



TINJAUAN GAYA TSUNAMI PADA JEMBATAN KRUENG RABA

Mahfuz^{a,*}, Mochammad Afifuddin^b, Renni Anggraini^b

^aMagister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh

^bJurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh

*Corresponding author, email address: mahfuz.usman@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:

Received 24 April 2020

Accepted 15 June 2020

Online 31 June 2020

Keywords:

Tsunami

Structures

Design of Structures

Vertical Evacuation

Tsunami

Bridges

ABSTRACT

Aceh Province is located in one of the earth's fault lines in Indonesia, which is an area prone to earthquakes and the potential for a tsunami disaster. Therefore, any planning of structures located on the coast must consider the potential for a tsunami to obtain a strong structure to withstand the forces affected by the tsunami. During the 2004 tsunami, many bridges were carried away by the tsunami. Both bridges made of concrete, as well as steel frame bridges, such as the Krueng Raba steel frame bridge, Lhoknga, the Krueng No bridge, the Meunasah Kulam bridge, and several other bridges. This study aims to analyze and calculate the force and load effects of the tsunami on the structure of one of these bridges, namely the Krueng Raba steel frame bridge, Lhoknga. The force and load of the tsunami effect (Ts) will be analyzed by adopting the Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis, 2012, namely: (1) hydrostatic force; (2) buoyant forces; (3) hydrodynamic forces; (4) impulsive forces; (5) debris impact forces; (6) debris damming forces; (7) lift force; and (8) additional gravity load from water retained on the bridge floor. From the results of this study, it is shown that each of the tsunami forces acting on the crew-raba Lhoknga bridge at the minimum tsunami height variable, 11 meters, which is the initial height of the tsunami touching the bridge's superstructure are: 94.866 KN hydrodynamic force; 142,299 KN thrust; 133,810 KN debris impact force; 14,244 KN debris dam force, and 34,018 KN lift force. Meanwhile, the maximum tsunami height variable, 25 meters, is 24634.934 KN hydrodynamic force; 36952,400 KN thrust; 720,591 KN collision force; 3698,939 KN debris blocking force; and 986,519 KN lift styles. The results of the analysis using computational methods, by inputting the magnitude of the tsunami forces to the bridge model, it can be seen that the ability of the Krueng Raba, Lhoknga steel frame bridge to withstand the forces and loads caused by the tsunami only up to a height of 14 meters.

©2020 Magister Teknik Sipil Unsyiah. All rights reserved

1. PENDAHULUAN

Gempa bumi yang diikuti oleh tsunami di Provinsi Aceh pada tanggal 26 Desember 2004 berkekuatan 9 SR, berpusat di Barat Daya Aceh (Samudera Hindia, Megathrust), telah menimbulkan getaran kuat dan patahan sepanjang ± 1200 km yang membentang dari Aceh sampai ke Andaman yang mengakibatkan kerusakan yang masif.

Kerusakan terjadi pada sebagian besar struktur bangunan dan prasarana transportasi yang berada pada garis pantai yang berhadapan langsung dengan gelombang tsunami, yang berupa jembatan, baik jembatan yang terbuat dari beton, maupun jembatan-jembatan rangka baja, seperti jembatan rangka baja

Krueng Raba, Lhoknga, jembatan Krueng No, jembatan Meunasah Kulam, dan beberapa jembatan lainnya.

Jembatan rangka baja Krueng Raba, Lhoknga, yang berada di garis pantai Tenggara Aceh merupakan salah satu jembatan yang mengalami kerusakan akibat dampak langsung dari tsunami pada tahun 2004 yang lalu. Sebagai pengganti, pada saat ini, telah dibangun kembali jembatan rangka baja di lokasi yang sama untuk menghubungkan kembali jalur Banda Aceh – Meulaboh yang sempat terputus.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 Jembatan

Jembatan adalah sebuah struktur konstruksi bagian dari jalan yang dibangun untuk menyeberangi suatu rintangan berupa kontur yang curam seperti lembah dan jurang, atau untuk menghindari pertemuan sebidang dengan arus lain seperti arus sungai atau arus lalu-lintas lain.

