
Pola Keruntuhan Jembatan Rangka Menerus Tipe Waren

Heri Istiono¹, Eka Susanti²

^{1,2}Jurusan Teknik Sipil, ITATS, Jl Arief Rachman Hakim 100 Surabaya
E-mail: ¹tio_pelo@yahoo.com, ²ekasusanti@itats.ac.id

Received 14 Agustus 2019; Reviewed 02 September 2019; Accepted 27 November 2019
Journal Homepage: <http://jurnal.borneo.ac.id/index.php/borneoengineering>

Abstract

Bridge damage often occurs, as a result of damage to the bridge causing financial aspects losses and can also cause fatalities. The causes of the damage various factor, one of which is the bridge structure experiencing fatigue. This fatigue caused the strength of the structure of the bridge to decrease. Bridge damage due to a decrease in the strength of this bridge structure can impact the bridge to collapse. To minimize bridge damage due to a decrease in the strength of the structure of the bridge there is a need for bridge maintenance and to make it easier in terms of maintenance it is necessary to know the pattern of collapse of the existing bridge. In the analysis of this collapse pattern, a waren type steel continous bridge will be modeled with a span length of 120 meters. This analysis is carried out by giving a static vertical load at a reference point on the bridge frame, where the load is increased by multiplying until the structure is damage. The results of the study show that in the waren type continuous steel truss bridge failure occurs at the final portal diagonal element in the 2 middle positions. Based on FEMA 356 displacement target, the level of structural performance shows the bridge model under IO conditions and based on SNI 2833-2008, the actual ductility that occurs has met the requirements.

Keywords : *Pushover analysis, Steel truss bridge waren type, failure mechanism, ductility*

Abstrak

Kerusakan Jembatan sering terjadi, akibat dari kerusakan jembatan ini menyebabkan kerugian finansial dan bisa juga menyebabkan terjadinya korban jiwa. Penyebab dari kerusakan tersebut bermacam-macam salah satunya adalah struktur jembatan mengalami fatik. Fatik ini mengakibatkan kekuatan struktur dari jembatan mengalami penurunan. Kerusakan jembatan akibat dari penurunan kekuatan struktur jembatan ini bisa berdampak jembatan mengalami keruntuhan. Untuk meminimalisir kerusakan jembatan akibat penurunan kekuatan struktur dari jembatan diperlukan adanya pemeliharaan jembatan dan untuk mempermudah dalam hal pemeliharaan harus diketahui pola keruntuhan dari jembatan yang ada. Pada analisa pola keruntuhan ini, akan dimodelkan jembatan rangka baja menerus tipe pratt dengan panjang bentang 120 meter. Pada Analisa ini dilakukan dengan memberi beban vertikal statik di suatu titik acuan pada rangka jembatan, dimana beban ditingkatkan dengan faktor pengali sampai struktur tersebut mengalami kehancuran. Hasil studi menunjukkan bahwa pada model jembatan rangka baja menerus tipe waren kegagalan terjadi pada elemen diagonal portal akhir pada 2 perletakan yang ditengah. berdasarkan target displacement FEMA 356, tingkat kinerja strutur menunjukkan model jembatan dalam kondisi IO dan berdasarkan SNI 2833-2008, daktilitas aktual yang terjadi sudah memenuhi persyaratan.

Kata kunci : *Analisa Pushover, Jembatan rangka tipe waren, pola keruntuhan, daktilitas*

