligus menggambarkan mengenai perbedaan dengan penelitian yang dilakukan pada Tugas Akhir ini.

LANDASAN TEORI

Komponen Jembatan *Cable Stayed*

Pada umumnya komponen utama jembatan *cable stayed* terdiri atas gelagar, kabel, dan menara atau *pylon* yang dapat dilihat pada Gambar 1. Masing - masing bagian mempunyai berbagai tipe dan bentuk yang bermacam-macam yang digunakan sesuai

fungsinya. Setiap komponen jembatan *cable stayed* saling berhubungan dengan kabel yang memikul beban dari gelagar jalan raya beserta lalu lintasnya kemudian beban tersebut ditransfer ke menara dan dilimpahkan ke pondasi jembatan. Di bawah ini akan dijelaskan beberapa tipe dan bentuk dari komponen utama jembatan *cable stayed*.

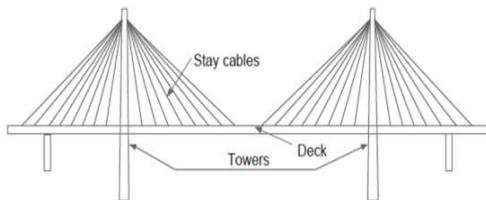
Tabel 1 Perbedaan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Sekarang

Nama	Hasil	Perbedaan dengan Penelitian sekarang
Rizal. M, 2005	Jembatan <i>cable stayed</i> Siak Sri Indrapura yang dianalisis diperoleh lendutan menara (<i>pylon</i>) jembatan masing-masing arah U_1 , u_2 dan u_3 sebesar 0,44 m, 0,24 m dan 0,014 m serta frekuensi getaran minimal dan maksimal masing-masing 0,538 Hz dan 2,73 Hz.	Jembatan <i>cable stayed</i> yang akan dijadikan objek penelitian mengenai kestabilan <i>cable stayed</i> akibat pengaruh rasio bentang terhadap lebar jembatan adalah Jembatan Merah Putih Ambon dengan tipe kabel <i>harp</i> .
Rollies. F, 2007	Perencanaan jembatan <i>cable stayed</i> dengan bentang total 512 m serta memiliki bentuk <i>pylon</i> A diperoleh kombinasi beban yang paling dominan pada <i>deck</i> jembatan yang berupa <i>box girder</i> adalah kombinasi beban mati dan beban hidup (<i>moving load</i>) dan pada <i>pylon</i> adalah kombinasi beban mati dan beban gempa.	Jembatan Merah Putih memiliki panjang bentang total 300 m dengan <i>pylon</i> berbentuk H serta digunakan gelagar baja struktur ASTM 709M grade 345.
Masagala, Algazt Aryad, 2015	Analisis kestabilan <i>cable stayed</i> dengan gelagar <i>box girder</i> serta memvariasikan lebar jembatan antara 7 m sampai 22 m diperoleh deformasi terbesar akibat beban angin pada arah sumbu Y (u_2) adalah pada variasi dengan lebar jembatan 7 m.	Variasi lebar jembatan dengan gelagar baja struktur ASTM 709 M grade 345 pada jembatan merah putih yaitu 14 m sampai 24 m.

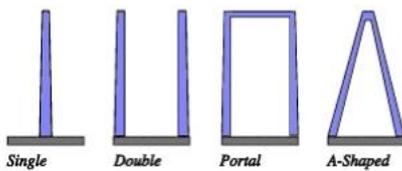
Menara atau *Pylon*

Pylon akan menerima gaya dari gelagar yang disalurkan melalui kabel. Pemilihan bentuk menara sangat dipengaruhi oleh kofigurasi kabel, estetika, dan kebutuhan

perencanaan serta pertimbangan biaya. Bentuk-bentuk menara dapat berupa rangka portal trapezoidal, menara kembar, menara A, atau menara tunggal dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 1 Komponen utama jembatan *cable-stayed* (Xu, 2013)



Gambar 2 Tipe Menara/Pylon (Zarkasi dan Roliansjah, 1995)

Gelagar

Gelagar yang tersusun dari *solid web* yang terbuat dari baja atau beton cenderung terbagi atas dua tipe yang dapat dilihat pada Gambar 3 yaitu:

1. Gelagar pelat (*plate girder*) dapat terdiri atas dua atau banyak gelagar.
2. Gelagar box (*box girder*) dapat terdiri atas satu atau susunan *box* yang dapat berbentuk persegi panjang dan trapesium.

Untuk bentang yang lebih panjang, pemakaian beton pada gelagar jembatan akan menyebabkan pertambahan berat sendiri yang pada akhirnya akan mempengaruhi dimensi elemen jembatan seperti kabel, *pylon* dan pondasi. Dengan pertimbangan tersebut, pada bentang yang lebih dari 350 meter umumnya digunakan gelagar jembatan baja diantaranya dapat digunakan material komposit baja dan beton. Kelebihan lain dari struktur komposit tersebut adalah kemudahan dalam hal pelaksanaan pekerjaan.

