

Aplikasi Tendon Aktif Berdasarkan Logika Fuzzy Pada Perkuatan Jembatan Rangka Baja

Yuskar Lase dan Mohammad Junaedy R.

Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik - Universitas Indonesia

Abstrak

Masalah utama dalam penurunan kemampuan layan dari suatu jembatan rangka baja adalah interaksi antara beban bergerak dari kendaraan dengan struktur atas jembatan. Salah satu upaya penanganan masalah ini adalah melalui suatu penambahan sistem perkuatan tendon pretension eksternal. Tendon pretension, dengan konfigurasi poligonal, kingpost dan horisontal dirancang untuk berperilaku sebagai kontrol aktif yang dilengkapi aktuator. Berdasarkan teknik adaptive control, algoritma fuzzy logic digunakan untuk mengoperasikan pengontrolan tendon pada jembatan dalam sistem Fuzzy Logic Control Feedback (FLC feedback), dimana perubahan gaya kontrol dapat dirancang beradaptasi secara proporsional terhadap lendutan. Dari hasil simulasi terhadap berbagai konfigurasi kabel dengan variasi kecepatan baik secara kontinyu maupun tidak kontinyu dari model kendaraan, dan pada variasi tipe tendon yang dipakai, menunjukkan bahwa konfigurasi kingpost memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mereduksi respon lendutan struktur atas dari jembatan, dan menurunkan tegangan tarik pada elemen batang bawah.

Kata Kunci: Jembatan rangka baja, beban bergerak kendaraan, tendon pretension eksternal, kontrol aktif, algoritma fuzzy logic dan FLC feedback.

Abstract

The major problem in serviceability degradation of steel truss bridge is interaction of moving vehicle load with the bridge's upper structure. One of the improvement efforts is to strengthen the bridge system by using external pretension tendon. Pretension tendons with polygonal, kingpost and horizontal configuration are designed as an active control equipped with the actuator. Based on adaptive control technique, fuzzy logic algorithm was used to activate the tendon control in the bridge as a Fuzzy Logic Control feedback (FLC feedback) system, where the change of control force can be set to be proportionally adaptable to the displacement. From the simulation with various cable configurations, with various velocities of continuous and discontinuous vehicle models, and various types of tendons, it shows that the Kingpost tendon configuration has a better performance to reduce the displacement of the bridge's upper structure and to minimize tensile stresses at bottom chord element.

Keywords: Steel truss bridge, moving vehicle load, external pretension tendon, active control, fuzzy logic algorithm and FLC feedback

1. Pendahuluan

Respon struktur jembatan rangka terhadap beban dinamik akibat pergerakan kendaraan dapat memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap penurunan kestabilan struktur sebelum akhir masa layan yang diperhitungkan. Pergerakan

kendaraan dengan karakteristik dinamik tertentu pada struktur jembatan tidak hanya berpotensi menimbulkan respon getaran secara global, tetapi juga efek tumbukan secara lokal. Akibat beban siklik yang terjadi selama masa layan juga dapat menimbulkan kerusakan dengan terjadinya akumulasi *fatigue* pada sambungan dan

Dalam mengantisipasi berbagai fenomena kegagalan yang dapat terjadi maka dilakukan penambahan sistem perkuatan pada struktur atas jembatan melalui sistem tendon pretension eksternal, dengan berbagai konfigurasi. Dalam tinjauan masalah dinamik, penggunaan perkuatan tendon pretension saja membuat struktur atas jembatan bersifat lebih kaku dan tidak memiliki kemampuan mengendalikan responnya [2],[12].

Sistem kontrol dinamik digunakan untuk mengendalikan respon struktur melalui perubahan properti massa, kekakuan dan/atau redaman sebagai parameter respon struktur terhadap getaran.

Kontrol pasif, mengendalikan respon struktur tanpa membutuhkan energi eksternal, namun efektivitasnya terbatas akibat perilakunya yang pasif terhadap pergerakan random. Kontrol aktif memiliki kemampuan memodifikasi respon dinamik struktur melalui aktuator dalam sistem kontrol feedback. Kontrol semi-aktif dan hybrid pada struktur dikembangkan untuk meningkatkan stabilitas, dan efektifitas sistem kontrol pasif dan aktif dengan penggunaan suplai energi yang kecil [1],[4],[6],[8].

Untuk mengendalikan respon struktur terhadap pergerakan kendaraan, maka sistem perkuatan tendon pretension dirancang sebagai sistem kontrol aktif dengan menempatkan aktuator pada tendon. Besarnya kemampuan tendon dalam mereduksi respon lendutan struktur jembatan rangka akan sangat bergantung dari konfigurasi tendon dan tipe tendon yang digunakan. Suplai tenaga yang besar dalam setiap aksi pengontrolan, merupakan kendala utama dalam pengontrolan aktif konvensional. Ketika aktuator pada sistem kontrol aktif dirancang untuk dapat mengatur gaya kontrolnya secara proporsional maka suplai tenaga yang dibutuhkan juga dapat disesuaikan terhadap aplikasi gaya kontrol yang harus diberikan [10],[11].

