

**ANALISIS KUAT LAYAN STRUKTUR ATAS JEMBATAN (BALOK MENERUS)
AKIBAT RUNTUHNYA SALAH SATU PILAR JEMBATAN
(STUDI KASUS JEMBATAN GANTIWARNO, KLATEN, JAWA TENGAH)**

***The Analysis Of Service Strength Of The Upper Continues Bridge Beam Due To Collapsed-Pillar
(Case Study: Gantiwarno Bridge, Klaten, Central Java)***

Bambang Supriyadi¹⁾

¹⁾ Staf pengajar Jurusan Teknik Sipil dan Pascasarjana, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2 Yogyakarta 55281; email : bb-supri@yahoo.com

ABSTRACT

The upper structure of the Gantiwarno bridge in Klaten, Central Java, was built using the continuous concrete beam bridge structure, which was supported by abutment at the ends and two pillars between them. In its service, one of the pillars had collapsed causing the inability of the upper bridge structure to provide support for the necessary loads. This study aims to observe; 1) the moment resistant of the main concrete beam section and its difference compared to the positive and negative maximum moment produced from the result of SAP90; 2) deflection and natural frequency value of the bridge in the normal condition of the upper structure and in the damaged condition. Through the observations, the study intends to understand the remaining strength of the upper structure, due to the collapse of one of the pillars, in supporting the services load. The result showed that the percentage of the "D" load allowed to pass the bridge structure in its damaged condition is 2.7859% (motorcyclists were still able to pass the bridge). There was a significant decrease of 68.312% of the structure natural frequency in its damaged condition. The deflection in its normal conditions was far from the maximum deflection permitted. It was also the case in its damaged condition. Therefore, the service strength of this bridge is determined by the moment resistant of the existing main concrete beam section and not by the deflection.

Keywords: continuous concrete beam, moment resistant, damaged condition.

PENDAHULUAN

Untuk memenuhi kebutuhan bentang rencana jembatan yang besar, sering dipilih struktur atas jembatan menggunakan model jembatan balok beton menerus yang didukung oleh *abutment* pada ujung ujungnya dan beberapa pilar diantara keduanya. Dalam perencanaanya tentu tidak sama dengan kumpulan beberapa balok sederhana, yang hanya mempertimbangkan momen positif pada daerah tengah bentang, tetapi perlu mempertimbangkan pula momen negatif pada tumpuan. Salah satu keuntungan model ini, apabila ada pilar atau salah satu pilar yang lepas atau roboh, struktur atas jembatan tidak langsung runtuh bila balok utama/gelagar masih mampu menahan beban matinya.

Dalam penelitian ini diambil contoh kasus jembatan Gantiwarno di Klaten Jawa Tengah yang mengalami kerusakan salah satu pilarnya roboh. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sisa kekuatan struktur atas jembatan akibat robohnya salah satu pilar dalam memikul beban-beban yang dijadikan acuannya. Manfaat yang diharapkan dapat dijadikan acuan dalam perencanaan dan analisis selanjutnya. Penelitian ini membahas mengenai momen tahanan penampang balok utama, serta perbedaannya dengan momen maksimum positif dan

negatif yang dihasilkan dari data keluaran SAP90. juga meneliti nilai lendutan yang terjadi baik pada saat struktur atas masih dalam keadaan normal maupun sudah dalam keadaan rusak, dan mengenai frekuensi alami struktur jembatan.

Menurut Wang dan Salmon (1994), di dalam metode tegangan kerja direncanakan suatu struktur yang tegangannya tidak melampaui harga tegangan ijin yang telah ditetapkan terlebih dahulu. Tegangan struktur yang dimaksud adalah tegangan yang diakibatkan oleh aksi beban layan (*service load*). Faktor-faktor kelayakan yang setara dengan kekuatan struktur itu sendiri adalah lendutan yang berlebihan, retak, simpangan yang berlebihan atau getaran yang tidak diinginkan dari vibrasi, dan suara ribut dari transmisi. Sedangkan di dalam metode perencanaan kekuatan (*ultimate strength design method*), beban kerja diperbesar dengan mengalikannya dengan suatu faktor beban dengan maksud untuk memperhitungkan terjadinya beban pada saat menjelang keruntuhan. Kemudian dengan menggunakan beban kerja yang telah diperbesar (beban terfaktor), struktur direncanakan mempunyai kekuatan melebihi atau sama dengan kekuatan bebannya.

