



Penerapan Sistem Kontrol Struktur pada Jembatan

R



PENERAPAN SISTEM KONTROL STRUKTUR PADA JEMBATAN

Dina Rubiana Widarda, Ediansjah Zulkifli
Desember, 2013

Cetakan Ke-1 2013, 136 halaman

© Pemegang Hak Cipta Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan

Foto Cover : dokumentasi Pusjatan. Inset (kiri ke kanan) : dokumentasi Pusjatan,
<http://kuadenan.blogspot.com>.

No. ISBN : ISBN 978-602-8256-39-1

Kode Kegiatan : 11-PPK2-001-107-813

Kode Publikasi : IRE-TR-106/ST/2013

Kata kunci : vibrasi, kontrol, pasif, aktif, semiaktif, hibrid

Ketua Program Penelitian:

Redrik Irawan, Puslitbang Jalan dan Jembatan

Ketua Sub Tim Teknis:

Lanneke Tristanto, Universitas Katolik Parahyangan

Naskah ini disusun dengan sumber dana APBN Tahun 2013, pada Paket Pekerjaan Penyusunan Naskah Ilmiah Teknologi Bangunan Atas Jembatan Bentang Panjang (4 Naskah Ilmiah).

Pandangan yang disampaikan di dalam publikasi ini tidak menggambarkan pandangan dan kebijakan Kementerian Pekerjaan Umum, unsur pimpinan, maupun institusi pemerintah lainnya.

Kementerian Pekerjaan Umum mendorong perعتakan dan memperbanyak informasi secara eksklusif untuk perorangan dan pemanfaatan nonkomersil dengan pemberitahuan yang memadai kepada Kementerian Pekerjaan. Pengguna dibatasi dalam menjual kembali, mendistribusikan atau pekerjaan kreatif turunan untuk tujuan komersil tanpa izin tertulis dari Kementerian Pekerjaan Umum.

Diterbitkan oleh:

Kementerian Pekerjaan Umum

Badan Penelitian dan Pengembangan

Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan

Jl. A.H. Nasution No. 264 Ujungberung - Bandung 40293

Pemesanan melalui:

Perpustakaan Puslitbang Jalan dan Jembatan

info@pusjatan.pu.go.id



Puslitbang Jalan dan Jembatan

Pusat Litbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan) adalah institusi riset yang dikelola oleh Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum Republik Indonesia. Lembaga ini mendukung Kementerian PU dalam menyelenggarakan jalan di Indonesia dengan memastikan keberlanjutan keahlian, pengembangan inovasi, dan nilai-nilai baru dalam pengembangan infrastruktur.

Pusjatan memfokuskan dukungan kepada penyelenggara jalan di Indonesia, melalui penyelenggaraan litbang terapan untuk menghasilkan inovasi teknologi bidang jalan dan jembatan yang bermuara pada standar, pedoman, dan manual. Selain itu, Pusjatan mengemban misi untuk melakukan advis teknik, pendampingan teknologi, dan alih teknologi yang memungkinkan infrastruktur Indonesia menggunakan teknologi yang tepat guna.

KEANGGOTAAN TIM TEKNIS & SUB TIM TEKNIS

Tim Teknis

Prof.(R).DR. Ir. M.Sjahanulirwan, MSc.
Ir. Agus Bari Sailendra, MT
Ir. I Gede Wayan Samsi Gunarta, M.Appl.Sc
DR. Ir. Dadang Mohammad, M.Sc
DR. Ir. Poernornosidhi, M.Sc
DR. Drs. Max Antameng, MA
DR. Ir. Hedy Rahadian, M.Sc
Ir. Iwan Zarkasi, M.Eng.Sc
Prof.(R).Ir. Lanneke Tristanto
Prof.(R).DR. Ir. Furqon Affandi, M.Sc
Ir. GJW Fernandez
Ir. Joko Purnomo, MT
Ir. Soedarmanto Darmonegoro
Ir. Lanny Hidayat, M.Si
Ir. Moch. Tranggono, M.Sc
DR. Ir. Djoko Widayat, M.Sc
Redrik Irawan, ST., MT.
DR. Ir. Didik Rudjito, M.Sc
DR. Ir. Triono Jumono, M.Sc
Ir. Palgunadi, M.Eng, Sc
DR. Ir. Doni J. Widiatono, M.Eng.Sc
Ir. Teuku Anshar