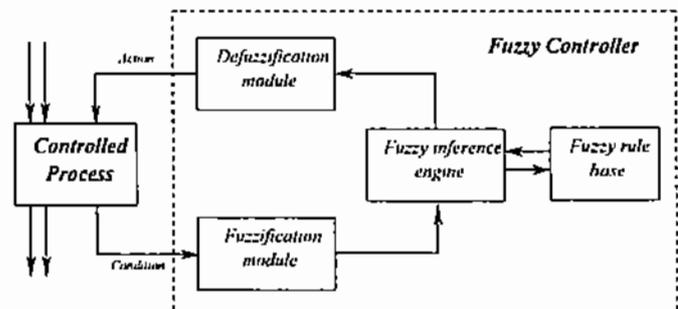
Algoritma *fuzzy logic* pada hakekatnya merupakan suatu sistem pakar khusus yang

bekerja berubah-ubah berdasarkan sifat alami masalah yang ditanganinya dengan suatu pemetaan ruang input ke ruang output secara tepat. Pengontrolan dengan sistem *fuzzy logic control feedback* (FLC feedback) pada aktuator, bekerja berdasarkan suatu rule-base dari hubungan input-output yang dibuat untuk dapat memberikan adaptibilitas pengendalian respon dan kapasitas aktuator yang lebih optimal [5].

Dalam penulisan ini, FLC feedback diterapkan pada beberapa konfigurasi tendon sebagai perkuatan pada struktur jembatan rangka baja tipe Warren truss dalam bentangan bertumpuan sederhana. Sifat kenonlinearan dari pengontrolan ditentukan oleh pengaturan sensitifitas sensor displacement untuk input fuzzy dan membership function yang digunakan untuk input dan output. Untuk mengevaluasi respon lendutan struktur dari interaksi antara aplikasi konfigurasi tendon dengan beban kendaraan, maka simulasi numerik dilakukan dengan Simulink pada software MATLAB[®] dengan menggunakan metode Runge-Kutta Orde 4 sebagai metode integrasi waktu [9],[10],[11].

2. Pengontrolan Dengan Algoritma Fuzzy Logic

Kontroler fuzzy secara umum mengacu pada empat modul sebagai berikut: modul aturan dasar fuzzy (*fuzzy rule base*), modul mesin kesimpulan fuzzy (*fuzzy inference engine*), modul fuzzifikasi (*fuzzification*) dan modul defuzzifikasi (*defuzzification*). Hubungan dari keempat modul tersebut dalam proses kontrol ditunjukkan pada Gambar 1 [5],[9].



Gambar 1. Bentuk Umum Diagram Kontroler Fuzzy

Secara garis besarnya pengontrol fuzzy beroperasi dalam sekali siklus melalui empat tahapan, yaitu:

1. Pengukuran terhadap semua variabel yang menyatakan kondisi yang relevan terhadap proses kontrol.
2. Hasil pengukuran dimasukkan ke dalam fuzzy set yang sesuai untuk memperjelas proses. Tahap ini disebut fuzzifikasi atau pengklasifikasian fuzzy.
3. Pengukuran yang telah difuzzifikasikan, selanjutnya digunakan oleh *inference engine* untuk mengevaluasi kaidah pengontrolan yang tersimpan di dalam fuzzy rule base. Hasil dari evaluasi ini adalah suatu fuzzy set (atau beberapa fuzzy set) yang ditentukan berdasarkan semesta aksi yang memungkinkan.
4. Fuzzy set tersebut selanjutnya dikonversikan ke tahapan akhir siklus dalam suatu nilai tunggal (atau nilai-nilai vektor), yang dalam beberapa pengertian adalah merupakan representasi terbaik dari fuzzy set yang disebut sebagai defuzzifikasi, dan nilai defuzzifikasi menyajikan aksi yang dipakai oleh kontroler fuzzy di dalam siklus kontrol individual.

3. Formulasi Sistem Kontrol Struktur

Persamaan gerak untuk struktur linear dengan sistem MDOF yang mengalami eksitasi dinamik $P(t)$ dan gaya kontrol $U(t)$ diekspresikan sebagai [3,6]:

$$M\ddot{v}(t) + C\dot{v}(t) + Kv(t) = HP(t) + RU(t) \quad (1)$$

dimana M adalah matriks massa C adalah matriks redaman dan K adalah matriks kekakuan. Matriks kolom v adalah vektor displacement struktur akibat beban dinamik. R adalah matriks posisi dan intensitas gaya kontrol yang bekerja, yang berhubungan dengan vektor kontrol input $U(t)$ pada sistem koordinat struktur. H adalah matriks distribusi beban yang berhubungan dengan gaya dinamik $P(t)$ yang bekerja pada sistem koordinat struktur.