	Susunan	Tipikal potongan melintang
Tipe gelagar utama	Gelagar I Kembar	
	Gelagar box persegi	
	Kombinasi gelagar box (tengah) – gelagar I individual (tepi)	
	Kombinasi gelagar box seluler kembar individual dan sloping struts	
	Gelagar box trapezoidal individual	
	Gelagar box persegi kembar	

Gambar 3 Gelagar *solid web* (Sumber: Troitsky, dalam Supriyadi dan Muntohar, 2007)

Pengaruh Beban Dinamik

Efek yang timbul akibat aliran angin tersebut dikenal sebagai *flutter* yang telah menyebabkan runtuhnya *Tacoma Narrow Bridge* di Amerika Tahun 1940. Akibat adanya *flutter* maka timbul gaya yang bekerja pada gelagar dan bersifat periodik. Analisis beban angin dapat dilakukan sederhana dengan menjabarkan gaya-gaya yang bekerja pada struktur jembatan berupa:

1. Komponen gaya horizontal (T)
2. Komponen gaya vertikal (N)
3. Momen torsi (M)

Yang besarnya tergantung pada faktor:

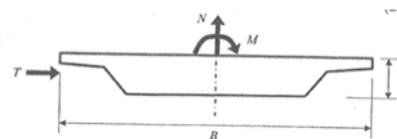
- a. Intensitas angin (q)
- b. Bentuk penampang struktur lantai jembatan (C_T , C_N , dan C_M)
- c. Sudut singgung angin terhadap lantai jembatan.

Beban yang bekerja pada dek jembatan akan seperti pada Gambar 4, penentuan besarnya nilai koefisien C_T , C_N , dan C_M dilakukan dengan mengadakan pengujian terhadap beberapa tampang dengan menggunakan *wind tunnel*. Sehingga besar beban pada struktur menjadi.

$$T = C_T qhl$$

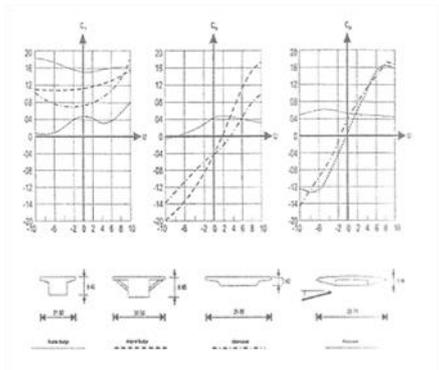
$$N = C_N qhl$$

$$M = C_M qhl$$



Gambar 4 Pendekatan Aksi Beban Angin pada *Deck* Jembatan (Walther, 1988)

Hasil pengujian pada empat jembatan dapat dilihat pada Gambar 5 di bawah ini dengan kurva untuk setiap koefisien telah digambarkan sebagai fungsi sudut singgung angin terhadap lantai jembatan (Walther, 1988).



Gambar 5 Koefisien bentuk C_T , C_N , dan C_M (Walther, 1988)

ANALISIS GEMPA DINAMIK

Berdasarkan Standar Ketahanan Gempa untuk Jembatan, SNI 2833-2008 analisis dinamik perlu dilakukan untuk tipe jembatan dengan perilaku rumit sebagai berikut.

1. Bentang utama melebihi 200 meter
2. Jembatan fleksibel dengan periode panjang melebihi 1,5 detik
3. Jembatan dengan pilar tinggi melebihi 30 meter
4. Jembatan pelengkung dengan lantai di atas, struktur *cable stayed*, dan jembatan gantung, jembatan yang menggunakan isolasi dasar. Berikut adalah prosedur analisis tahan gempa pada Gambar 6 berikut.



Gambar 6 Prosedur Analisis Gempa Untuk Jembatan (Sumber: SNI 2833-2008)

Untuk analisis riwayat waktu diperlukan data gempa besar tipikal yang umumnya terjadi di luar lokasi jembatan. Gerakan

gempa masukan berupa gelombang akselerasi dengan amplitudo yang dimodifikasi berdasarkan wilayah frekuensi (*frequency zone*) sehingga sesuai akselerasi standar respon spektra. Gempa tipikal harus dipilih berdasarkan kondisi tanah dan topografi yang serupa dengan lokasi jembatan, sehingga dapat dilakukan (SNI 2833-2008, Pasal 4.3.2).

KEKAKUAN GELAGAR

Semakin langsing jembatan bentang panjang, maka stabilitas terhadap beban angin semakin kecil. Adanya beban angin tersebut akan mengakibatkan terjadinya getaran pada lantai jembatan yang mempengaruhi kenyamanan pengguna jembatan tersebut.

Hasil survey yang dilakukan terhadap 20 jembatan *cable stayed* di dunia memberikan perbandingan antara tinggi gelagar dengan bentang jembatan yang bervariasi mulai dari $\frac{1}{40}$ sampai $\frac{1}{100}$ (Podolny,1976). Sedangkan menurut Leonhardt, perbandingan antara tinggi gelagar dengan bentang utama jembatan sangat bergantung pada rasio lendutan maksimum akibat beban hidup dan beban mati dan memberikan nilai yang ekonomis bilai nilainya berkisar antara $\frac{1}{10}$ sampai $\frac{1}{90}$. Khusus untuk jembatan *cable satyed* beton dengan sistem kabel dan bidang pada kedua ujung tidak menunjukkan gejala aerodinamis yang mengkhawatirkan bila memenuhi persyaratan:

$$B \geq 10H \text{ atau } B \geq \frac{L}{30}$$

Dimana:

- B = lebar jembatan
- H = tinggi gelagar jembatan
- L = panjang bentang utama

Untuk jembatan baja yang relatif ringan dan bentang di atas 400 m sehingga cenderung mudah bergetar, persyaratan diatas masih berlaku namun sebaiknya digantung ke menara berbentuk A dan harus mempunyai $B \geq \frac{L}{25}$.

PEMBEBANAN

≥ 30 m

Aksi Tetap (Permanent Actions)

Dalam penelitian ini aksi tetap terdiri atas berat sendiri struktur dan beban mati tambahan.