Ir. Gandhi Harahap, M.Eng.Sc
Ir. Yayan Suryana, M.Sc
DR. Ir. Rudy Hermawan, M.Sc
Ir. Saktyanu, M.Sc
Ir. Herman Darmansyah
Ir. Rachmat Agus
DR. Ir. Hasroel, APU
DR. Ir. Chaidir Amin, M.Sc
Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE. Ph.D
Kemas Ahmad Zamhari
Dr. Ir. Mochammad Amron, M.Sc
Djoko Mujanto

Sub Tim Teknis

Prof.(R).Ir. Lanneke Tristanto
Ir. Rahadi Sukirman
Herbudiman, ST., MT.
Abinhot Sihotang, ST., MT.
Ir. Samun Haris, MT.
DR. Made Suwangga
DR. Aswandy
Ir. Ahmad Yunaldi

Kata Pengantar

Selain aspek kekuatan, jembatan juga memiliki aspek estetis yang tidak kalah pentingnya. Kadangkala kedua aspek ini tidak berjalan seiring, misalnya jembatan yang kaku (memenuhi syarat lendutan dan getaran) dipenuhi oleh dimensi jembatan yang besar sebaliknya jembatan yang ramping akan sensitif terhadap getaran. Penerapan sistem kontrol pada jembatan merupakan salah satu cara cerdas untuk mengatasi masalah getaran pada jembatan. Dengan sistem kontrol, getaran pada jembatan dapat diatasi tanpa kehilangan unsur estetis dari struktur jembatan.

Masalah getaran dapat dipertimbangkan sejak dari perencanaan struktur ataupun jembatan yang sudah eksisting. Dengan semakin pesatnya ilmu dan teknologi di bidang material, telah banyak dikembangkan perangkat maupun sistem untuk mengurangi getaran pada struktur. Buku ini menyajikan pengetahuan dasar mengenai sistem kontrol.

Diharapkan naskah ilmiah ini dapat memberikan kontribusi terhadap pemahaman dasar terhadap sistem kontrol pada struktur jembatan.

Bandung, Desember 2013

Dina Rubiana Widarda
Ediansjah Zulkifli
Penyusun

Daftar Isi

Puslitbang Jalan dan Jembatan.....	iii
Kata Pengantar	v
Daftar Isi.....	vi
Daftar Gambar	vii
Daftar Tabel.....	xi
Pendahuluan	13
Statik, dinamik dan dinamika struktur.....	18
Sistem dinamik berderajat kebebasan tunggal.....	20
Kontrol pada struktur.....	28
Istilah.....	31
Sistem Kontrol pada Struktur	33
Sistem Kontrol Pasif.....	35
Sistem Kontrol Aktif.....	48
Sistem Kontrol Semiaktif.....	61
Sistem Kontrol Hibrida.....	63
Elemen Peredam dan Aktuator	65
Peredam Pasif.....	67
Peredam semiaktif.....	106
Aktuator.....	112

**Penerapan Sistem Kontrol pada Struktur Jembatan..... 117**

Nilai batas kecepatan struktur akibat beban impuls dan beban durasi.....119

Batas layan dan kondisi batas lain untuk jembatan jalan raya dan jembatan penyeberangan.....119

Batas layan dan kondisi batas lain untuk jembatan kereta api..... 122

Penutup 125**Daftar Pustaka 130**

Daftar Gambar

Gambar 1.1: Pemodelan dan freebody dari sistem berderajat kebebasan tunggal.[Widarda, 2009].....20

Gambar 1.2: Respons terhadap pembebanan resonansi $r=1$ untuk sistem tak teredam dan teredam.[Clough and Penzien, 1993]..... 24