Perencanaan komponen struktur beton dilakukan sedemikian rupa sehingga tidak muncul retak berlebihan pada penampang sewaktu mendukung beban kerja, dan masih mempunyai cukup keamanan serta cadangan kekuatan untuk menahan beban dan tegangan lebih lanjut tanpa mengalami runtuh (Dipohusodo, 1996).

Menurut Humar dan Kashif (1995), respons struktur jembatan terhadap beban kendaraan merupakan masalah yang kompleks dikarenakan interaksi antara jembatan dan kendaraan. Masalah yang kompleks ini sulit menentukan parameter yang tepat untuk mengukur respons tersebut.

Bakht dan Jaeger (1987), mengemukakan bahwa penentuan parameter-parameter merupakan konsep dasar metode sederhana dalam menganalisa struktur jembatan. Untuk mengetahui parameter-parameter yang digunakan dalam memperoleh respons, struktur jembatan dan kendaraan harus diidealisasikan terlebih dahulu menjadi sebuah model. Pemodelan struktur jembatan pada umumnya adalah sebagai balok silang (*grillage*)/balok grid. Sedangkan pembebanan oleh kendaraan dimodelkan menurut peraturan pembebanan untuk jalan raya.

Perilaku pembebanan pada kedua model di atas memberikan suatu keluaran data (*output*) dari program SAP90 berupa gaya geser dan momen yang terjadi pada tiap-tiap elemen serta reaksi dukungan dan deformasi tiap join pada model struktur jembatan.

Analisis dan perencanaan balok yang dicetak menjadi satu kesatuan monolit dengan pelat lantai atau atap, didasarkan pada anggapan bahwa antara pelat dengan balok-balok terjadi interaksi saat menahan momen lentur positif yang bekerja pada balok. Interaksi antara pelat dan balok-balok yang menjadi satu kesatuan pada penampangnya membentuk huruf T tipikal. Pelat akan berlaku sebagai lapis sayap (*flens*) tekan dan balok-balok sebagai badan.

Standar SK SNI T-15-5-1991-03 pasal 3.1.10 memberikan lebar *flens* efektif balok T adalah lebar *flens* efektif yang diperhitungkan tidak lebih dari seperempat panjang bentang balok, sedangkan lebar efektif bagian pelat yang menonjol di kedua sisi dari balok tidak lebih dari delapan kali tebal pelat, dan juga tidak lebih besar dari separuh jarak bersih dengan balok di sebelahnya.

Sesuai dengan ketentuan SK SNI T-15-1991-03.3.5 ayat 1, rasio penulangan aktual ditentukan dengan menggunakan lebar badan balok (b_w) dan bukannya lebar *flens* efektif (b). Ketentuan tersebut berlaku apabila badan balok dalam keadaan tertarik.

Menurut Peraturan Muatan Jembatan Jalan Raya (PMJJR) 1987, muatan primer adalah muatan utama yang harus diperhitungkan dalam setiap

perencanaan jembatan yang terdiri dari beban mati dan beban hidup. Beban mati adalah semua beban yang berasal dari berat sendiri jembatan atau bagian jembatan yang ditinjau, termasuk segala unsur tambahan tetap yang dianggap merupakan suatu kesatuan tetap dengannya. Beban hidup adalah semua muatan yang berasal dari berat kendaraan yang bergerak/lalu lintas dan atau berat orang-orang yang berjalan kaki yang dianggap bekerja pada jembatan.

Beban "D" dipergunakan untuk perhitungan kekuatan gelagar, yaitu berupa susunan beban pada setiap jalur yang terdiri dari beban terbagi rata sebesar q ton per meter panjang jalur, dan muatan garis $P = 12$ ton (belum dikalikan nilai faktor kejut) melintang jalur lalu-lintas tersebut, Besar q ditentukan sebagai berikut : $q = 2,2 \text{ t/m'}$ untuk $L \leq 30$ m; $q = 2,2 \text{ t/m' } - 1,1.(L-30)/60$ untuk $30 \text{ m} < L \leq 60$; $q = 1,1.(1 + 30/L) \text{ t/m'}$ untuk $L > 60$ m, dengan L adalah panjang bentang jembatan dalam meter.