2.2 Tsunami

Tsunami adalah gelombang air laut yang merambat ke segala arah dan terjadi karena adanya gangguan impulsif pada dasar laut. Gangguan impulsif tersebut terjadi akibat adanya perubahan bentuk dasar laut secara tiba-tiba dalam arah vertikal (Pond dan Pickard, 1983) atau dalam arah horizontal (Tanioka dan Satake, 1995). Perubahan tersebut disebabkan oleh tiga sumber utama, yaitu gempa tektonik, letusan gunung api, atau longsor yang terjadi di dasar laut. Dari ketiga sumber tersebut, di Indonesia, gempa merupakan penyebab utama terjadinya tsunami (Puspito dan Triyoso, 1994).

2.3 Beban tsunami

Menurut FEMA (2012), beban tsunami berikut harus dipertimbangkan untuk desain struktur evakuasi vertikal: (1) gaya hidrostatik; (2) gaya apung (*buoyant forces*); (3) gaya hidrodinamis; (4) gaya dorong (*impulsive forces*); (5) gaya tumbukan puing (*debris impact forces*); (6) gaya bendung puing (*debris damming forces*); (7) gaya angkat; dan (8) beban gravitasi tambahan dari air yang tertahan di lantai atas.

Dengan mengadopsi FEMA (2012), dan mempertimbangkan perbedaan objek yang akan diteliti, yaitu jembatan rangka baja, maka dilakukan penyesuaian pada salah satu kombinasi beban tsunami tersebut, yaitu beban gravitasi (poin 8) menjadi beban gravitasi tambahan dari air yang tertahan di lantai jembatan.

- a. Gaya hidrostatik dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$F_h = p_c A_w = \frac{1}{2} \rho_s g b h_{max}^2 \quad (1)$$

di mana,

- p_c : tekanan hidrostatik,
- A_w : daerah panel yang basah,
- ρ_s : densitas fluida termasuk sedimen (1.100 kg/m³),
- g : percepatan gravitasi,
- b : lebar dari dinding, dan
- h_{max} : tinggi air maksimum di atas dasar dinding di lokasi struktur.

- b. Gaya apung ditunjukkan dengan persamaan:

$$F_b = \rho_s g V \quad (2)$$

di mana,

ρ_s : densitas fluida termasuk sedimen (1.100 kg/m³),

g : percepatan gravitasi,

V : volume air yang dipindahkan oleh bangunan, yaitu, volume di bawah level h_{max}

c. Gaya hidrodinamik dihitung dengan menggunakan Persamaan:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_s C_d B (hu^2)_{max} \quad (3)$$

di mana,

ρ_s : densitas fluida termasuk sedimen (1.100 kg/m³),

C_d : koefisien drag

B : luasnya struktur pada bidang normal terhadap arah aliran (yaitu luasnya dalam arah paralel ke pantai),

h : kedalaman aliran, dan

u : kecepatan aliran di lokasi struktur.

d. Gaya impulsif, F_s , diambil sebagai 1,5 kali gaya hidrodinamik, F_d , seperti yang ditunjukkan pada persamaan:

$$F_s = 1,5F_d \quad (4)$$

e. Gaya tumbukan puing dihitung dengan persamaan:

$$F_i = 1,3U_{max}\sqrt{km_d(1+c)} \quad (5)$$

di mana,

1,3 : Koefisien Risiko Kategori IV Struktur yang ditentukan oleh ASCE 7 Bab 5 untuk tumbukan puing-puing.

U_{max} : kecepatan aliran maksimum yang membawa puing-puing di lokasi

c : koefisien massa hidrodinamik

k : kombinasi kekakuan bersih efektif

m_d : massa puing-puing.

f. Gaya pembendungan puing menggunakan persamaan :

$$F_{dm} = \frac{1}{2} \rho_s C_d B_d (hu^2)_{max} \quad (6)$$

di mana,

ρ_s : densitas fluida termasuk sedimen (1.100 kg/m³),

C_d : koefisien drag,

B_d : luasnya bendungan puing-puing,

h : kedalaman aliran, dan

u : kecepatan aliran di lokasi struktur .

