

KESTABILAN SISTEM KONTROL JARINGAN TERHADAP WAKTU TUNDA

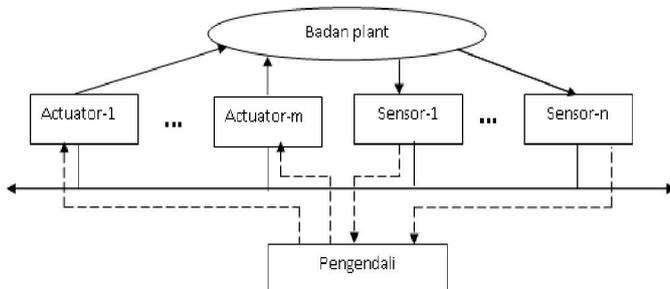
Juliana br Ginting¹ dan Widowati²
^{1,2} Program Studi Matematika FMIPA UNDIP
 Jl. Prof. Soedarto, SH, Semarang, 50275

Abstract. In this paper, we proposed the stability analysis of networked control system with time delay. Delay in a network is something that can not be avoided when transmitted digital data over control devices. Network control system is discussed here consists of clock driven sensor, event driven controller, actuator, and plant. In the network control system usually contains delays and sampling period with effect the system stability. Stability region in a network control system can be represented through the relationship between Maximum Allowable Transfer Interval and sampling period.

Keywords: control systems, networked, time delays, stability

1. PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi saat ini memungkinkan sistem kontrol terdistribusi untuk diterapkan melalui jaringan. Kegiatan yang terjadi pada sistem kontrol jaringan adalah pertukaran informasi seperti referensi input, output dari plant, input kontrol dan lain sebagainya[4]. Pertukaran ini terjadi pada komponen jaringan seperti pengontrol, sensor dan aktuator. Keadaan ini dapat dilihat pada Gambar 1 Karena adanya pertukaran data antara alat-alat yang terhubung pada jaringan baik itu tundaan yang konstan atau tundaan yang berubah terhadap waktu (*time-varying*). Hal ini dapat menurunkan kinerja sistem bahkan tundaan tersebut dapat membuat sistem menjadi tidak stabil.



—————> Sinyal kontinu
 - - - - -> Sinyal Digital

Gambar 1 Sistem kontrol jaringan dan aliran informasi

Adapun keuntungan dari sistem kontrol jaringan ini adalah proses pengkabelan

untuk jaringan akan semakin sedikit, diagnosa dan pemeliharaan terhadap sistem akan lebih mudah dan kecepatan pada sistem akan menjadi lebih cepat.

1. Analisis Sistem Kontrol Jaringan dengan Mencari Nilai Maximum Allowable Transfer Interval

Walsh dkk [2], mempertimbangkan sistem kontrol jaringan dengan ruang keadaan yang kontinu dan pengontrol yang kontinu. Jaringan kontrol, dibagi dengan beberapa node yaitu jika hubungan itu hanya masukan antara sensor dan pengontrol. Mereka memperkenalkan definisi interval alih maksimum yang ditoleransi (*Maximum Allowable Transfer Interval* (MATI)) atau dinotasikan dengan τ . Tujuannya adalah supaya diperoleh nilai τ yang diinginkan sehingga dapat menjamin dan mempertahankan kinerja dari sistem kontrol jaringan.

Diasumsikan sistem umpan balik bukan jaringan (*non-networked*) sebagai,

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx + Du,$$

dengan

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} c_1 & c_2 \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix}$$

(dengan x_p dan x_c melambangkan variabel keadaan dari plant dan pengontrol) bersifat stabil global secara eksponensial. Oleh karena itu terdapat matriks P definit positif sedemikian hingga

$$-A + P^{-1} = -P^{-1}B + C^T P \quad (1)$$

dengan I adalah matriks identitas dan A adalah matriks Hurwitz.