Dalam penggunaan beban "D" berlaku ketentuan bahwa apabila jembatan mempunyai lebar lantai sama atau lebih kecil dari 5,5 m, beban "D" sepenuhnya (100%) harus dibebankan pada seluruh lebar jembatan. Kemudian untuk lebar lantai lebih besar dari 5,5 m, beban "D" sepenuhnya (100%) dibebankan pada lebar jalur 5,5 m sedang lebar selebihnya dibebani hanya separuh beban "D" (50%).

Berdasarkan standar SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.2.5, kekuatan dan kemampuan kelayakan struktur terhadap lendutan yang terjadi akibat beban kerja terutama komponen struktur beton bertulang yang mengalami lentur harus direncanakan agar mempunyai kekakuan yang cukup untuk membatasi lendutan atau deformasi apapun yang mungkin memperlemah kekuatan ataupun kemampuan kelayakan struktur pada beban kerja. Digunakan nilai lendutan izin maksimum yang terkecil, yaitu $L/480$ agar batasan lendutan yang diberikan cukup aman (Supriyadi dan Muntohar, 2000).

Supriyadi (2002) menunjukkan bahwa dalam struktur balok yang berbentang panjang, nilai frekuensi alaminya sangat rendah. Semua sistem yang memiliki massa dan elastisitas dapat mengalami getaran bebas atau getaran yang terjadi tanpa rangsangan luar, yang dapat dinyatakan dengan persamaan;

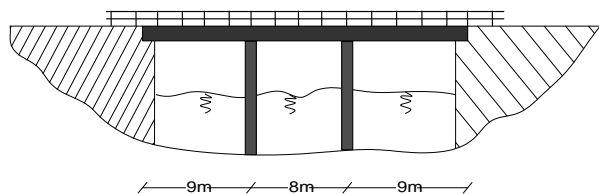
$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

dengan:

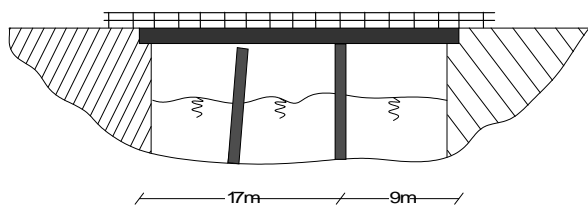
f = frekuensi alami struktur, (cps, atau Hz)
 k = kekakuan struktur, (N/m atau kg/m)
 m = massa dari struktur, (kg.s²/cm).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini mengambil kasus jembatan Gantiwarno di Klaten Jawa Tengah yang mengalami kerusakan salah satu pilarnya roboh, seperti terlihat pada dibawah ini,



(a) Kondisi jembatan sebelum pilarnya roboh



(b). Kondisi jembatan setelah pilarnya roboh

Gambar 1. Jembatan sebelum dan sesudah pilarnya roboh

Data teknis jembatan Gantiwarno-Klaten Jawa Tengah :

- 1). Jembatan menerus 3 bentang, yang terdiri dari; bentang kiri 8 m, bentang tengah 9m, dan bentang kanan 8m
- 2). Lebar jembatan; 2,5 m, dimensi balok utama; 300/600 mm, dimensi balok diafragma; 150/300 mm, tebal plat lantai; 120 mm. Dimensi pilar, tinggi; 3500 mm, lebar; 1700 mm, tebal; 500 mm
- 3). Bahan, beton mutu f'_c : 25 MPa, Baja f_y : 350 MPa dan tulangan lentur : $\phi 19$.

Berdasarkan data teknis lapangan dihitung momen tahanan balok yang dipertimbangkan sebagai data kekuatan balok utama/struktur atas jembatan. Jumlah dan diameter tulangan baja yang dipakai balok utama pada khususnya, memberikan perkuatan yang jelas pada penampang balok beton bertulang guna menopang beban-beban yang dipikulnya. Tulangan yang dipakai pada balok utama struktur jembatan di lapangan adalah $5\phi 19$ untuk menahan momen positif lapangan dan $10\phi 19$ untuk menahan momen negatif lapangan.