- g. Gaya angkat pada sistem lantai dapat diperkirakan dengan menggunakan persamaan :

$$F_u = \frac{1}{2} C_u \rho_s A_f u_v^2 \quad (7)$$

di mana,

C_u : koefisien (diambil sebesar 3,0),

ρ_s : densitas fluida termasuk sedimen (1.100 kg/m³),

A_f : luas panel lantai atau komponen rangka lantai, dan

u_v : kecepatan vertikal perkiraan atau tingkat kenaikan air (diadaptasi dari American Petroleum Institute, 1993).

- h. Beban air yang tertahan di lantai jembatan :

$$f_r = \rho_s g h_r \quad (8)$$

di mana,

ρ_s : densitas fluida termasuk sedimen (1.100kg/m³),

g : percepatan gravitasi, dan

h_r : potensi kedalaman maksimum air tertahan di lantai atas.

2.4 Analisa Struktur

Untuk mengetahui kemampuan struktur menerima beban atau gaya, perlu dilakukan analisa. Hasil dari analisa nantinya diharapkan dapat diketahui reaksi tumpuan, tegangan, tarik, tekan, geser, puntir, momen, dan perpindahan.

Prinsip mendasar dalam menganalisa untuk mengetahui kemampuan struktur adalah dengan membandingkan tegangan yang dialami komponen struktur akibat tegangan akibat gaya luar dengan tegangan ijinnya. Jika tegangan yang dialami tidak melebihi tegangan ijinnya, maka struktur akan stabil, tidak terjadi deformasi yang berlebihan, atau masih dapat kembali ke bentuk semula. Hubungan tegangan tersebut dapat diformulakan dengan persamaan berikut:

$$\sigma \leq \sigma_{ijin} \quad (9)$$

$$\tau \leq \tau_{ijin} \quad (10)$$

Dalam hal metode analisa, dikenal beberapa metode yang dapat dipilih menurut kemudahan dan kecocokan dengan jenis struktur. Metode – metode yang umum dikenal yaitu :

- i. Metode Gaya
- j. Metode Perpindahan
- k. Metode Energi Regangan
- l. Metode Kerja Maya
- m. Metode Selisih Berhingga
- n. Metode Elemen Berhingga,
- o. Metode Komputasi

3 METODE PENELITIAN

Penelitian ini, untuk perhitungan gaya dan beban tsunami, dilakukan dengan menggunakan metode analitis numerik dengan mengadopsi *Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from*

Tsunamis (FEMA, 2012), sedangkan untuk penerapan gaya pada struktur jembatan, penelitian menggunakan metode komputasi dengan perangkat lunak SAP2000.

Hasil analisis SAP2000 yang menjadi tolak ukur untuk menyimpulkan struktur mengalami kegagalan atau tidak adalah rasio tegangan akibat gaya aksial atau momen (P-M Ratio), yang merupakan perbandingan tegangan akibat gaya luar dengan tegangan izin (persamaan 2.1 dan 2.2). Jika hasil analisis rasio tegangan lebih besar dari 1 (satu), maka komponen sudah dalam keadaan kritis karena telah melebihi batas elastis.

Kegiatan penelitian ini dilakukan dengan sistematis dengan urutan kerja secara umum sebagai berikut:

1. Evaluasi terhadap data primer dan sekunder.
2. Pengolahan data
3. Pemodelan jembatan
4. Pembebanan
5. Analisis beban tsunami dan kemampuan struktur jembatan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karena elevasi dasar bangunan atas jembatan adalah di ketinggian 10,5 meter, dan gaya tsunami belum memberi pengaruh terhadapnya, maka perhitungan gaya dimulai pada ketinggian 11 meter sampai dengan 25 meter yang merupakan ketinggian maksimum tsunami yang pernah terjadi di lokasi.

Hasil perhitungan gaya - gaya tsunami yang dialami oleh struktur jembatan untuk masing-masing variabel ketinggiannya adalah sebagai berikut.

