

# PENTINGNYA ANALISIS MEKANISME KERUNTUHAN PADA SEMUA TAHAPAN DAN ASPEK KEGIATAN KONTRUKSI BERESIKO TINGGI

Abdul Haris<sup>1</sup>

Teknik Sipil Universitas Mulawarman Samarinda

Jl. Sambaliung No.9 Kampus Gunung Kelua, Samarinda 75119. Telp: 0541-736834, Fax: 0541-749315

e-mail: oowaais@yahoo.com

## ABSTRAK

Keruntuhan getas pada struktur-struktur yang beresiko tinggi perlu diantisipasi secara sistemik lebih serius lagi. Kebutuhan infrastruktur dan sarana prasarana lainnya terus tumbuh baik dari segi kualitas maupun kuantitas. Dibutuhkan lebih banyak lagi struktur-struktur yang beresiko tinggi seperti jembatan-jembatan bentang panjang dengan kabel dan gantung maupun konstruksi baja serta jembatan-jembatan yang melayang di atas kota yang sibuk. Bangunan-banguna vital di daerah rawan gempa dan juga dengan kondisi tanah tidak stabil.

Sejumlah keruntuhan konstruksi beresiko tinggi seperti jembatan bentang panjang dan juga gedung ditelusuri. Dari hasil penelusuran, ditemukan banyak ketidakpastian perilaku struktur yang perlu dicermati. Pendekatan probablistik perlu diadopsi lebih luas sedemikian analisis mekanisme keruntuhan struktur dibutuhkan dalam proses perencanaan atau bahkan pada saat program disiapkan. Analisis mekanisme keruntuhan yang dilakukan sejak dari tahapan program akan memberikan informasi untuk langkah-langkah yang akan diambil dalam rangka mereduksi probabilitas keruntuhan getas. Analisis mekanisme keruntuhan juga akan memberikan informasi terkait metode konstruksi dan juga untuk tahapan pemeliharaan dan perbaikan.

**Kata Kunci : Resiko tinggi, pendekatan probablistik, hirarki keruntuhan, mekanisme keruntuhan, elemen fuse, daktail**

## 1. Pendahuluan

Tulisan ini dilatarbelakangi terutama oleh keruntuhan Jembatan Kutai Kertanegara (Kukar) pada 2011 yang lalu. Keruntuhan katastrofik Jembatan Kukar ini dapat disebutkan sebagai keruntuhan terburuk dalam sejarah konstruksi jembatan di Indonesia. Disamping itu masih banyak kejadian keruntuhan-keruntuhan struktur di seluruh Indonesia yang bahkan tidak dilatarbelakangi oleh kejadian *extra ordinary* seperti gempa, serangan angin badai, pembebanan sangat berlebihan atau pencurian elemen bangunan.

Dari perspektif rekayasa struktur keruntuhan tersebut diatas memiliki mekanisme keruntuhan yang bersifat getas (*brittle*) atau dengan bahasa yang lebih sederhana terjadi mendadak tanpa diawali oleh tanda-tanda keruntuhan yang signifikan. Korban jiwa selalu mengikuti keruntuhan konstruksi jenis ini. Hanger runtuh tanpa menunjukkan tanda-tanda yang signifikan, misalnya dalam bentuk deformasi beberapa elemen struktur yang berlebihan sebelum keruntuhan terjadi. Demikian halnya dengan keruntuhan jembatan Kukar. Dari rekaman keruntuhan jembatan-jembatan di Indonesia pada umumnya terjadi akibat kelalaian pada

masa konstruksi atau terjangan bencana alam seperti banjir, gempa dengan atau tanpa tsunami. Jarang sekali terjadi keruntuhan struktur jembatan pada saat lalu lintas masih beroperasi normal.

Walaupun sudah muncul atau sedang dikembangkan beberapa teori yang berusaha menjelaskan penyebab keruntuhan keruntuhan tersebut di atas, tulisan ini tidak dimaksudkan untuk memaparkan atau menambahkan teori-teori baru seputar sebab-sebab keruntuhan. Ulasan pada tulisan ini ditujukan pada langkah-langkah startegis yang perlu diusulkan dalam rangka menghindari keruntuhan getas struktur yang membahayakan keselamatan jiwa manusia di masa yang akan datang. Selaras dengan perkembangan peradaban, keselamatan jiwa manusia menjadi pertimbangan utama dari teknologi konstruksi mulai dari tahapan penyusunan program, perencanaan, konstruksi sampai tahap penggunaan sekaligus pemeliharaan. Terlebih fakta yang ditemukan di semua belahan bumi, tetap ada probabilitas walau sekecil apapun bahwa suatu struktur dimanapun dapat mengalami rusak berat atau bahkan runtuh. Kalau akhirnya suatu struktur tidak dapat diantisipasi sehingga runtuh, paling

tidak jiwa manusia manusia dapat di selamatkan semaksimal mungkin.