Dengan mendefinisikan *error* induksi-jaringan (*induced-network*)

$$e(t) = x(t) - [x_d(t), y_d(t)]^T$$
 dan matriks gabungan dari kontroler dan plant adalah

$$A_c = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}, \quad B_c = \begin{bmatrix} B \\ D \end{bmatrix}$$

Sehingga matriks ruang keadaan untuk sistem kontrol jaringan diberikan sebagai berikut

$$A_c = [A_c, B_c]$$

dan untuk transmisi dinamik instant dari sistem kontrol jaringan akan diasumsikan sebagai berikut

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_c x(t) + B_c u(t) \\ y(t) &= C x(t) + D u(t) \end{aligned} \quad (2)$$

pertama dipertimbangkan stabilitas umum beberapa paket-transmisi sistem kontrol jaringan dengan baik statis atau dinamis (TOD) algoritma penjadwalan.

Teorema 2.1 [2] *Diberikan sistem kontrol jaringan dengan kutup sensor p yang beroperasi pada TOD atau pengaturan statis, didefinisikan $\lambda_1 = \min(P)$, $\lambda_2 = \max(P)$ (dimana P telah ditentukan di atas dan λ adalah nilai eigen). Jika MATI memenuhi persamaan*

$$\frac{\ln(2)}{8} \frac{1}{\sqrt{\lambda_1 + 1}} < \frac{1}{\sqrt{16 \lambda_2 + 1}}$$

maka sistem kontrol jaringan akan stabil global secara eksponensial.

Perhitungan dari batasan untuk dapat digeneralisasi seperti terlihat pada *corollary* berikut

Akibat 2.2 [6] *Jika fungsi Lyapunov $V(x) = x^T P x$ dari bukan jaringan (nonnetworked), sistem lup tertutup memenuhi*

$$- \dot{V}(x) = -\alpha V(x) \quad (3)$$

(lebih bersifat umum dari pada Persamaan (2), dengan P, Q adalah matriks simetris positif, batasan menjadi

$$\frac{\ln(2)}{8} \frac{1}{\sqrt{\lambda_1 + 1}} < \frac{1}{\sqrt{16 \lambda_2 + 1}} \quad (4)$$

Dapat dilihat lebih jauh bahwa kondisi ketiga selalu yang paling kecil, jadi

$$\frac{\ln(2)}{8} \frac{1}{\sqrt{\lambda_1 + 1}} < \frac{1}{\sqrt{16 \lambda_2 + 1}} \quad (5)$$

menjamin terjadinya kestabilan global secara eksponensial dari sistem kontrol jaringan tersebut.

Akibat 2.2 memperlihatkan bahwa bergantung pada besaran λ_1, q , dan Q dimana P ditentukan oleh Q melalui persamaan (3). A dan q bersifat tetap untuk beberapa pengaturan sistem tersebut, dan oleh karena itu Q adalah satu-satunya variabel pembentuk. Sehingga dapat menggunakan metode analisa untuk menemukan Q yang dapat memaksimalkan.

Dengan memaksimalkan diasumsikan bahwa nilai terbesar yang mungkin dapat menyediakan kestabilan dari sistem kontrol jaringan. Meski begitu, contoh berikut ini menggambarkan bagaimana pencarian acak juga bisa menghasilkan.

Contoh 2.3

Misalkan plant dengan ruang keadaan sebagai berikut

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0,1 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0,1 \end{bmatrix} u \\ y &= [1 \quad 0] x \end{aligned}$$

Selanjutnya dicari $u = -Kx$, dengan K adalah matriks konstan berukuran 1×2 . Pertama akan diselidiki apakah sistem tersebut stabil dengan menggunakan nilai eigen dari matriks A .