Tabel 1. Hasil perhitungan gaya tsunami

R (meter)	T_s (KN)				
	F_d	F_s	F_i	F_{dm}	F_u
	←	←	←	←	↑
11	94,866	142,299	133,810	14,244	34,018
12	446,301	669,451	231,766	67,012	102,054
13	1013,340	1520,009	299,209	152,153	170,089
14	1795,983	2693,974	354,029	269,667	238,125
15	2794,230	4191,345	401,431	419,554	306,161
16	4008,082	6012,123	443,799	601,814	374,197
17	5437,537	8156,306	482,460	816,447	442,233
18	7082,597	10623,896	518,245	1063,453	510,268
19	8943,261	13414,892	551,714	1342,832	578,304
20	11019,530	16529,294	583,266	1654,584	646,340
21	13311,402	19967,103	613,196	1998,709	714,376
22	15818,879	23728,318	641,732	2375,207	782,412
23	18541,959	27812,939	669,052	2784,078	850,447
24	21480,644	32220,967	695,299	3225,322	918,483
25	24634,934	36952,400	720,591	3698,939	986,519

F_d : Gaya hidrodinamis (Persamaan 3)

F_s : Gaya dorong (Persamaan 4)

F_i : Gaya tumbukan puing (Persamaan 5)

F_{dm} : Gaya pembendungan puing (Persamaan 6)

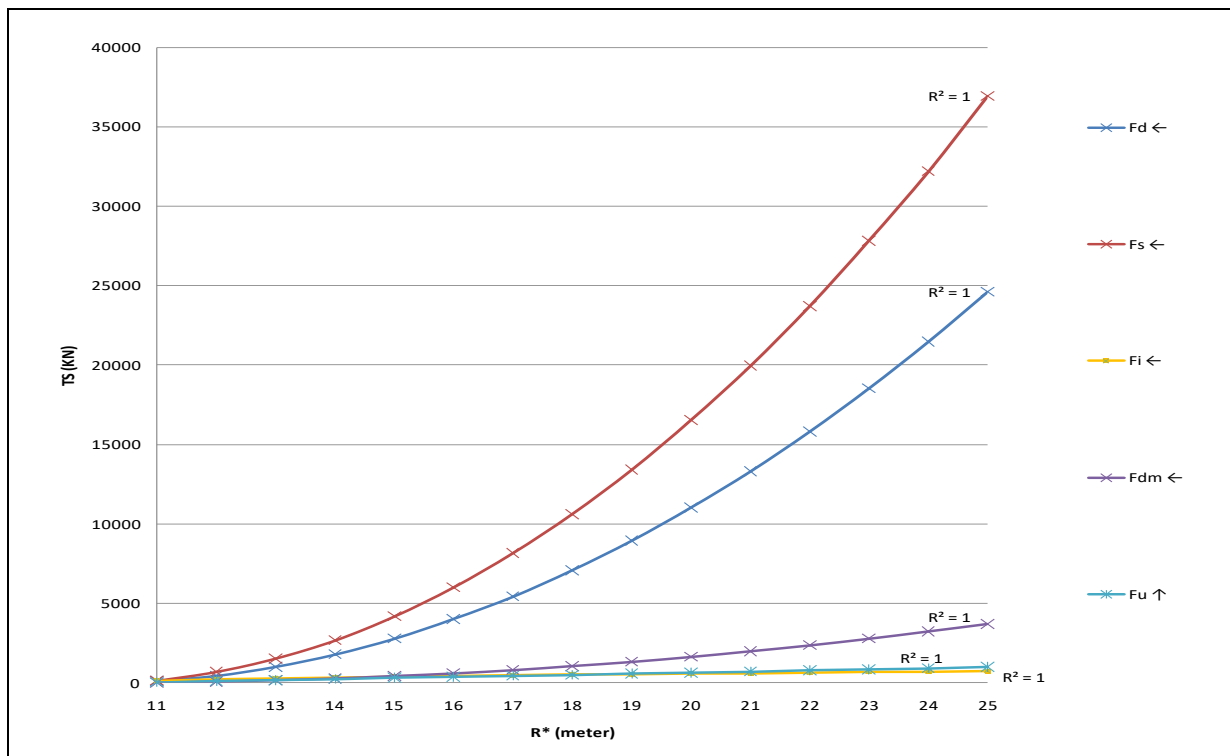
F_u : Gaya angkat (Persamaan 7)