Gambar 1.3: Respons terhadap pembebanan resonansi $r=1$ pada berbagai redaman.[Clough and Penzien, 1993]25

Gambar 1.4: (a) Spektrum beban luar dan (b) respons struktur26

Gambar 1.5: Karakteristik dan tipe pembebanan: (a) harmonis; (b) kompleks; (c) impuls; (d) durasi panjang.[Clough and Penzien, 1993]26

Gambar 1.6: Kontrol pasif pada struktur, TMD [Weber et al., 2006].29

Gambar 1.7: Kontrol aktif pada struktur [Soong, 1990],29

Gambar 1.8: Strategi kontrol pada struktur [Christenson, 2001].30

Gambar 1.9: Elemen peredam, 31

Gambar 1.10: Peredam getaran	32
Gambar 2.1: Pasif kontrol pada struktur.....	34
Gambar 2.2: Pemodelan sistem utama dan TMD sebagai sistem dengan dua derajat kebebasan.....	39
Gambar 2.3: Tuned mass damper.....	41
Gambar 2.4: Tuned mass damper [Maurer, 2011].....	44
Gambar 2.5: Penerapan TMD pada jembatan pejalan kaki dan sepeda di Dietikon dekat Zürich [Mehlhorn, 2007].....	44
Gambar 2.6: Tuned mass damper dengan pendulum [Maurer, 2011]	45
Gambar 2.7: Skema sloshing TLD dan tabung fluida yang dikopel dengan struktur utama [Weber et al., 2006].....	46
Gambar 2.8: Redaman dengan fluid.	47
Gambar 2.9: Skema kontrol aktif pada struktur [Chu et al., 2005].	48
Gambar 2.10: Algoritma desain dan pemodelan struktur dengan aktif kontrol [Soong, 1990].	51
Gambar 2.11: Kontrol semiaktif pada struktur [Ji et al., 2005].	62
Gambar 2.12: Skema kontrol semiaktif pada struktur [Chu et al., 2005].....	62
Gambar 2.13: Kontrol semiaktif pada struktur [Christenson, 2001].....	63
Gambar 2.14: Adaptive tuned mass damper [Maurer, 2011].....	63
Gambar 2.15: Skema kontrol hybrid pada struktur [Chu et al., 2005]	64
Gambar 3.1: Redaman linier viskous.....	68
Gambar 3.2: Redaman linier viskous pada kecepatan rendah akibat gesekan.....	68
Gambar 3.3: Viscous damping device [Connor, 2001].....	71

Gambar 3.4: Perangkat redaman viskous.....	71
Gambar 3.5: Pengukuran perangkat redaman viskous [Weber et al., 2006].....	73
Gambar 3.6: Energi rata-rata setara redaman viskos nonlinear [Weber et al., 2006].....	76
Gambar 3.7: Perilaku material viskoelastis [Weber et al., 2006].	77
Gambar 3.8: Peredam viskoelastik [Connor, 2001]	79
Gambar 3.9: Mesin tes bantalan tunggal [Aiken et al., 1989].....	79
Gambar 3.10: Histeretic loop dari bantalan karet berbaut [Aiken et al., 1989].....	80
Gambar 3.11: Desain sistem bantalan yang diusulkan oleh [Aiken et al., 1989].	82
Gambar 3.12: Gesekan Coulomb: a) lintasan gaya-peralihan, b) lintasan gaya-kecepatan c) lintasan gaya-peralihan Coulomb friction damper [Weber, 2002].....	83
Gambar 3.13: Limited Slip Bolted Joints [Pall et al., 1980].....	85
Gambar 3.14: X-braced Friction Damper [Pall and Marsh, 1982].....	86
Gambar 3.15: Sumitomo Friction Damper [Aiken and Kelly, 1990].....	87
Gambar 3.16: Energy Dissipating Restraint (EDR) [Nims et al., 1993].....	88
Gambar 3.17: Redaman struktur: a) gaya peralihan b) gaya kecepatan.....	89
Gambar 3.18: Hysteretic damping: a) hubungan tegangan regangan b) perilaku redaman hysteretic c) penyederhanaan perilaku redaman hysteretic.....	91