Cek kestabilan

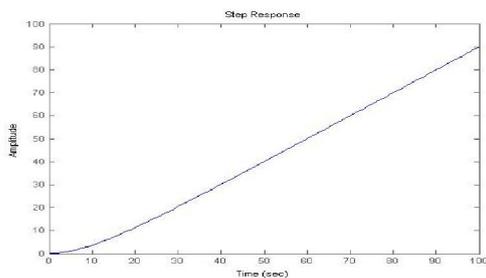
$$\begin{aligned} |sI - A| &= \begin{vmatrix} s & -1 \\ 0 & s + 0,1 \end{vmatrix} = s(s + 0,1) \\ &= s^2 + 0,1s \\ &= s(s + 0,1) \end{aligned}$$

Untuk mencari akar-akarnya persamaan kuadrat diatas digunakan rumus abc.

$$s = \frac{-0,1 \pm \sqrt{0,1^2 - 4 \cdot 1 \cdot 0}}{2}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{-0,1 \pm \sqrt{0,1 - 4}}{2} \\
 &= \frac{-0,1 \pm \sqrt{-3,99}}{2} \\
 &= \frac{-0,1 \pm 1,997}{2} \\
 &= -0,05 \pm 0,9987
 \end{aligned}$$

Sehingga nilai eigen yang diperoleh adalah $\lambda_1 = -0,05 + 0,9987$ dan $\lambda_2 = -0,05 - 0,9987$. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem tersebut sudah stabil. Untuk mengetahui kestabilan dan juga untuk mengetahui performasinya, dilakukan simulasi menggunakan MATLAB[3] seperti pada gambar berikut



Gambar 2. Grafik respons step

Dari Gambar 2 terlihat bahwa sampai waktu 100 detik amplitudo dari sistem terus naik, sehingga performansi dari sistem kurang baik. Untuk memperbaiki performansi dari sistem tersebut diberikan umpan balik keadaan dengan menggunakan metode *pole placement* [7]. Sebelum itu terlebih dahulu dicari apakah sistem tersebut terkontrol dan terobservasi [5]. Keterkontrolan sistem diselidiki dengan cara, pertama dicari matriks

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0,1 & 0,1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,1 \\ 0 \\ -0,01 \end{bmatrix}$$

Kemudian dicari matriks keterkontrolan

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0,1 \\ 0,1 & -0,01 \end{bmatrix}$$

Matriks C tersebut bersifat *full-row rank* sehingga sistem tersebut terkontrol. Keterobservasian sistem diselidiki dengan cara, mula-mula dicari matriks C.A

$$\begin{aligned}
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0,1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0,1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Kemudian dicari matriks keterobservasian

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matriks O bersifat *full-row rank* sehingga sistem terobservasi. Karena sistem tersebut sudah terkontrol dan terobservasi maka dapat dicari matriks umpan balik keadaan dengan mengambil sembarang nilai eigen, misalkan nilai eigen yang diambil adalah $\lambda_1 = -1/2$ dan $\lambda_2 = -3/4$

Diperoleh bentuk persamaan karakteristik sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 &= (s + 1/2)(s + 3/4) \\
 &= s^2 + 5/4s + 3/8 \quad (6)
 \end{aligned}$$

Kemudian dicari matriks umpan balik dengan $K = -$

$$\begin{aligned}
 - &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0,1 & 0,1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0,1 & 0,1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0,1 & -0,1 - 0,1 \end{bmatrix} \quad (7)
 \end{aligned}$$

Dicari nilai eigen dari persamaan (7) $|sI - (A - BK)| = 0$

$$\begin{aligned}
 &= \begin{vmatrix} s & 0 & 1 \\ 0 & s + 0,1 & 0,1 \end{vmatrix} \\
 &= (s + 0,1 + 0,1) + (0,1) \\
 &= (s + 0,1 + 0,1) + 0,1 \quad (8)
 \end{aligned}$$

Dari persamaan (6) dan (8) akan dibandingkan koefisien dari s sehingga menghasilkan:

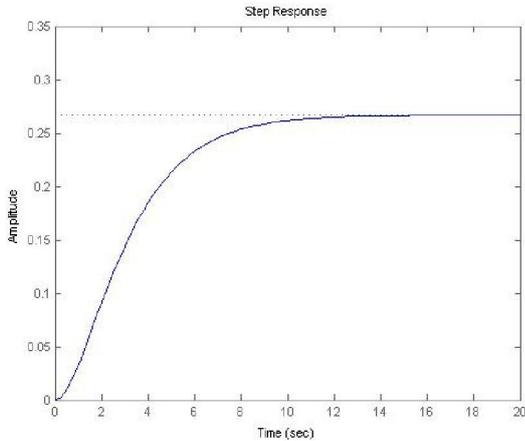
$$\begin{aligned}
 \text{Untuk } s &= 0,1 + 0,1 \text{ dikalikan } 10 \\
 12,5 &= 1 + \\
 &= 12,5 - 1 \\
 &= 11,5
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{untuk } s &= 0,1 \\
 &= - \times (10) = 3,75
 \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh matriks umpan balik keadaan dari sistem diatas adalah $K = [3,75 ; 11,5]$.

$$\begin{aligned}
 \text{Cek nilai eigen untuk } - & \\
 |sI - (A - BK)| &= \begin{vmatrix} s & 0 & 1 \\ 0 & s - 0,375 & -1,25 \end{vmatrix} \\
 &= \begin{vmatrix} s & 1,25 \\ 0,375 & s - 1,25 \end{vmatrix} \\
 &= (s + 1,25) + 0,375 \\
 &= (s + 1,25) + 0,375 \\
 &= (s + 0,5)(s + 0,75) \\
 &= -0,5 = -\frac{1}{2} \quad = -0,75 = -\frac{3}{4}
 \end{aligned}$$

Karena nilai eigen yang diperoleh sama dengan yang dimisalkan maka matriks umpan balik yang diperoleh adalah benar. Untuk mengetahui berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kestabilan dan juga untuk mengetahui performasinya, dilakukan simulasi menggunakan MATLAB seperti terlihat pada Gambar 2.3.



Gambar 3. Grafik tespons step umpan balik

Terlihat dari Gambar 3 bahwa waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kestabilan adalah 16 detik. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mempunyai performansi yang lebih baik dibandingkan dengan keadaan semula.

Dengan mempergunakan Teorema 2.1, untuk $p = 1$ (hanya ada satu kutup jaringan, yang merupakan sistem data sampel non jaringan), sehingga diperoleh $\tau = 2,7 \times 10^{-4}$. Dengan memilih Q secara acak dan menyelesaikan persamaan P , akan dihitung

dengan bantuan formula dalam Akibat 2.2 [6]. Setelah melalui 200 percobaan, angka maksimum yang diperoleh adalah sebesar $4,5 \times 10^{-4}$. Dan, periode stabilitas maksimum dari sampel konstan untuk sistem pengontrol umpan balik adalah sebesar 1,7, yang menunjukkan bahwa Teorema 2.1 dan Akibat 2.2 bersifat konservatif.

Teorema 2.1 dan Akibat 2.2 memberikan kondisi yang tepat bagi sampel jaringan untuk menjamin sistem non-jaringan tetap stabil ketika jaringan pengontrolan dengan lup tertutup. Namun,

keduanya amatlah terlalu konservatif karena sifatnya yang sangat hati-hati untuk dipraktekkan dalam pemakaian. Kemudian dilakukan analisa kestabilan dari sistem kontrol jaringan.

2. KESTABILAN SISTEM KONTROL JARINGAN

Model Sistem Kontrol Jaringan yang dimodelkan oleh Michael S. Branicky dkk yang diberikan pada Gambar 3.1. model ini terdiri dari Aktuator, sensor, pengontrol tundaan dan plant yang kontinu.