## 2. Filosofi Pendekatan Probabilistik

Pendekatan keamanan struktur sejak standarisasi atau kodifikasi perencanaan mulai diaplikasikan sekitar satu abad yang lalu awalnya didominasi oleh pendekatan yang bersifat deterministik. Kekuatan struktur direduksi sedemikian rupa dengan faktor keamanan (sebagai bilangan pembagi dan bernilai lebih dari satu) untuk memastikan struktur tetap aman sepanjang masa layannya. Pendekatan ini juga mengasumsikan bahwa struktur bersifat *steady state* (tidak berubah sepanjang masa layan yang direncanakan). Pendekatan ini bukan tidak tepat, terutama jika diterapkan pada struktur-struktur yang relatif dapat dipahami dan telah banyak dibangun sekaligus digunakan serta diasumsikan relatif tidak menerima gaya-gaya ekstrim pada saat kejadian *extra ordinary*.

Pengertian gaya-gaya ekstrim adalah gaya yang bekerja melampaui batas kapasitas normalnya, dalam istilah yang lebih teknis adalah melampaui batas dalam rentang perilaku elastisnya. Potensi gaya-gaya ekstrim pada tulisan ini tidak terbatas pada gaya-gaya yang bekerja akibat bencana alam semata seperti gempa, angin badai dan longsor tetapi juga gaya-gaya yang tidak terduga dari fenomena yang belum sepenuhnya dipahami oleh perencana pada suatu wilayah, akibat kelalaian dalam penggunaan dan pemeliharaan atau bahkan dari gangguan pencurian elemen struktur.

Gaya-gaya horisontal akibat gempa adalah contoh gaya-gaya ekstrim akibat bencana alam. Walaupun dicoba mengakomodasi gaya-gaya ekstrim dengan pendekatan deterministik ini maka hasilnya struktur menjadi tidak ekonomis dan tetap mengandung spekulasi yang tinggi.

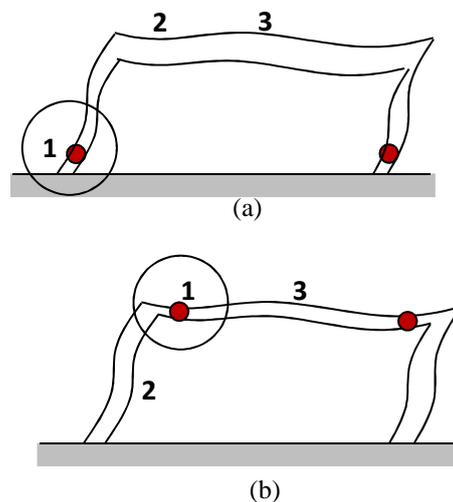
Konsep perencanaan dengan pendekatan probabilistik adalah hasil eksplorasi ilmuwan teknik sipil/rekayasa struktur untuk mendapatkan metode yang lebih rasional yang berusaha mengkuantifikasikan probabilitas gaya-gaya yang bekerja disatu sisi dan kapasitas-kapasitas elemen struktur disisi lainnya. Terlebih bila dikaitkan dengan kemungkinan bekerjanya gaya-gaya ekstrim akibat bencana alam seperti gempa, banjir, badai kebakaran hebat dan lain-lain.

Konsep dari pendekatan probabilistik pada substansinya mempunyai implikasi yang luas karena merubah paradigma para insinyur

perencana dalam menyikapi probabilitas keruntuhan struktur. Melalui pendekatan probabilistik seorang atau tim insinyur menjadi lebih waspada (*aware*) bahwa tetap terdapat probabilitas walaupun sekecil apapun, gaya-gaya yang bekerja selama masa layan struktur melampaui kapasitas atau tahanan elemen struktur yang didisain. Oleh karena itu struktur yang beresiko tinggi dapat saja mengalami keruntuhan getas sehingga perlu dipertimbangkan dari tahapan paling awal dari suatu kegiatan konstruksi. Walaupun akhirnya keruntuhan tidak dapat sepenuhnya dicegah dengan teknologi yang ada, setidaknya diusahakan tidak terjadi keruntuhan dengan mekanisme getas.