Gambar 3.19: Ideal elastik · plastik perangkat redaman [Jones, 2001].....	91
Gambar 3.20: X-shaped Plate Damper	92
Gambar 3.21: Perilaku seperti aktuator: Diagram tegangan-regangan dan profil transformasi temperatur untuk perubahan regangan-kekakuan pada kondisi tegangan konstan [Weber et al., 2006].....	97
Gambar 3.22: Shape memory effect: Diagram tegangan-regangan dan profil transformasi temperatur untuk perubahan regangan-kekakuan pada kondisi pemulihan bebas dan tertahan.....	98
Gambar 3.23: Perilaku superelastic: Diagram tegangan-regangan dan profil transformasi temperatur:	99
Gambar 3.24: Martensitic hysteretic: Diagram tegangan-regangan dan profil transformasi temperatur.	99
Gambar 3.25: Hysteretic loop untuk: a) superelastic SMA b) Martensitic hysteretic	100
Gambar 3.26: Desain batang torsi.....	101
Gambar 3.27: Diagram tegangan regangan digunakan untuk model peredam bilinear [Witting and Cozzarelli, 1992].....	104
Gambar 3.28: Putaran gaya perpindahan [Witting and Cozzarelli, 1992].	105
Gambar 3.29: Skema variable orifice damper [Spencer, 2002].....	106
Gambar 3.30: Pemasangan variable orifice damper pada jembatan Interstate Highway I-35 [Spencer, 2002].....	107
Gambar 3.31: MR damper [Weber et al, 2006].....	108
Gambar 3.32: Peredam MR [Spencer and Nagarajaiah, 2003]	109

Gambar 3.33: Peredam MR di jembatan Dongting [Chen et al., 2003].....	110
Gambar 3.34: Adaptive cable damper (kontrol semiaktif) pada jembatan Ijssel, Netherland [Maurer, 2005]. a) Kondisi terpasang dengan selubung, b) elemen peredam, c) Panel surya sebagai sumber energi untuk pembangkit redaman,	111
Gambar 3.35: Agregat hidrolik terpasang pada rangka baja [Weber et al., 2006].....	114
Gambar 3.36: Skema piezoelektrik satu lapis [Piezomechanik,]	114
Gambar 3.37: Skema aktuator piezo [Piezomechanik,]	116
Gambar 4.1: Peralihan vertikal maksimum δ untuk jembatan kereta api dengan 3 atau lebih bentang diatas tumpuan sederhana terkait kecepatan vertikal ijin $b_v = 1\text{m/s}^2$ pada gerbong dengan kecepatan $V[\text{km/jam}]$ [EN, 2001].....	124

Daftar Tabel

Tabel 1.1: Jembatan jalan raya dengan sistem kontrol.	19
Tabel 1.2: Perbandingan antara sistem statik dan sistem dinamik [Widarda, 2009]	20
Tabel 2.1: Desain optimal berdasarkan beban kerja.	43
Tabel 4. 1: Nilai batas respons kecepatan jembatan dalam mm/dt [SN, 2004].	119
Tabel 4.2: Percepatan maksimum yang disyaratkan [EN, 2001] untuk jembatan penyeberangan dan jembatan jalan raya yang memiliki jalur pejalan kaki.	121