1. Berat Sendiri (MS)

Berat sendiri adalah berat bahan dan bagian jembatan yang merupakan elemen struktur, ditambah dengan elemen non struktur yang dianggap tetap. Berat sendiri dihitung berdasarkan berat isi dan kerapatan massa (*unit weights and mass densities*) seperti Tabel 2 berikut.

Tabel 2 Berat Isi untuk Beban Mati

No.	Bahan	Berat Satuan isi (kN/m ²)	Kerapatan Massa (Kg/m ³)
1	Lapisan permukaan aspal	22,0	2240
2	Kerikil dipadatkan	18,8-22,7	1920-2320
3	Aspal beton	22,0	2240
4	Beton ringan	12,25-19,6	1250-2000
5	Beton bertulang	23,5-25,5	2400-2600
6	Baja	77,0	7850
7	Air murni	9,8	1000

(Sumber: RSNI T-02-2005)

2. Beban Mati Tambahan (MA)

Beban mati tambahan salah satunya dapat berupa lapisan kembali permukaan aspal (*overlay*) dengan γ_{aspal} adalah 25 kN/m³.

Aksi Sementara (Transient Action)

1. Beban Lalu Lintas

Beban lalu lintas untuk perencanaan jembatan terdiri atas beban lajur "D" dan beban truk "T".

a. Beban lajur "D"

Beban lajur "D" terdiri dari beban terbagi rata (BTR) dan beban garis (BGT). Beban terbagi rata mempunyai intensitas q kPa yang besarnya tergantung pada panjang total L yang dibebani dan dinyatakan dengan rumus sebagai berikut:

$$q = 9,0 \text{ kPa untuk } L \leq 30 \text{ m}$$

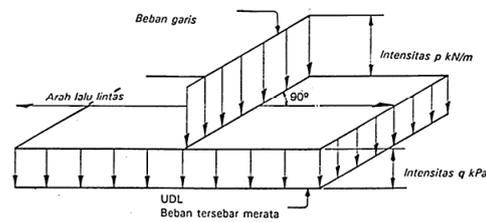
$$q = 9,0 \cdot \left(0,5 + \frac{15}{L}\right) \text{ kPa untuk } L$$

Dimana,

q = intensitas beban terbagi rata (BTR) dalam arah memanjang jembatan

L = panjang total jembatan yang dibebani (meter) (RSNI-T-02-2005, Pasal 6.3.1 (2)).

Sedangkan beban garis (BGT) ditempatkan dalam kedudukan sembarang sepanjang jembatan dan tegak lurus pada arah lalu lintas dan mempunyai intensitas p adalah 49,0 kN/m (RSNIT-02-2005, Pasal 6.3). Sehingga penyebaran beban lajur "D" dapat dilihat pada Gambar 7 berikut.

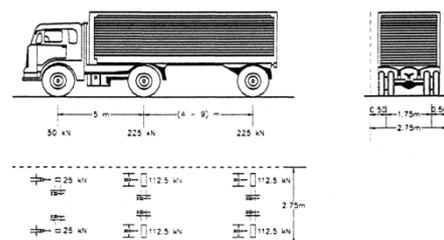


Gambar 7 Beban Lajur "D"

(Sumber : RSNI-T-02-2005)

b. Beban lajur "T"

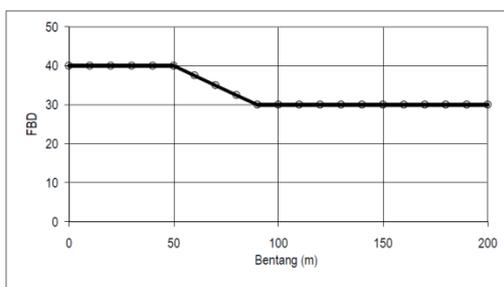
Pembebanan truk "T" terdiri dari kendaraan truk semi trailer yang mempunyai susunan dan berat as seperti pada Gambar 8 berat dari masing-masing as disebarkan menjadi 3 beban rata sama besar yang merupakan bidang kontak antara roda dengan permukaan jalan.



Gambar 8 Pembebanan Truk "T"

(Sumber : RSNI-T-02-2005)

- c. Faktor beban dinamis
 Faktor beban dinamis (FBD) merupakan hasil interaksi antara kendaraan yang bergerak dengan jembatan. Faktor beban dinamis berlaku untuk pembebanan “D” dan pembebanan truk “T” untuk simulasi kejut dari kendaraan bergerak pada struktur jembatan. Beban garis FBD dapat dilihat pada Gambar 9 berikut.



Gambar 9 Faktor Beban Dinamis (FBD)
 (Sumber: RSNI-T-02-2005)

Faktor beban dinamis (*dynamic load allowance*) untuk BGT diambil sebagai berikut:

$$DLA = 0,4 \text{ untuk } L_E \leq 50 \text{ m}$$

$$DLA = 0,4 - 0,0025 (L-50) \text{ untuk } 50 < L_E < 90 \text{ m}$$

$$DLA = 0,3 \text{ untuk } L_E \geq 90 \text{ m}$$

Untuk bentang sederhana/ekivalen:

$$L_E = \sqrt{L_{rata-rata} * L_{maks}}$$

Keterangan:

$L_{rata-rata}$ = panjang bentang rata-rata dari bentang-bentang menerus

L_{maks} = panjang bentang maksimum dari bentang-bentang menerus

- d. Gaya rem (T_{Tb})
 Pengaruh pengereman dari lalu lintas diperhitungkan sebagai gaya dalam arah memanjang, dan dianggap bekerja pada permukaan lantai jembatan.