1. Pendahuluan

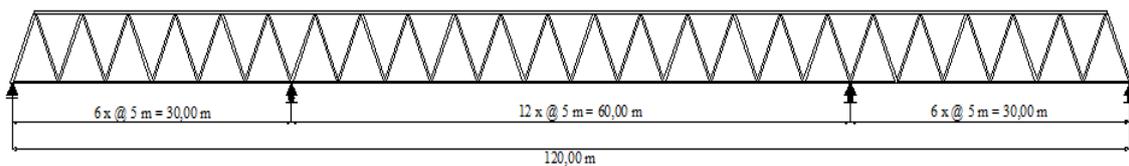
Jembatan rangka baja di Indonesia sudah ada sejak jaman Hindia Belanda, sehingga banyak yang telah melewati umur rencananya dan belum dilakukan penggantian karena minimnya dana yang ada. Selain itu seiring dengan perkembangan teknologi menyebabkan penambahan beban lalu lintas menjadi tidak terkendali dan minimnya pemeliharaan mengakibatkan banyak jembatan rangka baja yang rusak bahkan sampai terjadi keruntuhan (Direktorat Jendral Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum, 2009). Kasus-kasus keruntuhan jembatan baja di Indonesia sering terjadi salah satunya adalah yang terjadi di Probolinggo Jawa Timur tanggal 3 Maret 2015. Keruntuhan ini terjadi pada jembatan dengan panjang 15 meter dan lebar 5 meter. Adapun penyebab keruntuhan jembatan ini diperkirakan karena usia konstruksi jembatan yang sudah tua sehingga tidak mampu menahan beban kendaraan yang melintas di atasnya, dimana pada lokasi tersebut didominasi kendaraan jenis truk yang bermuatan pasir (Radar Bromo, 2015, h.1). Tidak hanya di Indonesia keruntuhan jembatan baja juga terjadi di luar negeri salah satunya adalah di Amerika Serikat. Jembatan I-35W di Sungai Mississippi, Kota Minneapolis pada tanggal 1 Agustus 2007 mengalami. Penyebab keruntuhan dari jembatan ini adalah karena sambungan di salah satu plat buhul pada sambungan rangka utama dengan dek jembatan mengalami kegagalan. Kegagalan pada plat buhul ini disebabkan karena korosi dan adanya peningkatan beban jembatan akibat adanya alat berat sebesar 263 ton yang sedang melakukan pemeliharaan adalah penyebab keruntuhannya (Asl A A, 2008, h. 9). “Beberapa faktor yang mempengaruhi keruntuhan jembatan adalah beban runtuh, elastisitas dan deformasi akhir. Namun sangat sulit untuk menemukan beban runtuh dan pola keruntuhan pada model-3D karena geometri struktur yang sangat rumit (Manda dan Nakamura, 2010, h. 27).

2. Model Struktur

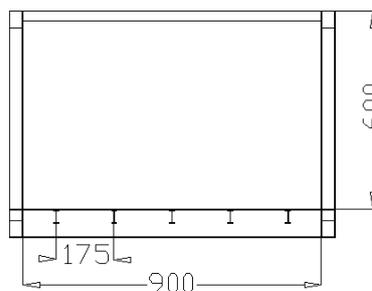
Model jembatan dapat dilihat pada Gambar 1. Berikut adalah detail jembatan yang akan dilakukan analisa :

Lebar jembatan : 7 + 2 meters
Tinggi jembatan : 6 meters

Pada gambar 2 menunjukkan potongan melintang dari struktur jembatan. Mutu baja yang digunakan adalah BJ 50 dan analisa yang digunakan dengan menggunakan SNI T 02-2005 dan SNI T 03-2005).



Gambar 1. Potongan memanjang jembatan rangka baja menerus tipe wren



Gambar 2. Potongan melintang jembatan rangka baja tipe pratt

3. Analisa Pushover

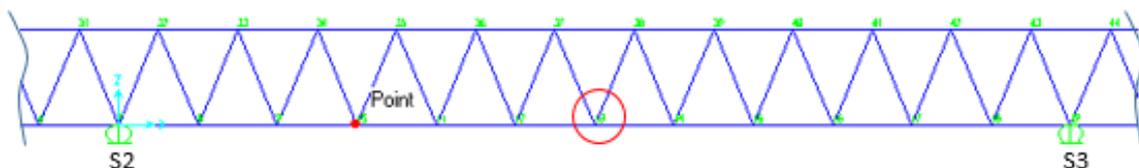
Pada penelitian ini analisisnya menggunakan analisa nonlinier dengan program *pushover analysis* SAP 2000. “Tujuan analisa *pushover* adalah untuk memperkirakan deformasi yang terjadi dan gaya maksimum serta untuk mendapatkan informasi elemen struktur mana saja yang kritis. Proses analisa ini dilakukan dengan memberi beban vertikal pada satu titik acuan yang ada pada struktur jembatan, kemudian bebannya ditingkatkan bertahap sampai target *displacement* dititik acuan tersebut tercapai. Hasil dari analisa ini adalah pola mekanisme keruntuhan, kurva hubungan antara gaya geser dasar dengan *displacement* pada titik acuan tersebut” (Wahyuni dan Tethool, 2015, h 214). “Analisa pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan model-2 dimensi, hal ini dilakukan karena model 3 dimensi sulit menentukan mekanisme keruntuhan dan beban runtuh pada rangka utama jembatan” (Manda dan Nakamura, 2010, h. 27).