Persamaan State-Space

Dalam persamaan state-space, persamaan diferensial orde ke- n dapat dinyatakan dengan persamaan diferensial vektor orde pertama [4],[6].

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2a)$$

$$v(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2b)$$

$x(t)$ adalah vektor keadaan, $u(t)$ adalah vektor masukan dan $v(t)$ adalah vektor keluaran. Lebar vektor input ditentukan oleh jumlah kolom pada matriks B dan D . Lebar vektor output ditentukan oleh jumlah baris pada matriks C dan D .

Bentuk persamaan keadaan untuk persamaan dinamik orde kedua dari struktur terkontrol, ditunjukkan pada persamaan (3a) dan (3b) adalah sebagai berikut:

$$x = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix}; \quad u = \begin{Bmatrix} P(t) \\ U(t) \end{Bmatrix} \quad (3a)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (3b)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ M^{-1}H & -M^{-1}R \end{bmatrix}$$

Sedangkan untuk persamaan keluaran dari sistem diberikan pada persamaan (3c), sebagai berikut:

$$C = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3c)$$

dimana I sebagai matriks identitas.

Pemodelan Beban Kendaraan

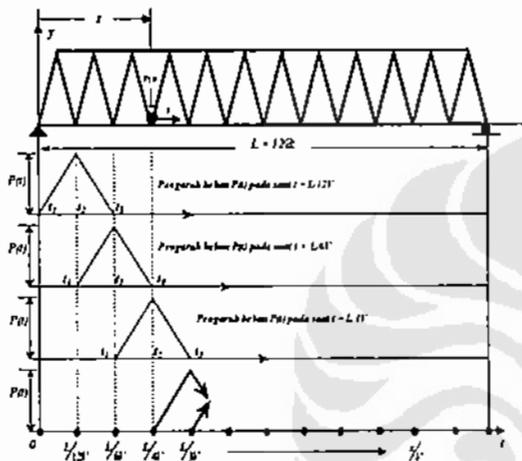
Kendaraan yang bergerak melintasi jembatan, dimodelkan sebagai beban poros tunggal yang melewati tiap nodal dengan kecepatan yang seragam seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2. $P(t)$ menunjukkan intensitas beban pada tiap nodal sebagai fungsi waktu $t(\text{sec})$, $L(\text{m})$ adalah panjang bentangan dengan $@(\text{m})$ sebagai panjang tiap segmen dan $V(\text{m/sec})$ adalah kecepatan kendaraan.

Beban bergerak tersebut digambarkan sebagai garis pengaruh linear pada tiap

nodal, dengan menggunakan persamaan berikut ini [7]:

$$P(t) = \begin{cases} 0 & ; \quad t \leq t_1 \\ P(t-t_1)/(t_2-t_1) & ; \quad t_1 \leq t \leq t_2 \\ P(t_3-t)/(t_3-t_2) & ; \quad t_2 \leq t \leq t_3 \\ 0 & ; \quad t \geq t_3 \end{cases} \quad (4)$$

Blok diagram *Transport Delay* pada SIMULINK digunakan untuk menyusun beban pergerakan kendaraan tersebut sebagai beban kontinu (atau iring-iringan beberapa beban poros tunggal pada selisih jarak 20 m) [9],[10].



Gambar 2. Modelisasi Beban Dinamik Dari Kendaraan Poros Tunggal

Tabel 1. Rule-Base Fuzzy Logic Dengan Input Displacement

IF	THEN
Displacement (v)	Control Force (U)
Variabel input	Variabel output
NVL = Negative Very Large	Pvstr = Possitive very strong
NL = Negative Large	Pstr = Possitive strong
NM = Negative Medium	Pmed = Possitive medium
NS = Negative Small	Pwk = Possitive weak
ZO = Zero	zero = zero
PS = Possitive Small	Nwk = Negative weak
PM = Possitive Medium	Nmed = Negative medium
PL = Possitive Large	Nstr = Negative strong
PVL = Possitive Very Large	Nvstr = Negative very strong.

Pengontrolan Fuzzy

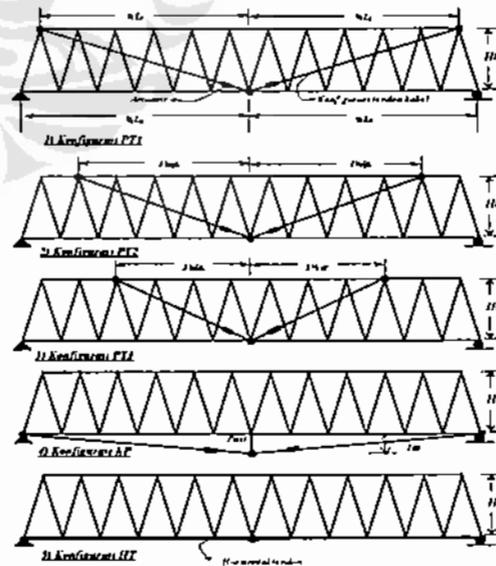
Berdasarkan mekanisme FLC feedback, aktuator akan memberikan penarikan yang proporsional terhadap lendutan pada tengah bentangan. Algoritma pengontrolan Fuzzy logic yang dipakai, disusun berdasarkan rule base fuzzy dengan single input (berupa displacement) dan single output (berupa gaya kontrol) seperti yang pada Tabel 1 [5],[11].