$$T_{Tb} = 250 \text{ kN untuk } L_T \leq 80 \text{ m}$$

$$T_{Tb} = 250 + 2,5 (L_T - 80) \text{ kN untuk } 80 < L_T < 180 \text{ m}$$

$$T_{Tb} = 500 \text{ kN untuk } L_T \geq 180 \text{ m}$$

- e. Beban angin
 Gaya nominal ultimit dan daya layan jembatan akibat beban angin tergantung kecepatan angin rencana seperti berikut:

$$T_{EW} = 0,0006 \cdot C_w \cdot (V_w)^2 \cdot A_b \text{ (kN)}$$

Dimana:

C_w = koefisien seret

V_w = kecepatan angin rencana (m/s)

A_b = luas bidang samping jembatan (m^2)

Koefisien seret (C_w) dan kecepatan angin rencana (V_w) harus diambil berdasarkan Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3 Nilai Koefisien Seret (C_w)

Tipe Jembatan	C_w
Bangunan atas masif ; (1), (2)	
b/d = 1	2,1
Tipe Jembatan	C_w
b/d = 2,0	1,5
b/d \geq 6,0	1,25
Bangunan atas rangka	1,2
Catatan (1) :	
b = lebar keseluruhan jembatan dihitung dari sisi luar sandaran	
d = tinggi bangunan atas, termasuk tinggi bagian sandaran yang masif	
Catatan (2)	
Untuk harga antara dari b/d bisa diinterpolasi	

Beban garis merata tambahan arah horisontal pada permukaan lantai jembatan akibat angin yang meniup kendaraan di atas jembatan dihitung dengan rumus:

$$T_{EW} = 0,0012 \cdot C_w \cdot (V_w)^2 \text{ (kN/m)}$$

Dimana:

C_w = koefisien seret

V_w = kecepatan angin rencana (m/s)

Tabel 4 Nilai Kecepatan Angin Rencana (C_w)

Keadan Batas	Lokasi	
	Sampai 5 km dari pantai	> 5 Km dari pantai
Daya layan	30 m/s	25 m/s
Ultimit	35 m/s	30 m/s

KOMBINASI PEMBEBANAN

Aksi rencana ditentukan dari aksi nominal yaitu mengalikan aksi nominal dengan faktor beban yang memadai. Sehingga kombinasi pembebanan yang digunakan pada analisis ini yaitu sebagai berikut:

$$\text{Kombinasi I} = 1,3 MS + 2MA + 1,8D + 1,8 TB + 1,2EW$$

$$\text{Kombinasi II} = 1,3 MS + 2MA + 1,8D + 1,8 TB$$

$$\text{Kombinasi III} = 1,3 MS + 2MA + 1,8D + 1,2EW$$

$$\text{Kombinasi IV} = 1,3 MS + 2MA + 1,8D + EQ_X + 0,3EQ_Y$$

$$\text{Kombinasi V} = 1,3 MS + 2MA + 1,8D + 0,3 EQ_X + EQ_Y$$

$$\text{Kombinasi VI} = 1,3 MS + 2MA + 1,2EW$$

Keterangan:

MS = Berat sendiri

MA = Beban mati tambahan

D = Beban lajur D

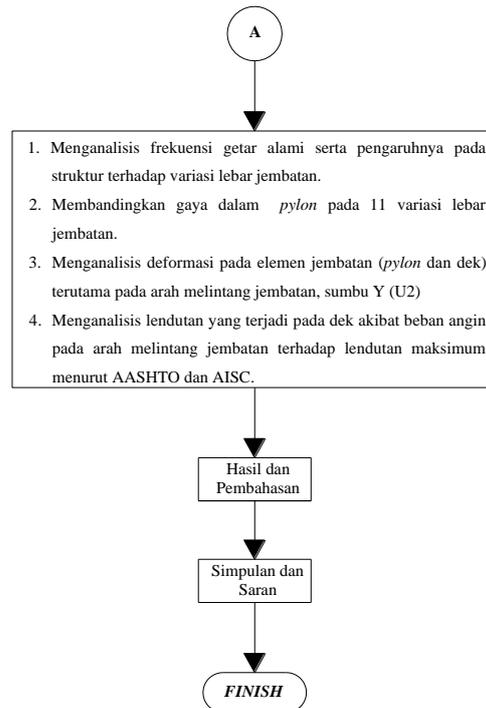
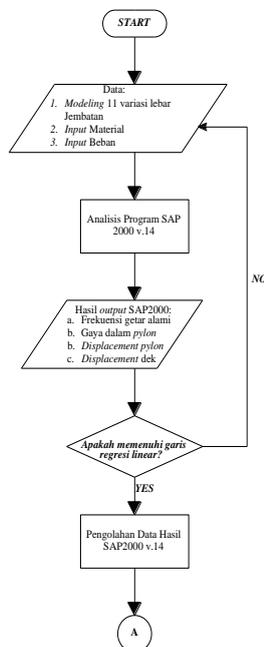
TB = Gaya rem

EW = Beban angin

EQ_X = Beban gempa arah X

EQ_Y = Beban gempa arah Y

METODOLOGI PENELITIAN



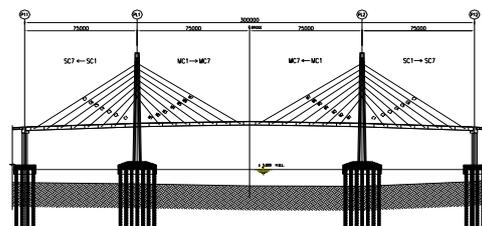
Gambar 10 Flow Chart Tugas Akhir

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Teknis Jembatan

Berikut akan dilakukan analisis dengan lebar jembatan 20 m dengan data yang diketahui untuk perhitungan adalah sebagai berikut:

1. Panjang bentang jembatan (L): 300 m
2. Panjang *main span* : 150 m
3. Panjang *side span* : 75 m
4. Tebal slab lantai jembatan (ts): 0,25 m
5. Tebal lapisan aspal+overlay (ta): 0,7 m
6. Lebar 1 jalur lalu lintas (b1): 8,6 m
7. Lebar median : 0,5 m
8. Lebar total jembatan : 20 m
9. Tinggi *pylon* : 83,5 m
10. Jumlah lajur : 2 jalur – 4 lajur



Gambar 11 Konfigurasi Jembatan Merah Putih

PEMBEBANAN STRUKTUR

Pedoman pembebanan rencana yang digunakan mengacu kepada standar pembebanan untuk jembatan (RSNI-T-02-2005). Secara umum beban rencana tersebut adalah sebagai berikut.

Aksi Tetap

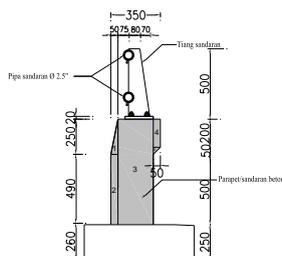
Aksi tetap terdiri dari berat sendiri (*MS*) dan beban mati tambahan (*MA*).

1. Berat sendiri (*MS*)

Parapet jembatan dipasang sepanjang jembatan dengan jarak antara tiang sandaran sebesar 2 m. Jarak antara tiang dipisahkan menggunakan pipa railing dengan diameter luar sebesar 2,5" (± 63 mm).

a. Parapet (dinding sandaran beton)

Dimensi parapet (dinding sandaran beton) dibagi menjadi 5 bagian dalam perhitungan ini dengan ketentuan berat jenis beton (*W_C*) sebesar 24 kN/m³. Pembagian dimensi parapet yang dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12 Pembagian Dimensi Parapet

Berdasarkan dimensi yang ada, maka perhitungan berat sendiri parapet (sandaran beton) dan pipa railing dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5 Perhitungan Berat Sendiri Parapet dan Pipa Railing

No.	b (m)	h (m)	Berat Volume (kN/m ³)	Berat (kN/m)
1	0,05	2,50	24	0,150
2	0,05	0,490	24	0,588
3	0,25	0,769	24	4,164
4	0,05	0,20	24	0,240
5	0,05	0,05	24	0,030
2 Pipa railing galvanis 2,5" BJ (kN/m) = 1,25				2,500
Total				8,122

b. Tiang sandaran

Berdasarkan Gambar 12 di atas, tiang sandaran pada jembatan berbentuk trapesium dengan memiliki panjang sisi sejajar berturut-turut sebesar 0,08 m dan 0,15 m serta tingginya sebesar 0,48 m. Apabila perhitungan berdasarkan dimensi yang ada, maka perhitungan berat sendiri tiang sandaran adalah sebagai berikut.

$$MS_{\text{Tiang Sandaran}} = \frac{0,08 + 0,15}{2} \times 0,48 \times 78,5 = 0,0552 \text{ kN/m}$$

c. Median

Pada penelitian ini, tebal median jembatan sebesar 0,3 m dengan memiliki berat jenis beton (*W_C*) sebesar 24 kN/m³ sehingga perhitungan berat sendiri median adalah sebagai berikut.

$$MS_{\text{Median}} = \text{tebal} \times W_C = 0,3 \times 24 = 7,2 \text{ kN/m}^2$$

2. Beban Mati Tambahan (*MA*)

Beban ini merupakan elemen non struktur dan besarnya berubah selama umur jembatan, antara lain beban aspal+overlay serta beban genangan air hujan.

$$\begin{aligned} \text{Lapisan aspal + overlay} &= 0,07 \times 22 \text{ kN/m}^3 = 1,54 \text{ kN/m}^2 \\ \text{Genangan air hujan} &= 0,05 \times 9,8 \text{ kN/m}^3 = 0,49 \text{ N/m}^2 \\ \text{Total } Q_{MA} &= 2,03 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Beban Lalu Lintas

1. Beban Lajur (*D*)

Faktor beban ultimit untuk beban lajur = 2, dan BGT mempunyai intensitas (*p*) = 49 kN/m. Faktor beban dinamis (*dynamic load allowance*) untuk BGT sebagai berikut:

$$\begin{aligned} DLA &= 0,4 \text{ (untuk } L_E \leq 30 \text{ m)} \\ DLA &= 0,4 - (0,0025 \times (L-50)) \text{ (untuk } 50 < L_E < 90 \text{ m)} \\ DLA &= 0,3 \text{ (untuk } L_E \geq 90 \text{ m)} \end{aligned}$$

Lebar 1 jalur lalu lintas (*b*₁) = 8,6 m

Panjang jembatan

$$L1 = 75 \text{ m (side span)}$$

$$L2 = 150 \text{ m (main span)}$$

Panjang bentang rata-rata

$$L_{av} = \frac{L1 + L2}{2} = \frac{75 + 150}{2} = 112,5 \text{ m}$$

Panjang bentang maksimum = 300 m

Panjang bentang ekuivalen (L_E)

$$\begin{aligned} L_E &= \sqrt{L_{av} \times L_{max}} \\ &= \sqrt{112,5 \times 300} \\ &= 129,9 \text{ m} \end{aligned}$$