Dalam analisa *pushover* dengan SAP 2000 untuk yang perlu diperhatikan *hinge properties*. *Hinge properties* adalah bagian dari komponen struktur yang berperilaku nonlinier atau terjadi sendi plastis.

Adapun langkah-langkah yang dilakukan untuk analisa *pushover* di SAP 2000 adalah sebagai berikut (Computer and Structure inc, 2008, h. 372-373):

- a. Pembuatan *frame*. Rangka utama dari struktur jembatan dimodelkan *frame*.
- b. Beban *pushover*.
Beban *pushover* didefinisikan sebagai beban nonlinier pada *load case* SAP 2000.
- c. *hinge properties*.
Hinge properties pada elemen rangka didefinisikan sebagai elemen axial dalam *frame hinge assignment* didefinisikan sebagai *Auto P*, kecuali pada portal akhir. Pada portal akhir didefinisikan sebagai elemen lentur (dalam *frame hinge assignment* didefinisikan sebagai *Auto M3*).
- d. Analisa *pushover*.

Ketika melakukan analisa *pushover* yang perlu diperhatikan adalah titik acuan dan beban. Beban selain tipe analisisnya didefinisikan sebagai nonlinier, juga arah beban didefinisikan ke arah vertikal hal ini dikarenakan distribusi beban pada rangka jembatan ke arah vertikal. Pada jembatan deformasi arah vertikal lebih dominan dibandingkan arah lainnya. Selanjutnya sebagai titik acuan dalam analisa ini berada pada tengah bentang setiap model jembatan, dimana pada posisi tersebut akan menimbulkan *displacement* terbesar dibandingkan di titik yang lainnya. Berikut adalah lokasi titik acuan pada salah satu model jembatan dalam analisa *pushover*:



Gambar 3. Lokasi titik acuan pada pemodelan jembatan

4. Hasil Analisa Pushover

4.1. Target Displacement

Dalam analisa statis non linier, *target displacement* harus ditetapkan terlebih dahulu. Hal ini dilakukan karena prosedur dalam analisis non linier ini beban akan ditungkatkan secara monotonik sampai pada batas tertentu sesuai dengan target perpindahan yang telah ditetapkan dalam *target displacement* tersebut.

Berikut adalah *target displacement* menurut FEMA 356 (FEMA 356, 2000, h. 3-21) :

$$\delta_T = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \left(\frac{T_e}{4\pi} \right)^2 g \quad (1)$$

C_0 = faktor modifikasi yang menghubungkan nilai *spectral displacement* dan *roof displacement*. Nilai C_0 dapat dilihat pada tabel 3-2 FEMA 356. Berdasarkan tabel tersebut nilai $C_0 = 1,0$.

C_1 = Faktor modifikasi untuk korelasi target simpangan inelastik maksimum terhadap simpangan hasil *respons linier analysis*.

$C_1 = 1,0 \rightarrow$ untuk $T_e \geq T_s$

C_2 = Koefisien untuk hubungan beban-deformasi akibat degradasi kekakuan dan kekuatan berdasarkan Tabel 3-3 dari FEMA 356. Berdasarkan tabel tersebut nilai $C_2 = 1,0$.

C_3 = Faktor modifikasi untuk memperlihatkan kenaikan peralihan akibat efek p-delta. Untuk struktur dengan perilaku kekakuan pasca-leleh bernilai positif maka $C_3 = 1,0$.

S_a = Akselerasi respons spektrum yang berkesesuaian dengan waktu getar alami efektif pada arah yang ditinjau. Berdasarkan RSNI-T02-2005 S_a didapatkan dari persamaan :

$$\begin{aligned} S_a &= C_D \times S_0 \\ &= 0,92 \times 1,2 \\ &= 1,104 \end{aligned}$$

T_e = periode alami efektif, didapatkan dari analisa *pushover* SAP 2000.