Fungsi keanggotaan variabel input dan output berturut-turut disusun dan diatur berdasarkan fungsi Gauss dan fungsi triangular dalam FIS editor pada MATLAB.

4. Analisis Dan Pembahasan

Simulasi

Jembatan rangka tipe warren-truss dipakai sebagai model dalam analisis dengan mengacu pada spesifikasi yang dipakai oleh Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia. Panjang tiap segmen batang horisontal jembatan adalah @ = 5,0 m dengan total panjang bentangan chord atas $L_1 = 55$ m, chord bawah $L_b = 60$ m dan tinggi rangka $Ht = 6.35$ m.



Gambar 3. Konfigurasi Tendon Kontrol Aktif

Dalam pemodelannya, struktur diperlakukan sebagai sistem rangka bidang dua dimensi (2D) yang memiliki dua DOF pada tiap titik nodal, yaitu translasi dalam arah horisontal dan vertical

Konfigurasi tendon sebagai kontrol aktif diperlihatkan pada Gambar 3. Tipe tendon divariasikan untuk 2x7 dan 2x12 strands. Setiap tendon dengan jumlah strands yang sama ditempatkan pada sisi bagian luar dan dalam dari rangka bidang yang ditinjau.

Blok diagram simulasi dengan SIMULINK terhadap struktur yang terkontrol dan struktur tanpa kontrol terhadap beban yang kontinyu diperlihatkan pada Gambar 4.

Estimasi besarnya gaya prategang awal dapat ditentukan berdasarkan 2/3 dari kapasitas tarik yang diizinkan yang diambil sebesar 0,45 f_{pu} , sedangkan 1/3 sisanya dipakai untuk gaya pengontrolan.

Tabel 2.
Gaya Prategang dan Gaya Kontrol

Tipe tendon	Gaya Prategang	Gaya Kontrol
2x7 strand	700000 N	[-400000 400000] N
2x2 strand	1000000 N	[-700000 700000] N

Beban yang melintasi struktur dengan kecepatan konstan diidealisasikan sebagai kendaraan poros tunggal sebesar 50 ton. Kecepatan kendaraan divariasikan pada 30 km/jam, 40 km/jam, 50 km/jam dan 60 km/jam, dalam simulasi sebagai beban kontinyu dan tidak kontinyu. Range input displacement yang akan dideteksi oleh sensor dalam editor fuzzy diatur sesuai pada Tabel 3. Simulasi numerik dilakukan melalui SIMULINK pada software MATLAB[®] menggunakan Runge-Kutta orde 4 sebagai metode integrasi waktu. Hasil perbandingan respon lendutan $v(t)$, kecepatan $\dot{v}(t)$ and percepatan $\ddot{v}(t)$, ditampilkan dalam bentuk grafik. Reduksi lendutan maksimum dan tegangan-tegangan maksimum elemen dari setiap konfigurasi tendon dan tipe tendon yang digunakan, dihitung dan dibandingkan.

Tabel 3.
Batasan Input Displacement

Tipe beban	Tipe tendon	
	2x7 strands	2x12strands
Tidak kontinyu	[-0.025 0.025] m	[-0.025 0.025] m
Kontinyu	[-0.05 0.05] m	[-0.05 0.05] m

Lendutan Maksimum

Salah satu indikator efektifitas dari aplikasi FLC feedback pada kontrol tendon, adalah ketika lendutan maksimum pada tengah bentangan dapat direduksi dan aplikasi gaya kontrol yang diberikan dapat diadaptasikan secara proporsional. Gambar 5 memperlihatkan salah satu perbandingan respon hasil simulasi dari penerapan konfigurasi Kingpost dengan FLC feedback, dan aplikasi gaya kontrol dari sistem tersebut diperlihatkan pada Gambar 6.