Tabel 4.3: Tingkat kenyamanan menurut [VDI, 2010] 122

Tabel 4.4: Tingkat kenyamanan berkendara menurut [DIN, 2003] 122



1

Pendahuluan



Pendahuluan

Jembatan sebagai suatu struktur yang sangat penting dalam menunjang kehidupan manusia tentulah harus didesain dengan sangat hati-hati dan memenuhi kaidah-kaidah perencanaan yang berlaku. Jembatan merupakan struktur yang harus bertahan pada saat bencana alam terjadi, untuk menjalankan fungsi distribusi baik distribusi manusianya sendiri maupun distribusi kebutuhan-kebutuhan manusia. Selain memenuhi kriteria-kriteria kekuatan perencanaan pada saat kondisi batas (ultimit) maupun pada saat layan (service), respons vibrasi struktur jembatan juga merupakan hal yang penting untuk ditinjau. Selain memenuhi kriteria kekuatan, struktur jembatan juga harus nyaman pada saat digunakan, dimana hal ini seringkali berhubungan dengan respon struktur pada saat bervibrasi.

Vibrasi yang terjadi pada struktur jembatan bisa diakibatkan oleh banyak hal, yang dikenal dengan istilah sumber eksitasi. Sumber eksitasi pada jembatan pada saat layan

terutama berasal dari kendaraan yang lewat (beban bergerak), angin, pejalan kaki, ataupun beban-beban lainnya. Sumber eksitasi ini dikenal sebagai *ambient excitation*. Vibrasi lainnya pada jembatan bisa juga diakibatkan oleh beban gempa, dimana struktur bervibrasi akibat adanya pergerakan dari tanah *ground motion acceleration*.

Beberapa alasan mengapa kita harus mengurangi vibrasi adalah:

- Kegagalan (*Failure*)
Kegagalan struktur akibat getaran dapat terjadi karena terjadinya regangan yang berlebihan akibat beban transien (seperti pada saat terjadi gempa), ketidakstabilan akibat kondisi operasional khusus (flutter pada jembatan akibat beban angin) atau lelah (*fatigue*) pada bagian mekanis mesin.
- Kenyamanan (*Comfort*)
Getaran dari berbagai sumber dapat menimbulkan ketidaknyamanan. Beberapa contohnya adalah getaran pada helicopter, suspensi mobil, gedung yang bergoyang akibat angin.
- Pengoperasian alat yang presisi
Dalam pengoperasian alat yang memiliki presisi tinggi, persyaratan untuk getaran sangatlah ketat. Alat yang memiliki presisi tinggi ini khususnya terdapat pada alat yang melibatkan sistem optik, seperti peralatan mesin presisi tinggi, DVD readers dan telescope.

Pada sistem struktur eksisting yang mengalami getaran yang melewati batas, terdapat beberapa cara untuk mereduksi getaran. Hal ini tergantung dari masalah yang terjadi. Hal yang paling sering dilakukan adalah:

1. Penambahan kekakuan

Penambahan kekakuan akan mengubah frekuensi resonansi dari struktur menjadi di atas frekuensi eksitasi.

2. Penambahan redaman

Redaman akan mereduksi puncak resonansi dengan mendisipasi energi getaran.

Redaman dapat dibuat secara pasif dengan peredam fluida, elastomer, elemen histeretik atau mengubah energi kinetik menjadi peredam getaran dinamik. Dapat pula menggunakan transducer sebagai konverter energi untuk mengubah energi getaran menjadi energi listrik yang disimpan atau didisipasi pada jaringan listrik.

Saat ini terdapat perangkat semiaktif (atau disebut juga semipasif) yang terdiri dari perangkat pasif dengan properti yang dapat dikontrol. Contoh yang dikenal adalah cairan magneto-rheologi dan piezoelectric transducer dengan jaringan peubah listrik.

Pada kasus dimana diperlukan kinerja yang tinggi, diperlukan kontrol aktif (*active control*) [Preumont, 2002]. Sistem ini melibatkan sensor (regangan, percepatan, kecepatan, gaya, ...), aktuator (gaya, inersia, regangan, ...) dan algoritma kontrol (feedback atau *feedforward*).

Aspek penting dalam desain sistem kontrol aktif adalah konfigurasi dari sensor dan aktuator, dan jaminan stabilitas dan keandalannya (*robustness*). Hal lainnya adalah kebutuhan akan daya yang akan menentukan seberapa besar aktuator dan juga biaya yang diakibatkannya.