Besarnya intensitas

$$\begin{aligned} Q &= 9 \times \left(0,5 + \frac{15}{L_E} \right) \\ &= 9 \times \left(0,5 + \frac{15}{129,9} \right) \\ &= 5,54 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Beban terbagi rata (*BTR*) pada lantai jembatan adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} BTR &= \{ [5,5 \cdot q \cdot 100\%] + [(b1 - 5,5) \cdot q \cdot 50\%] \} / b1 \\ &= \{ [5,5 \cdot 5,54 \cdot 100\%] + [(8,6 - 5,5) \cdot q \cdot 50\%] \} / 8,6 \\ &= 4,54 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Beban garis (*BGT*) dengan intensitas p kN/m harus ditempatkan tegak lurus terhadap arah lalu lintas pada jembatan. Besarnya intensitas p adalah 49,0 kN/m. Sehingga distribusi beban garis pada lantai jembatan adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} BGT &= \{ [5,5 \cdot p \cdot 100\%] + [(b1 - 5,5) \cdot p \cdot 50\%] \} / b1 \\ &= \{ [5,5 \cdot 49 \cdot 100\%] + [(8,6 - 5,5) \cdot 49 \cdot 50\%] \} / 8,6 \\ &= 40,17 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

1. Gaya rem (*TB*)

Untuk panjang bentang (L_T) = 300 m, besar gaya rem sebesar, $T_{Tb} = 500$ kN. Sehingga beban rem bekerja untuk dua lajur lalu lintas $T_{Tb} = 2 \times 500 = 1000$ kN.

Gaya rem tersebut didistribusikan pada *joint* pertemuan gelagar lantai jembatan dengan jumlah *joint* pada jembatan, $n = 100$, maka

besarnya gaya rem per *joint* adalah sebagai berikut.

$$T_{Tb} = \frac{T_{TB}}{\Sigma Joint} = \frac{1000}{100} = 10 \text{ kN}$$

Beban Angin (E_w)

Beban angin tergantung pada kecepatan angin rencana yang dihitung dengan persamaan berdasarkan Tabel 27 RSNI-T-02-2005 dengan ketentuan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} T_{EW} &= 0,0006 \times C_w \times V_w^2 \times A_b \\ b &= 20 \text{ m} \\ d &= 3,8 \text{ m} \\ \frac{b}{d} &= 5,16 \end{aligned}$$

Dengan menggunakan interpolasi dari Tabel 3, diperoleh nilai $C_w = 1,911$ maka,

$$\begin{aligned} C_w &= \text{Koefisien seret sebesar } 1,911 \\ V_w &= \text{kecepatan angin rencana} \\ &= 35 \text{ m/s (Tabel 28 RSNI-T-02-2005)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{segmen} &= \text{panjang segmen jembatan} \\ &= 9 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{gelagar} &= \text{tinggi bidang samping jembatan} \\ &= 2,38 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_b &= \text{luas bidang samping jembatan} \\ &= L_{segmen} \times h_{gelagar} = 21,42 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Beban angin didistribusikan pada *joint* pertemuan kabel dan gelagar.

$$\begin{aligned} T_{EW} \text{ pada gelagar} &= 0,0006 \times C_w \times V_w^2 \times A_b \\ &= 0,0006 \times 1,911 \times 35^2 \times 21,42 \\ &= 30,09 \text{ kN} \end{aligned}$$

Pylon lebar arah memanjang (b_{pylon}) sebesar 3,75 m dan beban angin pada *pylon* didistribusikan secara merata sehingga diperoleh beban angin pada *pylon* sebagai berikut.

$$\begin{aligned} T_{EW} \text{ pada } pylon &= 0,0006 \times C_w \times V_w^2 \times b_{pylon} \\ &= 0,0006 \times 1,62 \times 35^2 \times 3,75 \\ &= 5,27 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Beban Gempa (*EQ*) dengan Metode Analisis Dinamik *Time History*

Rekaman gerakan tanah akibat gempa diambil dari akseleogram gempa *El-Centro N-S* yang direkam pada tanggal 19 Mei 1940. Dalam analisis ini redaman struktur

yang harus diperhitungkan dapat dianggap 5% dari redaman kritisnya. Normalisasi untuk gempa yang digunakan dapat dilihat pada perhitungan berikut.

$$\text{Normalisasi gempa} = \frac{\text{PGA wilayah Ambon}}{\text{PGA El-Centro}}$$

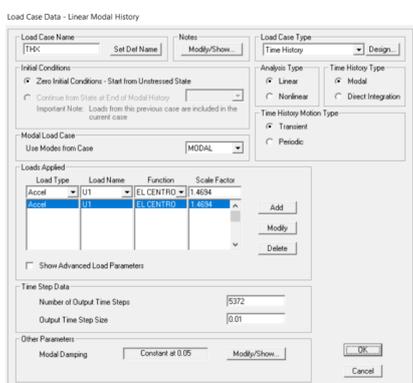
Dengan:

PGA El- = PGA (*Peak Ground Acceleration*) El-Centro
 PGA Wilayah = PGA (*Peak Ground Acceleration*) wilayah Ambon (pada Lampiran 1)

Maka, diperoleh normalisasi gempa sebagai berikut.

$$\text{Normalisasi gempa} = \frac{0,4}{0,27} = 1,46935$$

Berdasarkan perhitungan normalisasi gempa di atas, maka input normalisasi gempa/faktor skala pada *load case data* program SAP2000 dapat dilihat Gambar 13 berikut.