Adapun persamaan plant kontinu diberikan sebagai berikut

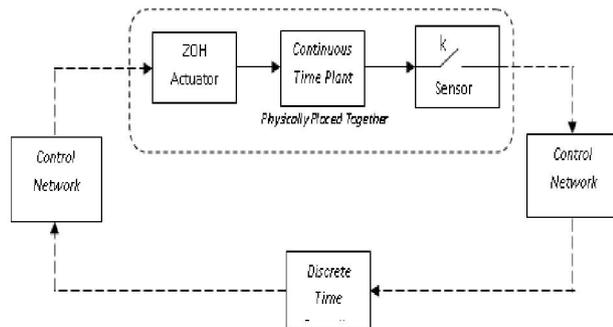
$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (9)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (10)$$

pengontrol diskret

$$u(k) = -Kx(k), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

dengan, $x \in R^n$, $u \in R^m$, dan A, B, C , dan K adalah matriks real konstan yang berdimensi $n \times n$, $n \times m$, $m \times n$ dan $1 \times n$.



Gambar 4. Model Sistem Kontrol Jaringan

Pada model sistem kontrol jaringan tersebut terdapat dua sumber tundaan yang berasal dari jaringan yaitu: tundaan dari sensor ke pengontrol, τ_s , dan tundaan dari pengontrol ke aktuator, τ_a . Tetapi dalam sistem kontrol jaringan ini dimungkinkan tundaan yang terjadi hanya salah satu, mungkin yang terjadi hanya tundaan dari sensor ke pengontrol atau tundaan dari pengontrol ke aktuator. Sedangkan untuk kasus pengontrol tidak berubah terhadap waktu (*time invariant controller*) tundaan dari sensor ke pengontrol dan tundaan dari pengontrol ke aktuator dapat digabungkan

menjadi $\dots + \dots$ untuk kepentingan analisa.

3.1 Tundaan Kurang dari Satu Periode Sampling

Misalkan sebuah kasus dimana terjadi tundaan untuk masing-masing sampel, τ_k , yang lebih kecil dari satu periode sampling, h . Kendala ini menjamin bahwa paling banyak dua pengontrol yaitu $u((k-1)h)$ dan $u(kh)$, dapat diaplikasikan selama periode sampling ke- k . Persamaan ruang keadaan dari sistem dapat ditulis menjadi:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k) &= \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k-1) + \mathbf{B}(k)u(k-1) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}(k)u(k-1) \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh sistem dengan periode sampling h sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(k)u(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}(k)u(k) \end{aligned}$$

dengan

$$\mathbf{A}(k) = \mathbf{e}^{A(k)h}$$

$$\mathbf{B}(k) = \int_0^h \mathbf{e}^{A(k)\tau} \mathbf{B}(k) d\tau$$

Dengan mendefinisikan

$\mathbf{z}(k) = [\mathbf{x}(k), \mathbf{y}(k)]^T$ sebagai vektor gabungan, maka sistem lup tertutup gabungan (*augmented closed-loop system*) adalah

$$\mathbf{z}(k+1) = \mathbf{A}(k)\mathbf{z}(k) + \mathbf{B}(k)u(k)$$

Dengan

$$\mathbf{A}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}(k) & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}(k) & \mathbf{I} - \mathbf{D}(k)\mathbf{C}(k) \end{bmatrix}$$

Jika suatu tundaan bernilai konstan, yakni $\tau_k = \tau$ untuk $k = 0, 1, \dots$ maka sistem tersebut tidak berubah terhadap waktu (*time-varying*), yang menyerhanakan analisa sistem. Tundaan yang kurang dari satu periode sampling dapat ditoleransi oleh sistem karena nilai $x(k)$ hanya tergantung kepada nilai $y(k-1)$.