Hasil perhitungan gaya tsunami tersebut di atas membentuk fungsi polinomial berikut :

- gaya hidrodinamis (F_d) : $y = 5E-08x^6 - 5E-06x^5 + 0,000x^4 - 0,004x^3 + 107,8x^2 - 2128,x + 10460$;
- gaya dorong (F_s) : $y = -3E-08x^6 + 3E-06x^5 - 0,000x^4 + 0,002x^3 + 161,6x^2 - 3191,x + 15688$;
- gaya pembendungan puing (F_{dm}) : $y = -2E-13x^6 + 2E-11x^5 - 1E-09x^4 + 2E-08x^3 + 16,18x^2 - 319,5x + 1570$;
- gaya angkat (F_u) : $y = 2E-08x^6 - 2E-06x^5 + 0,000x^4 - 0,002x^3 + 0,032x^2 + 67,81x - 713,7$; dan
- gaya tumbukan (F_i) : $y = -0,000x^6 + 0,043x^5 - 2,083x^4 + 52,62x^3 - 744,9x^2 + 5660,x - 17896$.

Di mana x adalah variabel bebas untuk level ketinggian tsunami (R) dan y adalah variabel terikat yang menunjukkan gaya tsunami (T_s).

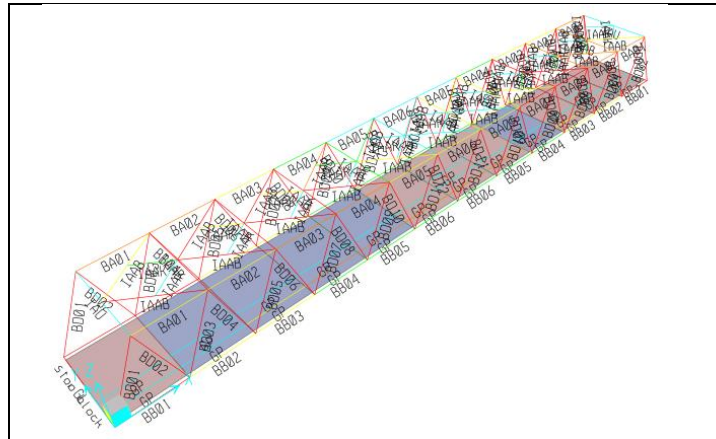
Masing–masing fungsi polinomial gaya tsunami tersebut ditunjukkan dalam bentuk grafik pada gambar 2. Dari grafik terlihat bahwa gaya paling besar terhadap jembatan diberikan oleh gaya hidrodinamis (F_d), mulai dari variabel ketinggian minimal hingga maksimal. Gaya yang paling kecil memberikan pengaruh pada variabel ketinggian minimal, 11 meter, adalah gaya pembendungan (F_{dm}), sedangkan pada ketinggian maksimal, 25 meter, diberikan oleh gaya tumbukan puing (F_i).



Gambar 1. Grafik Besaran Gaya – Gaya Tsunami Menurut Variabel Ketinggian Tsunami

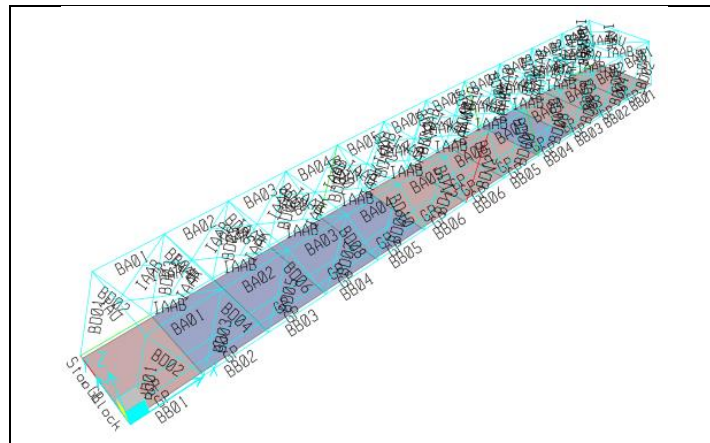
Hasil analisis yang diperlukan adalah rasio tegangan aktual dengan tegangan izin dari batang dan tumpuan. Jika hasil analisis lebih besar dari 1 (satu) maka dapat disimpulkan terjadi kegagalan pada komponen jembatan.