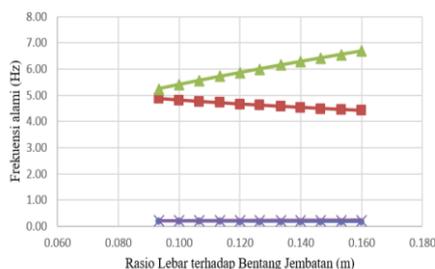


Gambar 13 Input Normalisasi Gempa/Skala Faktor

Untuk memasukkan beban gempa *Time History* ke dalam SAP2000, maka harus didefinisikan terlebih dahulu ke dalam *time history case*. Mengingat akseleogram tersebut terjadi selama 53,72 detik, maka dengan interval waktu 0,01 detik jumlah output stepnya menjadi, $\frac{53,72}{0,01} = 5372$.

Frekuensi Getar Alami Struktur

Berdasarkan hasil analisis SAP2000, frekuensi getar alami struktur semakin kecil setiap rasio lebar jembatan terhadap bentang utama bertambah sedangkan periode getarnya semakin besar dapat dilihat pada Gambar 14 berikut.



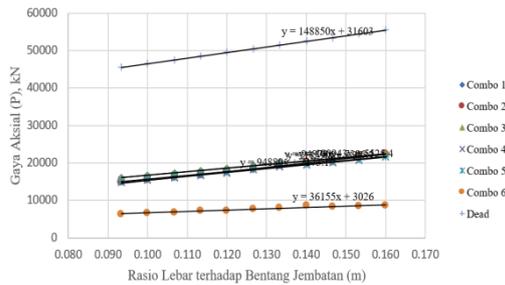
Gambar 14 Grafik Hubungan Frekuensi Alami Struktur dan Periode terhadap Variasi Rasio Lebar terhadap Bentang jembatan

Menurut teori getaran benda, frekuensi sudut (ω), periode getar (T) dan frekuensi natural (f) ditentukan melalui $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ (rad/sec), $T = \frac{2\pi}{\omega}$ (sec), dan $\phi = \frac{1}{T}$ (cps, Hertz). Berdasarkan persamaan tersebut, struktur kaku dengan kekakuan (k) besar maka frekuensi sudut (ω) semakin besar juga. Apabila periode getar struktur (T) kecil dan frekuensi natural (f) semakin besar maka struktur merupakan struktur yang kaku yang bergetar dengan frekuensi tinggi dan sebaliknya (Widodo, 2001).

Berdasarkan grafik di atas, dengan demikian struktur yang kaku akan mempunyai periode getar T kecil dan akan bergetar dengan frekuensi tinggi, dan sebaliknya (Widodo, 2001).

Gaya Dalam Pylon (menara)

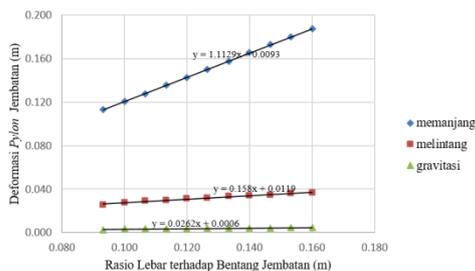
Bentuk menara seperti rangka portal sehingga mampu menahan gaya aksial (P), gaya geser (V), torsi (T), dan momen (M). Berdasarkan hasil analisis, semakin besar dimensi dan lebar jembatan yang digunakan maka nilai gaya-gaya dalam pada menara semakin besar pula, hal ini disebabkan oleh semakin besarnya beban yang disalurkan dan ditumpu oleh menara yang kemudian diteruskan ke pondasi dibawah pangkal menara. Gambar 15 berikut ini merupakan Grafik Hubungan antara Gaya Aksial *pylon* pada setiap variasi lebar jembatan dengan 7 kombinasi.



Gambar 15 Grafik Hubungan antara Gaya Aksial *pylon* pada setiap variasi lebar jembatan dengan 7 kombinasi

Deformasi *Pylon*/Menara

Deformasi *pylon*/menara terjadi pada ketiga arah sumbunya, yaitu sumbu X (U_1) arah memanjang jembatan, sumbu Y (U_2) arah melintang jembatan dan sumbu Z (U_3) arah gravitasi jembatan. Semakin besar rasio lebar terhadap bentang utama jembatan maka semakin besar pula deformasi arah X yang dihasilkan. Gambar 16 berikut ini merupakan salah satu Grafik Hubungan antara Gaya Aksial *pylon* pada setiap variasi rasio lebar jembatan terhadap bentang utama dengan 7 kombinasi.



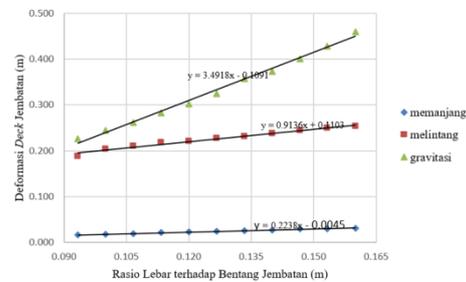
Gambar 16 Grafik Hubungan rasio lebar jembatan terhadap bentang utama jembatan dengan Deformasi *Pylon* pada Kombinasi 1

Deformasi *pylon* cenderung lebih besar pada sumbu arah memanjang jembatan atau sumbu X (U_1) baik pada kombinasi 1 maupun pada kombinasi beban lainnya. Hal ini disebabkan oleh posisi kabel yang menopang beban gelagar berada pada arah memanjang jembatan.