Keruntuhan dengan mekanisme daktail menjadi salah satu target perencanaan disamping target perencanaan yang umum seperti kekuatan, stabilitas dan kelayakan (*serviceability*). Dengan pendekatan probabilistik ini simulasi mekanisme keruntuhan struktur justru menjadi bagian dari pekerjaan perencanaan.

Khusus untuk perencanaan struktur antisipasi gempa, konsep ini telah dikodifikasi dalam *Code* atau *standart* dengan terperinci. Simulasi mekanisme keruntuhan dapat dilakukan dengan pilihan-pilihan metode tergantung dari kompleksitas dan resiko struktur. Mulai dari yang rumit sampai dalam prosedur yang telah disederhanakan sedemikian rupa sehingga dapat dilakukan oleh insinyur pemula.



**Gambar 1.** Contoh sederhana hirarki keruntuhan struktur portal akibat gaya lateral dari gempa : (a). getas (b). daktail

Fakta ini menginspirasi para insinyur untuk mengembangkan konsep desain kapasitas yang memanfaatkan sifat daktail material. Tujuan dari desain kapasitas adalah menghasilkan struktur yang mempunyai mekanisme keruntuhan yang

daktail sehingga pada saat gaya-gaya ekstrim bekerja struktur tidak segera runtuh (*collapse*) walau elemen-elemen struktur penyokong konstruksi rusak berat. Elemen material yang daktail tetap dapat berdeformasi walaupun kapasitasnya pada beberapa bagian tereduksi hebat sehingga dapat mendistribusikan gaya-gaya yang bekerja pada bagian-bagian lainnya pada elemen yang masih bugar. Konsep di atas berkembang sejalan dengan tantangan yang makin besar pada usaha untuk mendapatkan struktur yang aman saat gempa kuat terjadi. Konsep ini menjadi filosofi disain bangunan tahan gempa (*seismic resistant buliding*) beberapa dekade terakhir ini.

Gambar 1 menunjukkan hasil dari analisis mekanisme keruntuhan yang menunjukkan hirarki keruntuhan. Gambar 1-a menunjukkan mekanisme keruntuhan struktur portal yang getas. Keruntuhan dimulai pada elemen kolom akan membawa struktur pada mekanisme keruntuhan yang getas. Gambar 1-b menunjukkan mekanisme keruntuhan struktur portal yang daktail dimana kerusakan dimulai pada elemen balok. Dengan membuat komponene ujung-ujung balok menjadi daktail maka struktur secara keseluruhan akan berperilaku daktail atau memiliki mekanisme keruntuhan yang daktail.

Dalam setiap struktur yang daktail terdapat elemen yang bertindak sebagai *fuse* yang berfungsi mendisipasi energi pada saat gaya-gaya ekstrim bekerja. Elemen *fuse* ini yang perlu dibuat daktail atau mempunyai kurva histeresis yang gemuk. Tanpa elemen-elemen fuses ini analisis mekanisme keruntuhan menjadi kehilangan substansinya.

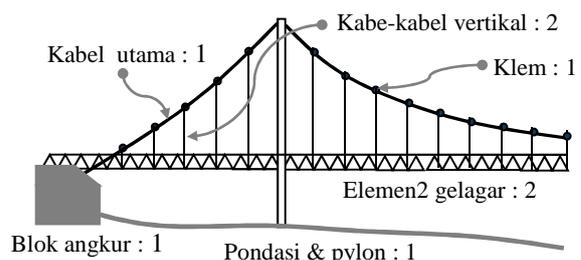
### 3. Analisis Mekanisme Keruntuhan pada Semua Tahapan

Belajar dari kejadian keruntuhan dua struktur yang beresiko tinggi di atas (Jembatan Kukar) maka perlu evaluasi konseptual dan komprehensif terhadap proses perencanaan yang berimplikasi pada seluruh proses kegiatan konstruksi beresiko tinggi. Fakta proses keruntuhan struktur Jembatan Kukar yang mendadak menyiratkan adanya *lack of knowledge* dari disain yang ada sehingga terjadi keruntuhan getas yang banyak memakan korban jiwa. Meminjam terminologi disain struktur antisipasi gempa, struktur boleh saja rusak tetapi tidak langsung *collapse* (runtuh) ketika gaya ekstrim (gaya akibat gempa kuat) karena membahayakan keselamatan jiwa manusia. Konsep ini bertumpu secara filosofis pada

pendekatan yang dipilih, dalam hal ini pendekatan probabilistik. Dengan mengadopsi pendekatan di atas sepenuhnya, analisis perlu lebih antisipatif lagi dengan memperluas analisis sampai kepada analisis mekanisme keruntuhannya.