Alternatif untuk sistem kontrol adalah sistem kontrol hibrida, yang mengkombinasikan kelebihan dari aktif kontrol dan pasif kontrol untuk menghasilkan kinerja terbaik dengan biaya yang rendah.

3. Penambahan isolator

Isolasi akan mencegah perambatan getaran pada elemen sensitif dari struktur. Penambahan elemen isolator sudah lazim digunakan pada struktur untuk mengisolasi struktur dari percepatan tanah pada kasus gempa (dikenal dengan *seismic isolator*). Elastomeric bearing, sliding

isolator, hydraulic coupling and damping element dan expansion joint adalah beberapa contoh *seismic isolator* yang sudah lazim digunakan [Maurer, 2013].

Penerapan sistem kontrol telah dilakukan pada banyak jembatan, diantaranya ditunjukkan pada *Tabel 1.1*. Perancangan sistem kontrol tergantung dari sumber eksitasi dan karakteristik dari jembatan.

Statik, dinamik dan dinamika struktur

Statika berkaitan dengan gaya pada struktur atau elemen struktur pada kondisi diam. Analisis pada sistem statik melibatkan persamaan yang tidak bergantung waktu. Sistem persamaan statik dapat berupa persamaan linier atau persamaan nonlinier.

Dinamik berkaitan dengan gerakan dari struktur/elemen struktur. Dinamik dapat diartikan secara sederhana sebagai berubah *terhadap waktu*. Karenanya beban dinamik adalah beban yang baik besaran, arah dan posisinya berubah terhadap waktu. Begitu juga respons struktur akibat beban dinamik seperti tegangan dan peralihan, akan berubah terhadap waktu.

Perbedaan mendasar antara masalah statik dan dinamik terdapat pada keseimbangan gaya yang terjadi. Pada sistem statik, keseimbangan gaya didapat dari gaya luar p yang dilawan oleh momen dan gaya geser internal. Pada sistem dinamik, keseimbangan didapat dari gaya dalam, gaya luar dan gaya inersia. Gaya inersia didapat dari massa dikalikan percepatan.

Dinamika struktur memiliki arti yang lebih luas dari getaran atau vibrasi. Dinamika struktur menganalisis tegangan dan deformasi pada sembarang struktur akibat sembarang beban dinamik.

Tabel 1.1: Jembatan jalan raya dengan sistem kontrol.

Nama Jembatan	Panjang	Beban Kontrol	Sistem Kontrol
Yichang Suspension bridge, China	960m	Flutter	TMD
The Puente Oriente elevated bridge, Mexico	500m	Gempa	TMCS
Trans-Tokyo Bay Crossing bridge, Japan	240m	Flutter	TMD
Highway I-35 bridge, USA	580m	Gempa	SADS
Milau Bridge, France	342m	Gempa	Active Tendon
Qiantang River Bridge, China	1453m	Gempa	MR
Yellow River Highway Bridge, China	220m	Gempa	MR
Sutong Bridge, China	1088m	Gempa	MR
Bayview Bridge, USA	274m	Gempa	VFD
Guozigou Bridge, China	360m	Gempa	VFD
Shanghai Yangtze River Bridge, China	730m	Gempa	VFD
Lupu Bridge, China	550m	Gempa	VFD
Egongyan Bridge, China	600m	Gempa	VFD
Donghai Bridge, China	420m	Gempa	VFD
Jiangyin Bridge, China	1385m	Gempa	VFD
Nanjing 3rd Bridge, China	648m	Gempa	VFD
Stromaund Bridge, Swedia	182m	Angin, gempa	AMD
Shipsaw bridge, Canada	183m	Gempa	VFD
Cape Girardeau bridge, USA	204,5m	Gempa	VFD
<p>TMD=Tuned mass damper, TMCS=Tuned mass control system, SADS=Semi-active damper system, MR=Magnetorheological damper, VFD=Viscous fluid damper, AMD=Active mass damper</p>			