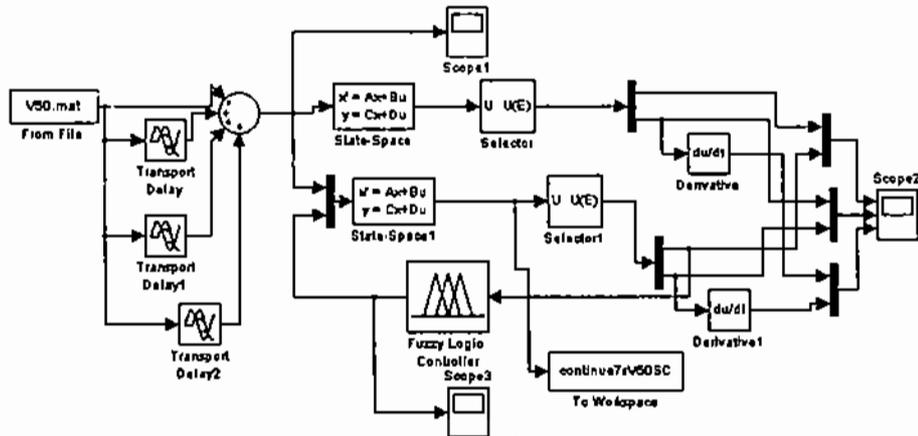
Dari grafik tersebut dapat dibandingkan kondisi ketika struktur menggunakan sistem kontrol tendon yang berbasis FLC feedback dengan struktur tanpa sistem kontrol. Aplikasi kontrol tendon tersebut mampu mereduksi lendutan di tengah bentang, dan gaya kontrol yang bekerja pada tendon sangat proporsional terhadap lendutan jembatan yang mengindikasikan bahwa suplai tenaga yang akan dibutuhkan oleh sistem dapat disesuaikan.

Dari lima konfigurasi tendon yang disimulasikan terhadap variasi kecepatan kendaraan dan tipe tendon yang digunakan, menunjukkan bahwa konfigurasi Kingpost memberikan reduksi lendutan yang lebih besar.

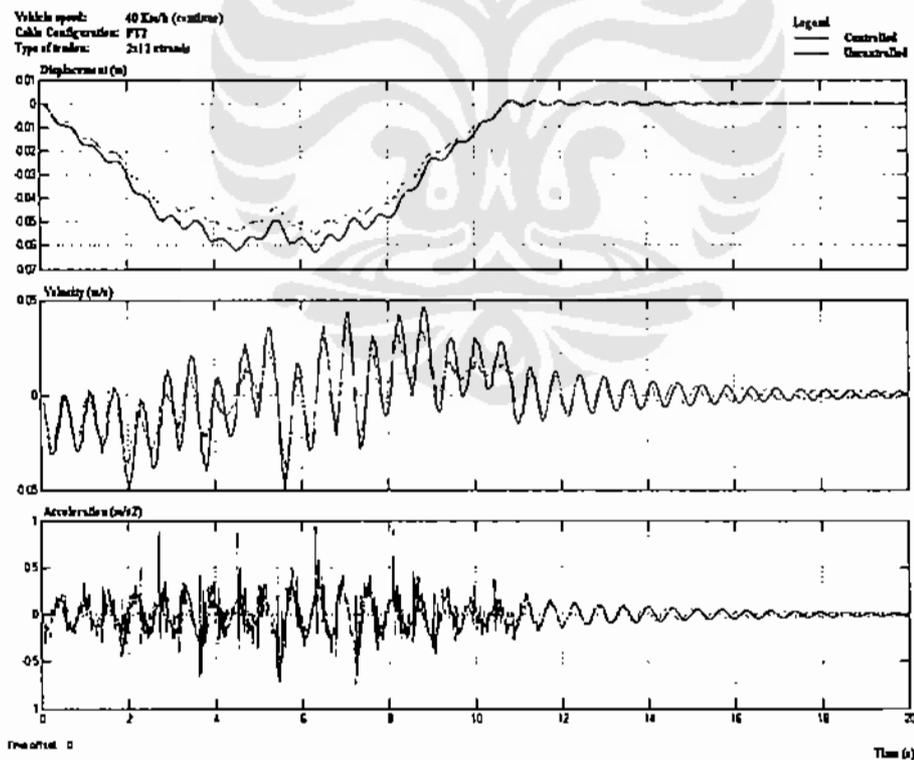
Besarnya prosentase reduksi lendutan dari kombinasi beban sebelum dan sesudah dipasang tendon prategang diperlihatkan pada Gambar 7.a. Untuk prosentase reduksi lendutan jika kombinasi dengan tendon prategang dilengkapi FLC feedback, ditunjukkan pada Gambar 7.b. Dari gambar tersebut secara jelas menunjukkan Kingpost (KP) yang dilengkapi FLC feedback memberikan reduksi lendutan yang lebih baik dibanding konfigurasi yang lain yaitu sekitar 20,8 % pada tipe tendon 2x12 strands dan sekitar 14% untuk 2x7strands

pada beban kontinu. Konfigurasi tendon horizontal (HT) juga memberikan kemampuan reduksi lendutan yang baik dibandingkan konfigurasi tendon poligonal

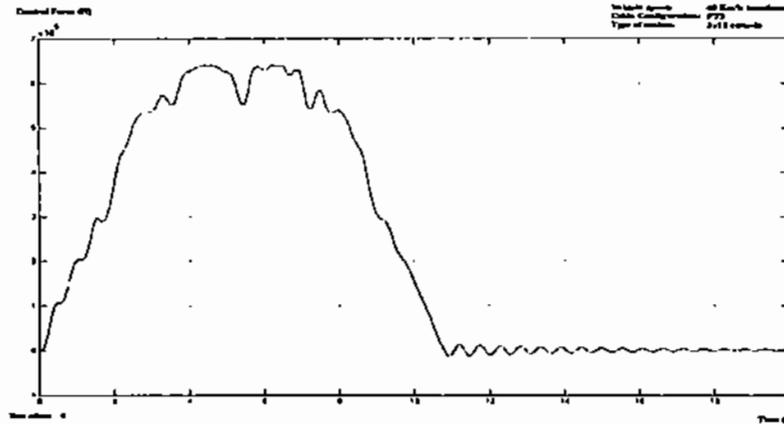
(PT1, PT2 dan PT3), walaupun kemampuannya masih berada dibawah Kingpost.