Berikut adalah target *displacement* dari model jembatan tersebut :

$$\delta_T = 1,0 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,104 \times \left(\frac{0,2647}{4\pi} \right)^2 \times 9,8 = 21,38 \text{ cm}$$

4.2. Tingkat Kinerja Struktur

Hasil analisa *pushover* yang telah dilakukan, dapat dilihat level kerusakan elemen struktur yang terjadi akibat deformasi yang diterima oleh struktur jembatan. Selanjutnya bisa dilakukan evaluasi dan pengelompokan terhadap kategori kerusakan dan tingkat kinerja struktur jembatan yang terjadi pada tiap perubahan nilai *displacement*-nya. "Berikut adalah level kerusakan akibat terbentuk-nya sendi plastis dalam program SAP2000" (Computer and Structure inc, 2008, h. 372).

Tabel 1 Tingkat kerusakan struktur akibat terbentuk-nya sendi plastis dalam program SAP2000 7 0

Keterangan	Simbol	Penjelasan
B		Menunjukkan batas elastis pada struktur yang kemudian diikuti terjadinya pelelehan pertama pada struktur. Tidak ada kerusakan pada struktur dan non struktural.
IO		Tidak ada kerusakan pada komponen struktur namun hanya kerusakan kecil pada komponen non struktur. Kekuatan dan kekakuannya mendekati sama dengan kondisi sebelum gempa. Bangunan dapat tetap berfungsi.
LS		Terjadi kerusakan pada komponen struktur dan non struktur mulai dari kecil hingga tingkat sedang . kekakuan struktur berkurang tapi masih mempunyai ambang yang cukup besar terhadap keruntuhan. Bangunan dapat berfungsi lagi jika sudah mengalami perbaikan
CP		Terjadi kerusakan parah pada struktur dan telah terjadi kegagalan pada komponen nonstruktural, sehingga kekuatan dan kekakuannya berkurang banyak, bangunan hampir runtuh.
C		Batas maksimum struktur dalam menahan gaya gempa.
D		Struktur tidak mampu menahan gaya gempa tetapi masih mampu menahan gaya gravitasi.
E		Struktur sudah hancur (<i>damage</i>)

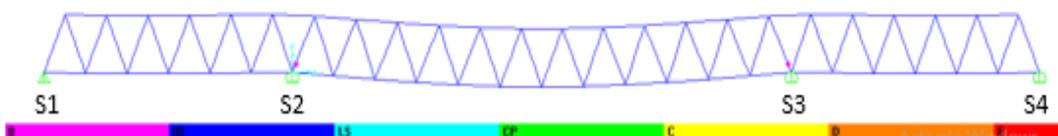
Target displacement, jembatan model-1 menurut FEMA 356 adalah 21,38 cm. Sedangkan displacement dari hasil analisa pushover adalah sebagai berikut:

Tabel 2 Kinerja Struktur Jembatan

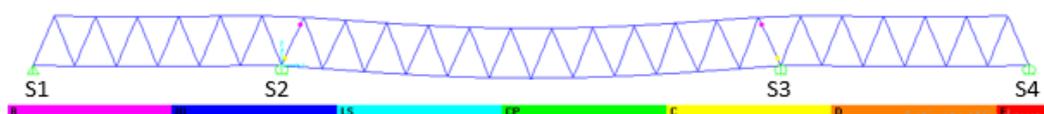
Step	Displacement (cm)	Base Force (T)	A - B	B - IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C - D	D - E	>E	Total
0	9,84	0,00	101	0	0	0	0	0	0	0	101
1	14,79	601,30	99	2	0	0	0	0	0	0	101
2	15,26	653,87	97	4	0	0	0	0	0	0	101
3	15,35	653,92	97	2	0	0	0	2	0	0	101
4	16,57	3218,40	95	6	0	0	0	0	0	0	101
5	10,36	1049,49	95	6	0	0	0	0	0	0	101
6	10,51	1082,62	95	4	0	0	0	2	0	0	101
8	10,43	1065,11	95	6	0	0	0	0	0	0	101
9	10,46	1065,15	95	4	0	0	0	2	0	0	101
10	10,83	1064,68	95	4	0	0	0	2	0	0	101
11	14,21	1062,41	95	2	2	0	0	0	2	0	101
12	14,76	1171,57	95	2	0	1	0	1	0	2	101

Berdasarkan perbandingan target displacement FEMA 356 dengan displacement hasil analisa pushover pada tabel 2 didapatkan hasil bahwa pada step 1 nilai displacement telah melewati target displacement dan kinerja struktur berada pada batas B – IO. Mengacu pada FEMA 356, maka untuk kategori level kinerja Immediate occupancy (IO), tidak ada kerusakan pada komponen struktur dan struktur bisa segera digunakan.