Sebagai contoh, jembatan panjang adalah struktur yang dapat dikategorikan sebagai beresiko tinggi pada aspek perencanaan, metode konstruksi bahkan pada tahap pemeliharannya. Struktur ini mempunyai perilaku dinamik yang membutuhkan tinjauan lebih dalam serta metode konstruksi dengan prosedur yang lebih ketat selaras dengan bentang bebas struktur ini yang sangat lebar.

Mengulangi lagi pernyataan pada tulisan ini, analisis mekanisme keruntuhan perlu dilakukan pada setiap tahapan proses konstruksi, mulai dari tahapan paling hulu yaitu pada tataran program pada pemberi tugas, tahapan perencanaan, tahapan konstruksi dan yang tidak kalah pentingnya tahapan pemeliharaan.



**Gambar 2.** Contoh hirarki keruntuhan sederhana struktur jembatan gantung

Mekanisme keruntuhan Jembatan Kukar misalnya bersifat sangat getas. Terjadi saat pekerjaan pemeliharaan yang tidak mempunyai *back up* analisis. Karena tidak mempunyai pengetahuan lengkap mengenai perilaku struktur maka langkah-langkah perbaikan yang dilakukan menjadi fatal. Asumsi-asumsi yang digunakan berdasarkan kondisi *steady state* yang merujuk kepada jembatan rangka pada umumnya jelas bertolak belakang dengan perilaku struktur jembatan gantung.

Gambar 2 menunjukkan bahwa elemen-elemen struktur dengan nomor hirarki ke-1 tidak diperkenankan untuk mengalami kegagalan terlebih dahulu jika gaya-gaya ekstrim bekerja karena sebab apapun. Selanjutnya elemen-elemen dengan no hirarki ke 2 dapat mengalami kegagalan lokal sepanjang dapat dijaga

kegagalannya tidak serentak atau dapat terlokalisasi. Elemen-elemen gelagar dapat saja dianggap sebagai elemen yang menempati hirarki ke 3. Elemen-elemen ini dapat saja ditugasi sebagai *fuse* karena material baja pada dasarnya adalah material yang daktil sepanjang sambungan-sambungan anantara elemen juga bersifat daktil atau diatur jauh lebih kuat dari elemen-elemen tersebut.

Pada tahapan paling hulu atau tahapan program pengadaan suatu konstruksi, pemilihan tipe suatu konstruksi membutuhkan informasi yang jelas bagaimana resiko-resiko yang ada yang berkaitan dengan pemilihan tipe-tipe yang terkait dengan struktur. Perlu disusun kategorisasi perlakuan struktur pada semua tahapan yang berhubungan dengan resiko. Semakin besar resiko struktur semakin ketat persyaratan yang harus diterapkan di semua tahapan selanjutnya (perencanaan, pelaksanaan dan pemeliharaan).

Kategorisasi berfungsi memilah-milah level resiko suatu konstruksi sehingga energi yang digunakan pada sistem manajemen resiko menjadi efektif dan efisien. Kategorisasi pada tahapan awal menjadi titik tolak dari manajemen resiko yang menata semua resiko pada semua tahapan. Penataan resiko tentu saja seproporsional dengan level probabilitas resiko yang ada. Contoh sederhana dari konsep kategorisasi telah diterapkan secara terbatas di lingkungan Pemda DKI dengan membentuk Tim Penasehat Keamanan Bangunan (TPKB) yang tugasnya memberi pertimbangan kepada dinas teknis terkait untuk konstruksi *high rise building* yang beresiko tinggi dan tersebar di banyak tempat di ibu kota.

Pada tahapan perencanaan, standar perencanaan yang dikeluarkan otoritas memegang peranan yang penting. Berkaitan dengan struktur beresiko tinggi untuk kasus Indonesia, baru standar perencanaan struktur antisipasi gempa yang sudah mempunyai sejarah kodifikasi yang lumayan panjang walaupun masih terkonsentrasi pada struktur bangunan gedung. Dari pengamatan penulis, penggunaan Standar Nasional Indonesia (SNI) untuk gempa pun masih terkonsentrasi di kota-kota besar saja, itupun masih banyak ditemukan *misleading* atau bahkan dengan konsep yang keliru dalam penggunaannya.