Gambar 4. Blok Diagram SIMULINK Untuk FLC Feedback Dengan Beban Kontinyu

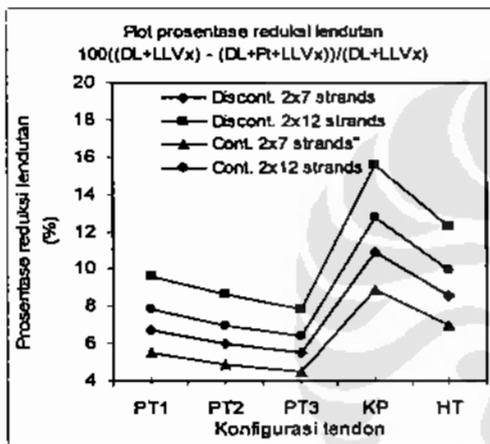


Gambar 5. Respon Struktur Dengan FLC Feedback: Beban Kontinyu, V = 40 km/h, PT2, dan 2x12 Strands

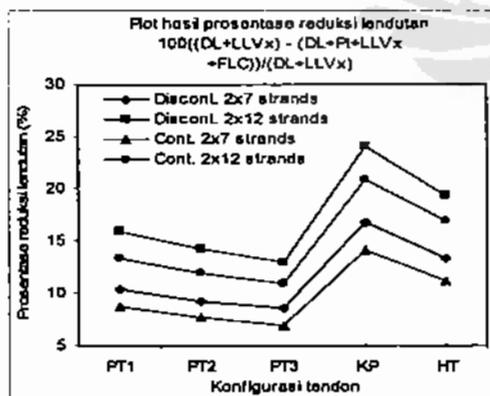


Gambar 6.

Gaya Kontrol Dengan FLC Feedback: Beban Kontinyu, V = 40 km/h, PT2, dan 2x12 Strands



(a)



(b)

Gambar 7.

Prosentase Reduksi Lendutan Sebelum (a) dan Sesudah (b) Menggunakan FLC Feedback

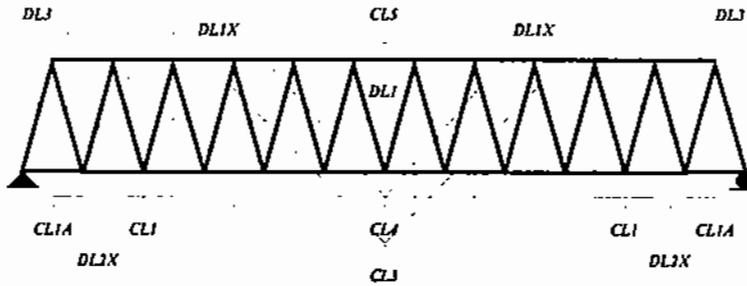
Reduksi lendutan yang rendah umumnya terjadi pada konfigurasi poligonal yang menunjukkan bahwa pengangkuran tendon

yang semakin ke tengah (dari konfigurasi PT1 ke PT3) akan menurunkan kemampuan tendon dalam mereduksi lendutan. Keadaan ini sangat dipengaruhi oleh vektor-vektor reaksi yang timbul pada nodal-nodal tempat pengangkuran, dimana Kingpost (KP) hanya menimbulkan satu vektor reaksi horisontal pada tumpuan yang tidak membebani struktur secara vertikal. Pada konfigurasi poligonal, gaya pretension pada tendon menghasilkan dua vektor reaksi horisontal dan dua vertikal yang justru menimbulkan displacement vertikal yang besar pada pengangkuran. Notasi-notasi yang digunakan pada grafik yang ditampilkan adalah sebagai berikut:

- PT1 = Konfigurasi Poligonal Tendon 1
- PT2 = Konfigurasi Poligonal Tendon 2
- PT3 = Konfigurasi Poligonal Tendon 3
- KP = Konfigurasi King Post
- HT = Konfigurasi Horizontal Tendon
- Pt = Pretension
- FLC = Fuzzy Logic Control
- DL = Dead Load
- LLVx = Live Load Dynamic dengan kecepatan kendaraan Vx

Tegangan maksimum

Indikator lain yang menentukan kinerja dari aplikasi tendon kontrol pada jembatan rangka baja adalah besarnya tegangan-tegangan maksimum yang terjadi pada tiap elemen. Perubahan tegangan tekan-tarik yang besar mengindikasikan adanya bahaya