Dalam penelitian secara numerik struktur dimodelkan menggunakan SAP 90, jembatan di modelkan dengan sistem rangka bidang yang tersusun dari balok utama (ditinjau sebagai balok T) dan balok diafragma, yang panjang totalnya terbagi menjadi tiga bentang pada kondisi normal (8m, 9m dan 10m) dibuat variasi model pada analisis statis

dan perhitungan nilai frekuensi alami strukturnya. Pada analisis statis dibuat model berdasarkan variasi pembebanan untuk mencari nilai momen positif dan negatif maksimum. Kemudian untuk mencari nilai frekuensi struktur, digunakan beberapa model pendekatan yang bervariasi dalam jumlah elemen batangnya (dari 33, 73, 121, 221 dan 522).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan momen tahanan balok berdasar data teknis lapangan dan belum rusak) dengan beban hidup 50% beban D, serta perhitungan kondisi rusak (salah satu pilar sudah roboh) dengan beban hidup 1 % (R1) dan 3 % (R2) beban D, dapat dilihat pada Tabel 1 dibawah.

Tabel 1. Momen maksimum pada kondisi normal (N) dan rusak (R)

Momen	Kondisi Normal (50% beban D)	Balok T (R1)	Selisih (%)	Balok T (R2)	Selisih (%)
Momen (+) (kN.m)	168.518	241.262	43,17	260.506	54,59
Momen (-) (kN.m)	259.138	426.714	63,9	459.875	77,46

Tabel 2. Prosentase perbedaan momen maksimum

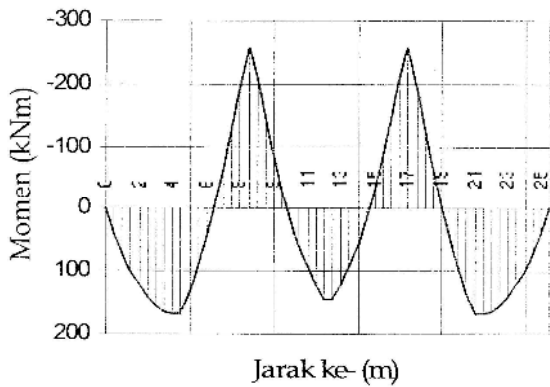
Momen	Momen Tahanan Balok	Kondisi Normal Beban 50%	Kondisi Rusak Beban 1%	Kondisi Rusak Beban 3%	Selisih (%)
Momen (+) (kN.m)	258.44	168.51	241.26	260.50	0.79
Momen (-) (kN.m)	445.06	259.13	426.71	459.87	3.33

Dari Table 1 diperoleh kenaikan nilai momen positif setelah kondisi struktur rusak (salah satu pilar turun) dengan beban hidup 1% beban D sebesar 43,17%, sedangkan pada beban hidup 3% D, kenaikan nilai momen positif sebesar 54,59%. Nilai momen negatif maksimum berturut-turut mengalami kenaikan sebesar 63,9% 77,46%.

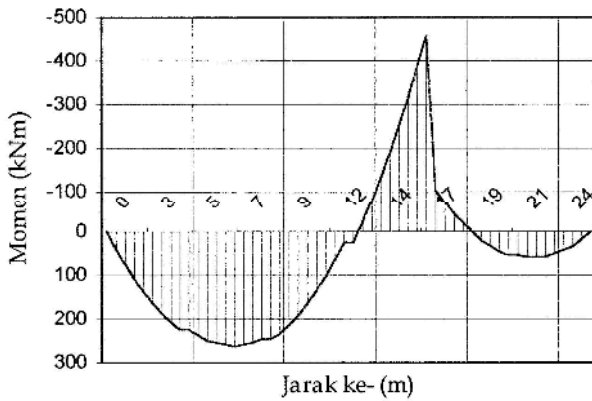
Dari Tabel 2 terlihat, bahwa momen maksimum (positif dan negatif) pada kondisi rusak dengan beban hidup 3% beban D, nilainya telah melewati momen tahanan yang dimiliki balok utama struktur jembatan yang ada. Besarnya prosentase perbedaan nilai momen antara momen tahanan balok dengan momen pada kondisi rusak dengan beban hidup 3% beban D sebesar 0,79% (momen positif maksimum) dan 3,33% (momen negatif

maksimum). Presentase perbedaan nilai momen tahanan balok dengan momen yang terjadi pada kondisi rusak, dapat dilihat pada Tabel 2 tersebut.