Rasio untuk batang diperoleh dari tabel hasil keluaran pengecekan struktur (*steel design section* (AISC-LRFD99)) ditunjukkan dalam tampilan pada gambar 3 adalah rasio tegangan batang - batang jembatan yang diakibatkan oleh gaya – gaya tsunami dengan ketinggian 25 meter. Warna sebagai indikator yang menunjukkan tegangan melebihi rasio 1 atau tidak. Pada ketinggian tsunami 25 meter sebagian besar komponen berwarna merah yang berarti batang – batang yang ditunjukkan rasio tegangan melampaui 1.



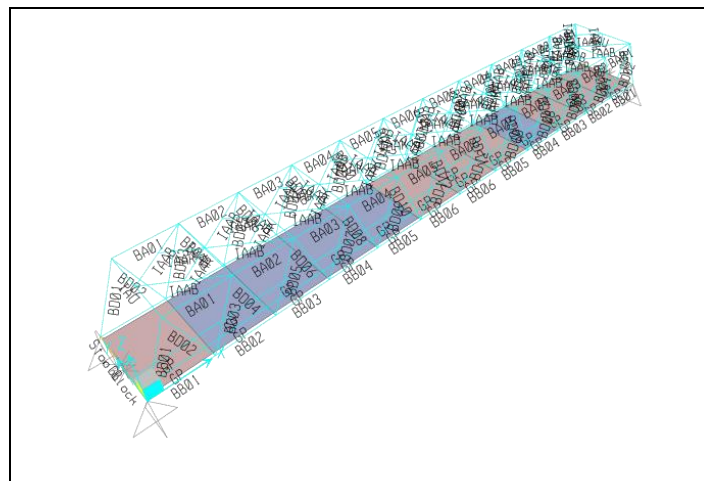
Gambar 2. P-M Ratio Jembatan dengan variabel ketinggian tsunami 25 meter

Sedangkan pada ketinggian tsunami 15 meter, ditunjukkan bahwa batang yang melampaui rasio 1 hanya gelagar pada kedua ujung jembatan dan 1 batang diagonal pada bagian tengah, seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. P-M Ratio Jembatan dengan variabel ketinggian tsunami 15 meter

Di ketinggian tsunami 14 meter, tidak ada batang yang ditunjukkan dengan warna merah, yang artinya pada ketinggian ini, gaya tsunami tidak menimbulkan kerusakan pada jembatan Krueng Raba, seperti yang ditunjukkan Gambar 4.



Gambar 4. P-M Ratio Jembatan dengan variabel ketinggian tsunami 14 meter

Sedangkan untuk tumpuan, besaran rasio tegangannya dihitung dengan mengambil besaran gaya dan momen hasil analisis pada tabel *joint reaction* dengan membandingkan dengan area tegangannya masing-masing profil tumpuan.

Berikut rekapitulasi hasil perhitungan rasio tegangan akibat dari 4 kombinasi gaya tsunami menurut variabel ketinggian gelombang tsunami untuk tumpuan dan batang.