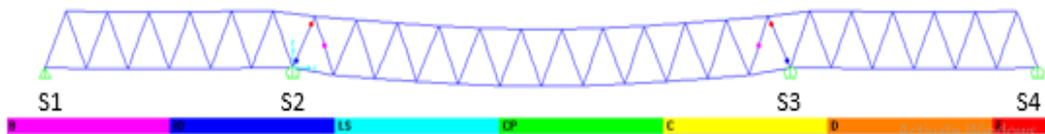
Berdasarkan analisa pushover diketahui bahwa pada step 1 seperti pada gambar 4a saat target displacement terlampaui, leleh pertama kali terjadi pada bagian bawah portal akhir S2 dan S3. Pada step 3 seperti pada gambar 4b, saat collapse terjadi pada bagian bawah portal akhir S2 dan S3, bagian atas portal akhir S2 dan S3 juga terjadi sendi plastis. Pada step 11 seperti pada gambar 4c, bagian atas portal akhir S2 dan S3 hancur dan batang diagonal tarik dekat perletakan S2 dan S3 terjadi sendi plastis. Dengan membagi jembatan menjadi 3 bentang dengan bentang paling panjang 60 m, maka sendi plastis terjadi pada portal akhir dan batang tarik dekat perletakan S2 dan S3.



Gambar 4a Pola Keruntuhan Pada Jembatan Step 1



Gambar 4b Pola Keruntuhan Pada Jembatan Step 3



Gambar 11c Pola Keruntuhan Pada Jembatan Step 11

4.3. Daktilitas

Nilai daktilitas didapat dari kurva kapasitas pada masing-masing model jembatan. adapun daktilitas didapatkan dari persamaan :

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (2)$$

μ = daktilitas

d_u = *displacement* diambang keruntuhan struktur

d_y = *displacement* pada saat leleh pertama

Berikut adalah perbandingan nilai daktilitas dari semua model jembatan:

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} = \frac{14,80}{15,35} = 1,04$$

Daktilitas aktual (m_D) yang terjadi dari jembatan tersebut sudah memenuhi persyaratan SNI 2833-2008 ($1,0 \leq m_D \leq m_m$).

5. Kesimpulan

Kesimpulan dari studi ini diambil berdasarkan analisa nonlinier dengan menggunakan *pushover analysis SAP 2000* pada semua model jembatan rangka 2 dimensi. Berikut kesimpulan yang didapat:

1. Pola keruntuhan pada model jembatan rangka menerus, elemen rangka yang lemah (terjadi sendi plastis) adalah elemen diagonal portal akhir pada 2 perletakan yang ditengah.
2. Hasil analisa menunjukkan bahwa tingkat kinerja struktur dari model jembatan tersebut adalah dalam kondisi IO (*Immediate occupancy*) yang artinya tidak ada kerusakan pada komponen struktur, hal ini berdasarkan *target displacement* FEMA 356.
3. Daktilitas aktual yang terjadi adalah 1,04 mengacu pada SNI 2833-2008, model jembatan sudah memenuhi persyaratan.

Daftar Pustaka

- Direktorat Jendral Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum. (2009). *Pemeriksaan Jembatan Rangka Baja*. Jakarta : Dirjen Bina Marga Kementerian PU.
- Radar Bromo. (2015). *Saat Truk Bermuatan Pasir Melintas, Jembatan Ambruk*. Probolinggo : Radar Bromo.
- Asl, A.A. (2008). *Progressive Collapse Of Steel Truss Bridge, The Case Of I-35W Collapse*. Guimarães, Portugal : 7th International Conference On Steel Bridges.
- Manda, A. and Nakamura, S. (2010). *Progressive Collapse Analysis of Steel Truss Bridges*. Journal of Constructional Steel Research, Vol.78, hal 192-200.

- Wahyuni, E., and Tethool, Y. (2015). *Effect of Vierendeel Panel Width and Vertical Truss Spacing Ratio in Staggered Truss Framing System Under Earthquake Loads*. International Journal of Civil Engineering, Vol. 13, No 2.
- Computer and Structure inc. (2008). *CSI Analysis Reference Manual for SAP 2000, ETABS and SAFE™*. California.
- Federal Emergency Management Agency. (2000). *Prestandard And Comentary For The Seismic Rehabilitation Of Building, FEMA 356*. Washington.