Penjelasan mengenai besarnya nilai momen di tiap titik sepanjang bentang total jembatan akibat beban yang bekerja dapat dilihat pada gambar di bawah ini. Setelah terjadi penurunan/robok posisi pilar pendukung, struktur mengalami perubahan jumlah bentang, dari 3 bentang dalam keadaan normal menjadi 2 bentang (17 m dan 8 m) pada saat pilar runtuh. Hal ini mengakibatkan perubahan sifat penampang balok dalam menahan beban yang terjadi.

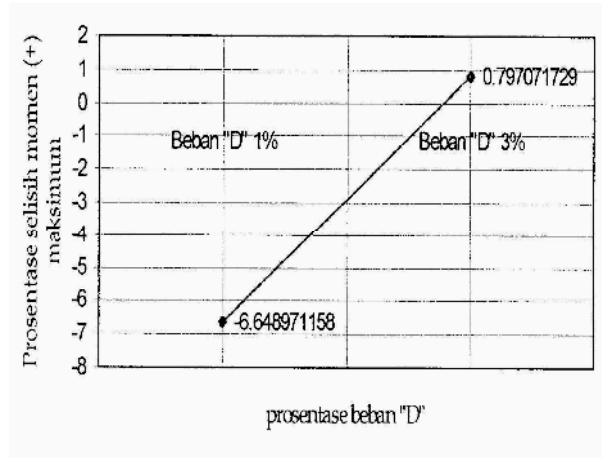


Gambar 2. Grafik momen pada keadaan normal



Gambar 3. Grafik momen pada pada kondisi runtuh

Berdasarkan Tabel 2 di atas dapat dicari beban "D" maksimum yang mampu ditahan balok utama, dengan cara interpolasi dari nilai prosentase selisih perbedaan nilai momen maksimum, maka didapat perkiraan prosentase beban "D"



Gambar 4. Interpolasi nilai beban "D"

Perbandingan segitiga :

$$\frac{(6.648971158 + 0.797071729)}{(3-1)} = \frac{(6.648971158)}{(X-1)}$$

maka didapat nilai $X = 2.785907297 \approx 2.7859$ beban "D"

Dari hasil interpolasi di atas, maka antara momen tahanan balok dan momen (+) maksimum yang terjadi pada kondisi rusak akan seimbang, bila digunakan prosentase beban "D" sebesar 2,7859%. Bila nilai prosentase beban "D" ini dilihat sebagai beban sesungguhnya, maka didapat nilai beban hidup merata sebesar 0,2733 kN/m, beban garis (bentang 17 m) sebesar 1,1936 kN dan beban garis (bentang 8m) sebesar 2,0047 kN.

Frekuensi Alami Struktur

Hasil perhitungan frekuensi alami struktur jembatan dengan model balok grid untuk berbagai jumlah elemen baik pada kondisi utuh/normal maupun rusak dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 3. Frekuensi alami struktur (kondisi normal)

Mode No.	Frekuensi (siklus/detik)				
	33 elemen	73 elemen	121 elemen	221 elemen	522 elemen
1	4.348	4.404	4.405	4.405	4.405
2	4.906	4.991	4.992	4.992	4.992
3	5.327	5.377	5.377	5.378	5.378
4	5.909	6.021	6.023	6.023	6.023
5	6.546	6.712	6.716	6.716	6.717

Tabel 4. Frekuensi alami struktur (kondisi rusak)