Gambar 8.
Identifikasi Elemen Rangka

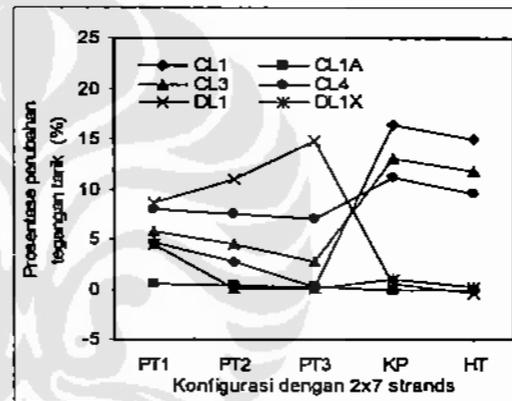
fatigue yang harus diperhitungkan pada sambungan elemen. Untuk memudahkan dalam memahami hasil investigasi, maka penamaan dan letak elemen diperlihatkan pada Gambar 8.

Hasil investigasi menunjukkan bahwa penerapan gaya prategang dan gaya kontrol pada umumnya menurunkan tegangan tarik pada elemen-elemen batang bawah sebagai akibat dari pengurangan lendutan yang terjadi. Gambar 9(a) dan 9(b) menunjukkan reduksi tegangan tarik yang besar dialami oleh elemen-elemen batang bawah yaitu CL1, CL3 dan CL4, terutama pada konfigurasi KP, kemudian pada konfigurasi HT.

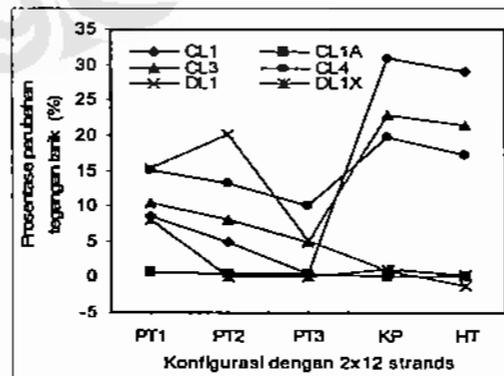
Elemen diagonal DL1 juga mengalami reduksi tarik yang besar pada konfigurasi poligonal namun menurun secara signifikan pada konfigurasi KP dan HT. Dari kedua grafik tersebut juga terlihat bahwa reduksi tegangan tarik pada batang-batang chord bawah akan meningkat dengan memperbesar kapasitas prategang dan pengontrolan tendon (dari 2x7 strands menjadi 2x12 strands).

Kompensasi dari pengurangan tegangan tarik adalah timbulnya peningkatan tegangan tekan. Kenaikan tegangan tekan yang besar dapat timbul dari gaya reaksi pengontrolan pada batang-batang di sekitar tempat di mana tendon aktif diangkurkan. Pada Gambar 10 terlihat bahwa peningkatan tegangan tekan yang besar juga dialami oleh elemen-elemen batang bawah yaitu CL1, CL3 dan CL4 pada konfigurasi poligonal (PT1, PT2, dan PT3). Elemen diagonal pada konfigurasi tersebut seperti DL2X dan DL1X, mengalami

pengurangan tegangan tekan yang cukup besar. Konfigurasi Kingpost dan tendon Horizontal justru tidak memperlihatkan perubahan tegangan tekan yang cukup berarti.



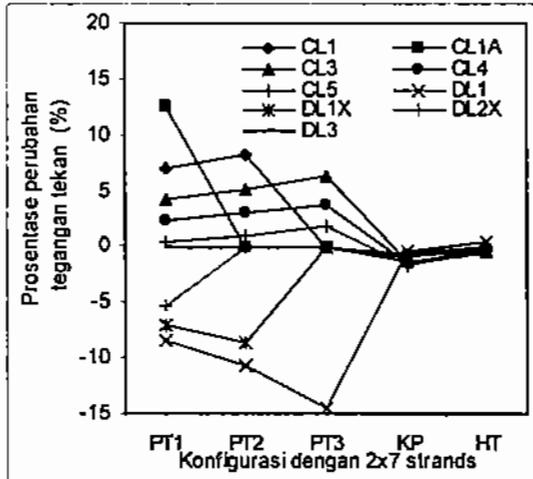
(a)



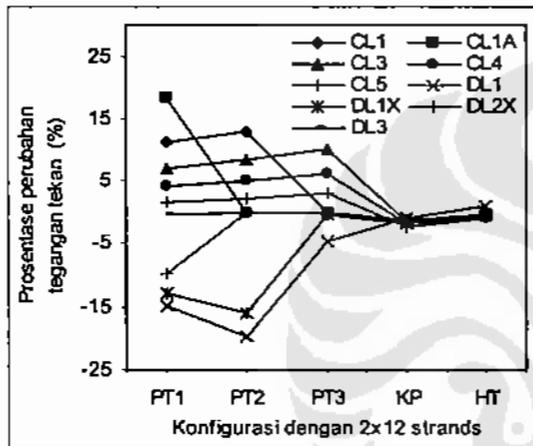
(b)

Gambar 9.
Prosentase Perubahan Tegangan Tarik Antara Sebelum dan Sesudah Menggunakan FLC Feedback Dengan Beban Kontinyu (a) 2x7 Strand (b) 2x12 Strand

PERPUSTAKAAN
UNIVERSITAS INDONESIA



(a)



(b)

Gambar 10.