Bangunan-bangunan tinggi di DKI diwajibkan merujuk kepada SNI gempa yang sudah mengadopsi analisis mekanisme keruntuhan. Dalam SNI gempa, analisis mekanisme keruntuhan telah disederhanakan dalam bentuk faktor modifikasi  $R$ ,  $\Omega$  dan  $C_d$  dibarengi dengan

persyaratan *detailing* yang terkait penggunaan parameter-parameter di atas. Perlu digaris-bawahi disini, parameter-parameter tersebut di atas diperoleh dari rekaman perilaku struktur pada saat gempa di negara-negara referensi SNI terutama Amerika Serikat. Analisis mekanisme keruntuhan merupakan usaha untuk memberikan konfirmasi analisis berdasarkan metode yang rasional.

Dari usaha-usaha untuk melakukan analisis mekanisme keruntuhan inilah muncul beragam model sendi plastis. Idealnya analisis dilakukan selaras dengan gaya-gaya ekstrim yang bekerja yang banyak dalam bentuk dinamik dan siklik. Walaupun demikian, karena para insinyur fokus pada nilai-nilai maksimum maka analisis disederhanakan menjadi statis dan inkremental atau yang dikenal dengan *Pushover*. Dengan mengasumsikan beberapa bagian sendi-sendi plastis, nilai daktilitas struktur dapat diperoleh dari analisis *Pushover*.

Untuk kasus-kasus khusus yang sering tidak diatur dalam standar, pertimbangan atau supervisi ahli menjadi sangat menentukan. Dalam standar yang ada, kasus-kasus khusus yang tidak dapat disederhanakan untuk pendekatan yang bersifat umum terdapat klausul yang merujuk pertimbangan ahli atau dokumen-dokumen hasil penelitian yang terkait. Untuk kasus-kasus struktur yang memerlukan teknologi tinggi yang umumnya juga beresiko tinggi pertimbangan ahli juga meliputi paparan resiko-resiko sedetail mungkin kepada pemberi tugas baik pemerintah, swasta dan masyarakat pada tahapan yang paling awal atau tahapan program. Walaupun pemberi tugas berketetapan untuk membangun konstruksi beresiko tinggi, analisis mekanisme keruntuhan harus dilakukan pada setiap tahapan selanjutnya dengan persyaratan dan prosedur yang lebih ketat sejalan dengan resiko yang dipikul.

Dari paparan di awal di atas, perencanaan konstruksi beresiko tinggi sudah seharusnya menggunakan pendekatan probabilitas. Analisis mekanisme keruntuhan menjadi konsekuensi logis dari pendekatan ini. Dari tahapan perencanaan yang strategis inilah skenario-skenario pembebanan yang paling mungkin disimulasikan mekanisme keruntuhannya dengan terlebih dahulu mendefinisikan elemen-elemen yang bertindak sebagai *fuse*. Simulasi juga harus meninjau degradasi integritas struktur selama masa layannya. Dengan mengadopsi pendekatan pada standar struktur antisipasi gempa, analisis mekanisme keruntuhan dapat diadopsi dan dimodifikasikan menjadi pilihan-pilihan metode analisis selaras

dengan kompleksitas struktur dan level risikonya.

Untuk kasus jembatan gantung misalnya, salah satu skenario pembebanan adalah beban berlebih yang dapat disimulasikan mengikuti pola *Pushover*. Untuk simulasi awal, elemen-elemen gelagar dapat dianggap sebagai *fuse* dengan mengasumsikan sambungan mempunyai perilaku daktail.

Hasil simulasi akan memberikan informasi penting bagi pemberi tugas untuk memilih jenis struktur. Jika struktur beresiko tinggi ini tetap dipilih maka simulasi yang lebih lengkap dapat dilakukan pada tahapan selanjutnya yaitu tahapan perencanaan, konstruksi dan penggunaan/pemeliharaan dalam rangka meminimalisir resiko-resiko.

Skenario pembebanan pada tahapan perencanaan menggunakan model struktur yang utuh. Skenario pembebanan pada tahapan konstruksi menggunakan model-model struktur parsial sesuai dengan metode konstruksi yang dipilih. Pembebanan gaya-gaya ekstrim juga bisa berbeda.