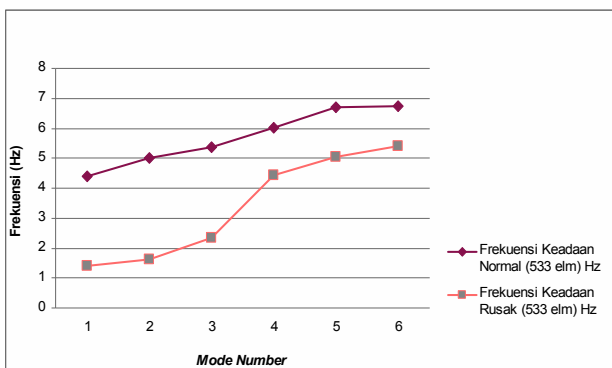
Mode number	Frekuensi (siklus/detik)	Periode (detik)
1	1.395962	0.716352
2	1.634584	0.611776
3	2.357343	0.424206
4	4.439101	0.225271
5	5.035331	0.198997

Tabel 5. Selisih frekuensi pada keadaan normal dan rusak

Mode Number	Frekuensi Keadaan Normal (522 elm) Hz	Frekuensi Keadaan Rusak (522 elm) Hz	Selisih (%)
1	4.405367	1.395962	68.312
2	4.992684	1.634584	67.260
3	5.37803	2.357343	56.167
4	6.023667	4.439101	26.306
5	6.717047	5.035331	25.037

Frekuensi pada mode pertama atau biasa disebut sebagai frekuensi alami struktur ini sangat penting dalam perencanaan pembebanan dinamis. Jika frekuensi beban luar yang terjadi sama dengan frekuensi alami struktur maka struktur akan mengalami deformasi yang sangat besar karena terjadi resonansi dari kedua nilai frekuensi yang sama tersebut, setelah itu struktur akan mengalami *collapse* (runtuh).

Nilai frekuensi alami yang dipakai sebagai acuan dipilih nilai frekuensi pada model dengan jumlah elemen 522 buah.(setelah perhitungan mencapai benar-benar konvergen). Pada saat kondisi rusak, struktur mengalami penurunan nilai frekuensi alami sebesar 68,312 %.



Gambar 5. Grafik perbedaan frekuensi keadaan normal dan frekuensi keadaan rusak

Frekuensi alami struktur yang terjadi setelah pilar pendukung roboh, nilainya sangat kecil sehingga dikhawatirkan frekuensi luar yang ditimbulkan dari beban hidup yang lewat di atasnya dapat menyamai nilai frekuensi alami struktur (kondisi rusak) ini. Gejala ini akan menimbulkan resonansi, sehingga membentuk frekuensi baru yang amplitudonya sangatlah besar. Membesarnya amplitudo getaran ini akan menyebabkan struktur berdeformasi cukup tinggi sehingga dapat membahayakan kekuatan komponen struktur yang ada.

Lendutan

Struktur yang dikenakan beban, baik itu beban mati termasuk berat sendiri maupun beban hidup akan mengalami penurunan atau deformasi karena sifat elastis struktur tersebut.

Program SAP90 memberikan data keluaran berupa nilai penurunan tiap joint, sehingga dapat dibandingkan dengan lendutan yang diijinkan. Nilai penurunan atau lendutan struktur pemodelan dapat dilihat pada Tabel 6 di bawah ini.

Tabel 6. Lendutan balok

Joint	Lendutan (mm)		
	Balok T (N)	Balok T (R1)	Balok T (R2)
Abutment kiri	0	0	0
Lapangan1	1.472	9.205	9.766
Pilar 1	0	11.669	12.38
Lapangan2	1.21	5.86	6.216
Pilar2	0	0	0
Lapangan3	1.472	0.5923	0.6282
Abutment-kanan	0	0	0

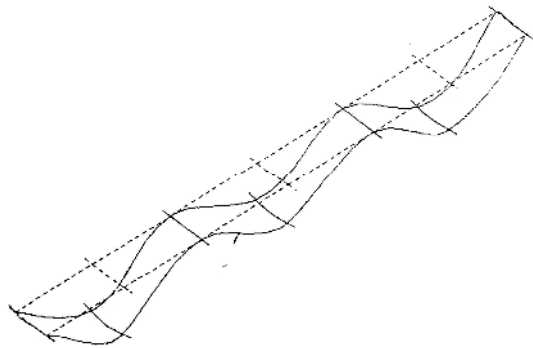
Keterangan:

(N) = kondisi normal

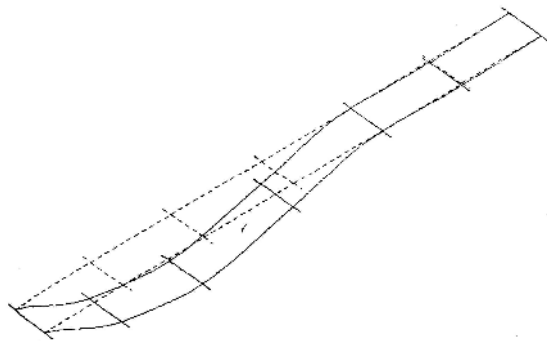
(R) = kondisi rusak (1% dan 3% beban "D")

Struktur yang berdeformasi akibat pembebanan baik dalam keadaan normal maupun dalam keadaan rusak dapat dilihat pada Gambar 6.

Berdasar standar SK SNI T-15-1991-03 Tabel 3.2.5(b) nilai lendutan izin maksimum pada kondisi normal sebesar 16,667 mm, nilai ini masih jauh lebih besar dari nilai lendutan yang terjadi hasil keluaran SAP 90 pada kondisi normal seperti yang terlihat pada Tabel 6 di atas. Demikian pula nilai lendutan ijin maksimum yang diperbolehkan pada kondisi rusak adalah 35,4167 mm.



(a) lendutan jembatan pada kondisi normal



(b) Lendutan jembatan pada kondisi setelah rusak

Gambar 6. Lendutan jembatan akibat pembebanan pada kondisi normal dan rusak.

KESIMPULAN DAN SARAN

Disimpulkan bahwa prosentase beban "D" yang dapat melewati struktur jembatan pada saat rusak maksimum sebesar 2.7859% (masih dapat meng-cover beban sepeda motor dengan penumpangnya). Frekuensi alami struktur pada saat kondisi rusak terjadi penurunan yang sangat signifikan sebesar 68,312%. Lendutan yang terjadi pada saat kondisi normal masih jauh nilainya bila dibandingkan dengan nilai lendutan izin maksimum, demikian pula pada kondisi rusak.

Kuat layan struktur jembatan ditentukan oleh momen tahanan dari penampang balok yang ada, tidak berdasarkan lendutan yang terjadi.

Disarankan untuk analisis berikutnya perlu dicari *range* frekuensi beban hidup yang bekerja pada jembatan sehingga dapat lebih diketahui bahaya resonansi dari jembatan yang mempunyai frekuensi

alami sangat rendah. Analisis lendutan perlu meninjau/mempertimbangkan momen inersia penampang balok yang telah mengalami retak.

UCAPAN TERIMAKASIH

Diucapkan terima kasih pada Direktur Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (DP2M) Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan Nasional yang telah menyetujui dan mendanai penelitian tentang struktur berbentuk panjang melalui Hibah Bersaing IX

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 1987, *Pedoman Perencanaan Pembebanan Jembatan Jalan Raya (PMJJR)*, Yayasan Badan Penerbit Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta
- Anonim, 1991, *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*, Yayasan Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan (LPMB), Bandung
- Bakht, B., & Jaeger, L.G., 1987, *Bridge Analysis Simplified*, McGraw-Hill Book Co., Singapore
- Dipohusodo, I., 1996, *Struktur Beton Bertulang*, Gramedia, Jakarta
- Humar, J.L., & Kashif, A.H., (jan), 1995, *Dynamic Response Analysis of Slab-Type Bridges*, Journal Structural Engineering, 121(1)
- Supriyadi B., & Muntohar, A.S., 2000, *Jembatan*, Beta Offset, Yogyakarta
- Supriyadi, B, dkk, 2002, Pengaruh beban hidup dinamik pada struktur lantai gedung berbentuk panjang, Laporan penelitian Hibah Bersaing IX/2, LP-UGM.
- Supriyadi B., 2002, The Influence of Dynamic Live Load on the Long Span Floor Building Structure, International Conference on Advancement in Design, Construction, Construction Management and Maintenance of Building Structures, Ministry of Settlement and Regional Infrastruktire, 27-28 March 2002, Bali
- Wang, C., K., & Salmon, C., G., 1994, *Disain Beton Bertulang (Alih Bahasa)*, Hariandja, B., Erlangga, Jakarta.