Deformasi *Deck* Jembatan

Deck jembatan merupakan bagian struktur yang pertama kali menerima beban

kombinasi mulai dari beban mati tambahan, beban hidup, beban angin, maupun *moving load* kendaraan yang melintas di atasnya. Gambar 17 berikut ini merupakan salah satu Grafik Hubungan antara Gaya Aksial *pylon* pada setiap variasi lebar jembatan dengan 7 kombinasi.



Gambar 17 Grafik Hubungan Lebar Jembatan dengan Deformasi *Deck* Jembatan pada Kombinasi 1

KESIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan pada jembatan *cable stayed* dengan gelagar baja serta menggunakan dengan 11 variasi lebar jembatan dengan rasio lebar terhadap bentang utama jembatan diperoleh hasil sebagai berikut:

1. Deformasi maksimum dari semua kombinasi yang bekerja pada dek jembatan untuk arah memanjang jembatan pada sumbu X (U_1), arah melintang jembatan pada sumbu Y (U_2), dan arah gravitasi jembatan pada sumbu Z (U_3) yaitu pada kombinasi 1 berturut-turut sebesar 0,015779 m, 0,258257 m, dan 0,113491 m.
2. Sedangkan untuk deformasi menara arah sumbu X (U_1) akan semakin besar pada setiap penambahan lebar jembatan dengan rasio deformasi menara arah sumbu X pada lebar jembatan 14 m dan 24 m. Deformasi menara arah sumbu Y (U_2) dan sumbu Z (U_3) perbedaannya tidak terlalu signifikan hal ini dikarenakan deformasi menara lebih dominan ke arah sumbu X yang merupakan arah letak kabel penggantung.

3. Semakin besar rasio lebar jembatan terhadap bentang utama jembatan, semakin besar pula berat sendiri serta beban layan yang bekerja pada struktur jembatan. Sehingga nilai-nilai gaya-gaya dalam yang dihasilkan pada struktur utama diantaranya adalah menara dan dek jembatan akan semakin besar untuk setiap penambahan lebar jembatan. Untuk rasio lebar jembatan terhadap bentang jembatan sebesar 0,093 sampai 0,160 yaitu pada lebar jembatan 14 m sampai 24 m masih tetap stabil terhadap pengaruh aerodinamik akibat beban angin menurut persyaratan *Leonhart* ($B \geq \frac{L}{25}$) dan masih memenuhi syarat lendutan maksimum AASHTO ($\delta_{maks} = 0,375$ m) dan AISC ($\delta_{maks} = 0,417$ m). Untuk tegangan kerja yang bekerja pada setiap variasi rasio lebar jembatan masih stabil dan aman, sehingga apabila variasi rasio lebar jembatan ditingkatkan dan diperoleh *stress ratio* melebihi angka 1, maka struktur sudah tidak stabil dan dapat mengalami keruntuhan/*failure*. Sehingga struktur akan stabil jika masih memenuhi syarat lendutan maksimum serta *stress ratio* yang terjadi.

Saran

Dengan memperhatikan hasil analisis pada Bab sebelumnya, maka beberapa saran dapat diberikan sebagai berikut ini.

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan menggunakan bantuan software yang lain yang bisa memodelkan jembatan *cable stayed* dengan beban angin yang dinamik serta mengkaji lebih dalam analisis terhadap *flutter*.
2. Menganalisis lebih lanjut mengenai perilaku dan gaya-gaya yang bekerja pada elemen kabel pada jembatan *cable stayed*.

DAFTAR PUSTAKA

Algazt, M.A, (2015), Analisis Kestabilan *Cable Stayed Bridge* Tipe *Sharp* Akibat Rasio Bentang Terhadap Lebar

Jembatan, *Tugas Akhir*, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.

Badan Litbang PU Departemen Pekerjaan Umum, (2005), RSNI-T-02-2005, Standar Pembebanan untuk Jembatan, Penerbit Bina Marga, Jakarta.

Badan Standarisasi Nasional, (2008), SNI 2833-2008, Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Jembatan, BSN, Jakarta.

Ilham, M Noer. (2011). Jenis Jembatan. <http://mnoerilham.blogspot.com/>. Diakses pada Hari Sabtu, 22 Januari 2017, pukul 20.22 WIB.

Podolny & Scalm J.B. (1976). *Construction and Design of Cable Stayed Bridges*. New York: John Wiley & Sons Inc.

Roliansjah, S. & Zarkast I. (1995). Perkembangan Akhir Jembatan *Cable Stayed*. Makalah pada Konferensi Regional Teknik Jalan (KRTJ) IV, Padang.

Sihospi, Putri., (2017), Studi Perbandingan Studi Perbandingan Respon Struktur Pylon pada Jembatan *Cable Stayed* Tipe Fan dan Tipe Harp, *Tugas Akhir* (Tidak Diterbitkan), Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Suangga, M. (2002). "Beban Dinamik Angin pada Jembatan Bentang Panjang", *Conference on Long Span Bridge*, Tarumanegara University.

Supriyadi dan Muntohar, (2007) *JEMBATAN* (Edisi Ke-IV), Beta Offset, Yogyakarta.

Supriyadi, Bambang dan Muntohar, Agus S., (2007), *Jembatan*, Beta Offset, Yogyakarta.

Troitsky, S. (1997). *Cable Stayed Bridges Theory and Design*.

- California: Crosby Lockwood Staples.
- Walther, R. (1988). *Cable Stayed Bridges*. London: Thomas Telford.
- Widodo. (2001). Respon Dinamik Struktur Elastik. Jurusan Teknik Sipil FTSP, Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Widodo. (2012). Seismologi Teknik & Rekayasa Kegempaan. Yogyakarta: Pustaka Pelajar