Prosentase Perubahan Tegangan Tekan Antara Sebelum dan Sesudah Menggunakan FLC Feedback Dengan Beban Kontinyu (a) 2x7 Strand (b) 2x12 Strand

5. Kesimpulan

Hasil analisa numerik untuk kontrol tendon aktif berbasis fuzzy logic terhadap perkuatan jembatan rangka baja tipe Warren truss diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Sistem kontrol tendon aktif pada jembatan rangka yang berbasis fuzzy logic, mampu memberikan pengendalian respon yang lebih optimal dan lebih beradaptasi terhadap kontrol yang ditanganinya. Dari gaya kontrol, menunjukkan terjadinya variasi tahapan-

tahapan gaya pengontrolan yang lebih proporsional terhadap lendutan struktur.

- Konfigurasi kabel tendon KP dan HT, baik yang tanpa kontrol, maupun dengan sistem kontrol memberikan reduksi respon lendutan yang jauh lebih baik dibandingkan dengan konfigurasi yang lain akibat dari tempat pengangkurannya pada tumpuan yang menimbulkan hanya satu vektor reaksi horisontal.
- Reduksi tegangan tarik yang besar dialami oleh elemen-elemen batang bawah yaitu CL1, CL3 dan CL4, terutama pada konfigurasi KP, kemudian pada konfigurasi HT. Pada konfigurasi KP dan HT justru tidak memperlihatkan perubahan tegangan tekan yang cukup berarti sebagai kompensasi reduksi tegangan tarik yang besar.
- Pada konfigurasi poligonal, pengangkuran tendon yang semakin ke tengah (dari konfigurasi PT1 ke PT3) akan menurunkan kemampuan tendon dalam mereduksi lendutan. Hal ini sangat dipengaruhi oleh vektor reaksi horisontal pengangkuran tendon pada batang atas yang dapat memicu terjadinya lendutan vertikal yang besar pada jembatan rangka.
- Efektifitas pengontrolan dengan menggunakan algoritma fuzzy logic akan sangat tergantung dari rule base yang dibuat. Dengan pengaturan rule-base fuzzy berdasarkan sistem single input dan single output sederhana, dengan input displacement ternyata dapat memberikan pengontrolan lendutan struktur jembatan yang lebih optimal.

Daftar Acuan

- [1]. Berlin, A.A., *Toward Intelligent Structure: Active Control of Buckling*, Doctor of Philosophy, Thesis of Electrical Eng., Massachusetts Institute of Technology, May, 1994.
- [2]. Chen, W.-F., and Duan, L., *Bridge Engineering Handbook*, CRC Press LLC, New York, USA., 1999.

- [3]. Chopra, A.K., *Dynamics of Structures*, Prentice-Hall Int., Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 2003.
- [4]. Housner, G.W., et.al., *Structural Control: Past, Present, and Future*, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, September 1997.
- [5]. Klir, G.J, dan Yuan, B., *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic, Theory and Applications*, Prentice Hall International Inc., New Jersey, USA, 1995.
- [6]. Lase, Y., *Application of Non-Linear Velocity Feedback Control in Active Mass Damper System*, Journal of CSSC, Vol. 3. No. 2. Dec, 2002.
- [7]. Lase, Y dan Leonard, *Analisa Jembatan Rangka Baja terhadap Beban Dinamis Kereta Api*, Jurnal Teknik Sipil, No.2 Tahun VI, Jakarta, 2000.
- [8]. Minsili L.S., Tieyi, Z., He, X. and Manguelle, D.E., *Design and Vibration Control by Friction Damper in Truss Bridges*, 2000.
- [9]. Moscinski, J., Ogonowsky, Z., *Advanced Control With MATLAB And SIMULINK*, Ellis Horwood Ttd., for permission from Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, Great Britain, 1995.
- [10]. Rahman, M.J., *Aplikasi Tendon Kontrol Aktif berbasis Fuzzy Logic pada Perbaikan Jembatan Rangka Baja*, Tesis FTUI, Depok, 2005.
- [11]. Symans, M.D., and Kelly, S.W., *Fuzzy Logic Control of Bridge Structures Using Intelligent Semi-Active Seismic Isolation Systems*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics 28, 37-60, U.S.A, 2000.
- [12]. Taly, N, *Design of Modern Highway Bridges*, The McGraw-Hill Companies, 1998.