Jembatan Kukar runtuh saat kegiatan dalam rangka pemeliharaan. Dari informasi yang diperoleh, jembatan mengalami perubahan konfigurasi geometri dan juga degradasi struktur yang tidak terpantau. Fakta ini menunjukkan bahwa model struktur pada tahapan perencanaan harus dimodifikasi sesuai informasi tambahan dari lapangan untuk simulasi mekanisme keruntuhan pada suatu langkah-langkah perbaikan. Beban-beban ekstrim dan degradasi-degradasi yang mungkin perlu diperhitungkan dalam model simulasi.

Analisis mekanisme keruntuhan dapat juga digunakan untuk mengembangkan sistem disipasi energi yang efektif terutama untuk mengantisipasi gaya-gaya ekstrim yang bekerja. Selain gaya-gaya dari luar, degradasi struktur juga dapat memicu termobilisasinya gaya-gaya ekstrim. Elemen-elemen *fuse* seperti sendi-sendi plastis, link atau dalam bentuk instrumen lainnya dapat dikembangkan dari kebutuhan pendisipasian energi yang diperoleh dari simulasi-simulasi mekanisme keruntuhan.

## 5. Kesimpulan dan Saran

### 5.1. Kesimpulan

Setelah melakukan pendalaman yang bersifat konseptual maka dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut ini.

1. Konstruksi beresiko tinggi terutama terkait dengan perilaku strukturnya yang tidak mudah diprediksi. Umumnya adalah perilaku dinamik dari struktur. Disamping itu konstruksi beresiko tinggi umumnya dibangun dengan biaya gigantik dan waktu yang relatif lama tetapi memegang peranan sangat vital sebagai sarana ataupun prasarana.
2. Sejalan dengan muncul ketidakpastian perilaku struktur maka porsi pendekatan probabilistik perlu mendapat porsi yang lebih besar dalam analisis dengan target utama adalah keselamatan jiwa pengguna. Analisis mekanisme keruntuhan perlu dijejaki dan dikodifikasi, termasuk metode penyederhanaannya. Simulasi-simulasi mekanisme keruntuhan sebagai bagian dari analisis mekanisme keruntuhan dilakukan berdasarkan skenario-skenario pembebanan maupun degradasi struktur.
3. Dari analisis mekanisme keruntuhan dapat dikembangkan usaha-usaha yang dapat mereduksi probabilitas keruntuhan getas antara struktur yang lebih daktail sedemikian keruntuhan getas dapat dihindari. Usaha-usaha tersebut adalah :
  - a. Mengembangkan daktilitas struktur dengan mengatur elemen-elemen yang bertugas mendisipasi energi.
  - b. Mereduksi ketidakpastian perilaku dinamisnya
  - c. Merubah jenis struktur
4. Analisis mekanisme keruntuhan juga menjadi informasi awal untuk pengembangan perangkat pendisipasi energi dalam rangka meningkatkan daktilitas struktur yang merupakan kunci utama untuk menghindari keruntuhan getas yang berpotensi sangat besar memamkan korban jiwa.

### 5.2. Saran

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan yang lebih luas berikut inventarisasi konstruksi beresiko tinggi di seluruh Indonesia untuk mendapat gambaran yang lebih menyeluruh.
2. Analisis-analisis mekanisme keruntuhan perlu dimasukkan sebagai prasyarat konstruksi menggunakan kombinasi dari pengujian-pengujian dan analisis rasional yang telah diterima umum maupun dapat dipertanggung jawabkan. .
3. Penyederhanaan analisis dapat dilakukan sepanjang dapat diterima secara umum atau dipertanggung jawabkan secara rasional.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Choi, Dong-Ho., *Simplified analysis method for towers of four-span suspension bridges* Proceedings of The 6th Civil Engineering Conference in Asia Region (CECAR-6)
2. Mangkusubroto, Sindur, P., 2013, *Collapse of Analisisi of Mahakam II Bridge* Proceedings of The 6th Civil Engineering Conference in Asia Region (CECAR-6).
3. Vaza, Herry., dan Suhendra, Idwan, 2002, *Inovasi Teknik Konstruksi Dalam Optimalisasi Pembangunan Jembatan Mahakam-2* Prosiding konferensi regional teknik jalan ke-6 di Denpasar 18-19 Juli 2002.