Tabel 2. Rasio Tegangan (P-M *ratio*) Maksimum

Ketinggian Tsunami	P-M rasio maksimum							
	Komb.1 : Fb+Fu		Komb.2 : Fs+Fd		Komb.3: Fi+Fd		Komb.4 : Fdm+Fd	
	Tumpuan	Batang	Tumpuan	Batang	Tumpuan	Batang	Tumpuan	Batang
13	0,054	0,521	0,422	0,757	0,387	0,756	0,330	0,702
14	0,053	0,513	0,705	0,926	0,619	0,909	0,545	0,832
15	0,052	0,506	1,064	1,141	0,912	1,224	0,781	0,973
16	0,052	0,499	1,501	1,399	1,265	1,268	1,163	1,200
17	0,051	0,492	2,014	1,702	1,679	1,512	1,565	1,439
18	0,050	0,485	2,607	2,050	2,153	1,792	2,036	1,717
19	0,049	0,478	3,266	2,433	2,686	2,106	2,606	2,053
20	0,049	0,470	4,013	2,874	3,283	2,460	3,197	2,405
21	0,048	0,463	4,835	3,360	3,944	2,854	3,856	2,797
22	0,047	0,456	5,735	3,891	4,661	3,281	4,567	3,219
23	0,046	0,449	6,712	4,523	5,442	3,745	5,359	3,691
24	0,046	0,442	7,471	5,233	6,187	4,183	6,184	4,181
25	0,045	0,435	8,900	6,167	7,188	4,908	7,081	4,821

Dari hasil penelitian ini ditunjukkan masing-masing gaya tsunami yang bekerja pada jembatan Krueng Raba, Lhoknga, pada variabel ketinggian tsunami minimum, 11 meter, yang merupakan ketinggian awal tsunami menyentuh bangunan atas jembatan adalah: 94,866 KN gaya hidrodinamis; 142,299 KN gaya dorong; 133,810 KN gaya tumbukan puing; 14,244 KN gaya pembendungan puing; dan 34,018 KN gaya angkat. Sedangkan untuk variabel ketinggian tsunami maksimum, 25 meter, adalah : 24.634,934 KN gaya hidrodinamis; 3.6952,400 KN gaya dorong; 720,591 KN gaya tumbukan puing; 3.698,939 KN gaya pembendungan puing; dan 986,519 KN gaya angkat.

Hasil analisa dengan metode komputasi, dengan masukan besaran gaya – gaya tsunami di atas, setelah diaplikasikan terhadap model jembatan, menghasilkan rasio maksimum dari kombinasi gaya kombinasi gaya dorong, F_s , dan gaya hidrodinamis, F_d . Rasio tegangan maksimum pada ketinggian tsunami maksimum, 25 meter, terjadi pada tumpuan yaitu sebesar 8,9. Pada ketinggian awal terjadinya kegagalan, 15 meter, rasio tegangan maksimum sebesar 0,14 yang terjadi pada batang, sedangkan rasio tegangan maksimum pada ketinggian aman, 14 meter, terjadi pada batang jembatan sebesar 0,92.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini ada beberapa kesimpulan yang dapat ditarik:

1. Struktur atas jembatan krueng raba tidak mampu bertahan terhadap hantaman gelombang tsunami dengan kekuatan seperti yang pernah terjadi sebelumnya pada tanggal 26 Desember 2004, yang tercatat memiliki ketinggian 25 meter di lokasi tersebut.
2. Kegagalan struktur terjadi dimulai pada ketinggian gelombang tsunami 15 meter. Penyebab awal kegagalannya adalah kombinasi gaya dorong dan gaya hidrodinamis (kombinasi 2).
3. Komponen yang pertama mengalami kegagalan adalah gelagar melintang di kedua ujung jembatan.

5.2 Saran

Demi meningkatkan kemampuan jembatan menahan gaya tsunami, disarankan ada penelitian lanjutan dengan memodelkan jembatan dengan modifikasi profil permukaan batang sehingga dapat mengurangi hambatan aliran tsunami, serta memodelkan jembatan dengan menambahkan pelindung (*fender*) untuk mengantisipasi gaya – gaya akibat puing yang terbawa oleh aliran tsunami.

DAFTAR PUSTAKA

- Federal Emergency Management Agency (FEMA). 2012. *FEMA P-646 / April 2012: Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis, Second Edition*, California.
- Pond, S. dan Pickard, G.L. 1983. *Introductory dynamical Oceanography, Second edition*. Gulf Professional Publishing.
- Puspito, N. T., dan Triyoso, W. 1994. Aspek kegempaan Tsunami di Indonesia. *Suatu Tinjauan Awal. Seminar sehari masalah Tsunami di Indonesia dan aspek-aspeknya*, Bandung pp. 167-175.
- Tanioka, Y., dan Satake, K. 1996. Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom. *Geophysical research letters*, 23(8), 861-864.