3.2 Tundaan Lebih dari Satu Periode Sampling

Ketika sebuah tundaan memiliki siklus yang lebih panjang dari satu periode sampling (yaitu, $0 < \tau_k < lh, l > 1$), maka kemungkinan mendapatkan nilai masukan pengontrol sebesar 0, 1 atau lebih dari 1 (tergantung kepada nilai l -nya) dalam satu periode pemilihan sampel sangatlah mungkin terjadi. Pada kasus khusus dimana $(l-1)h < \tau_k < lh$ untuk setiap nilai k , sebuah kontrol masukan dapat diterima jika setiap periode sampling $k > 1$. Dalam kasus ini, analisa menghasilkan

$$\mathbf{z}(k) = \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma_1(\tau_k) & \Gamma_0(\tau_k) & \mathbf{K} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} & \mathbf{K} & 0 \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ -\mathbf{K} & 0 & 0 & \mathbf{K} & 0 \end{bmatrix}$$

dengan $\mathbf{z}(k) = [\mathbf{x}(k), \mathbf{y}(k)]^T$ dan vektor gabungannya adalah

$$\mathbf{z}(k) = [\mathbf{x}(k), \mathbf{y}(k), \dots, \mathbf{y}(k-1)]^T$$

Dalam kasus ini matriks berubah terhadap waktu (*time invariant*) hal ini dikarenakan matriks bergantung pada pengaturan yang tepat dari penerimaan input kontrol.

3.3 Daerah Kestabilan untuk Sistem Kontrol Jaringan

Biasanya, sebuah *sampling-rate* yang cepat dalam sebuah sistem sampel data yang diinginkan sehingga desain kontrol waktu diskret dapat diperkirakan lebih dekat dengan sistem kontinyu. Tetapi dalam Sistem kontrol jaringan, sebuah *sampling-rate* yang cepat dapat meningkatkan beban jaringan, yang dapat menghasilkan tundaan yang lebih panjang pada sinyal. Oleh karena itu, menemukan sebuah *sampling rate* yang dapat mentoleransi tundaan jaringan dan memperoleh performa sistem yang diinginkan merupakan hal yang penting dalam desain sistem kontrol jaringan.

Menggambarkan sebuah daerah kestabilan dari sistem kontrol jaringan dengan memperhatikan Periode sampling, h , dan tundaan jaringan, τ , untuk

membantu melihat hubungan antara kedua parameter ini. Ingat bahwa yang diinginkan adalah sebuah tundaan yang konstan, yang dapat diperoleh dengan menggunakan protokol jaringan yang tepat.

Hubungan antara h dan dapat diturunkan secara analitis untuk sistem skalar sederhana.

Contoh 3.1

Misal sistem *Integrator* sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -x, & x(0) < 0 \\ \dot{x} &= -x, & x(0) > 0 \end{aligned}$$

Dengan mendefinisikan

$$x = [x, x - 1]$$

sebagai vektor gabungan, maka sistem lup tertutup gabungannya adalah :

$$\dot{x} + 1 = x,$$

dengan

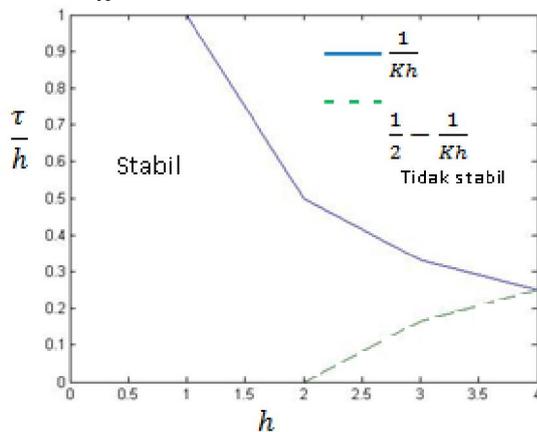
$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Untuk matriks yang berukuran 2×2 , dapat digunakan bantuan segitiga kestabilan untuk menghitung secara eksplisit hubungan antara dan h . Agar sistem kontrol jaringan stabil, tundaan harus memenuhi:

$$\frac{1}{2} - \frac{1}{Kh}, 0 < h < \frac{1}{K}$$

atau

$$\frac{1}{2} - \frac{1}{Kh}, 0 < h < \frac{1}{K}$$



Gambar 5 Daerah kestabilan dari $\dot{x} = u(t - \tau) (\tau \leq h)$

Daerah kestabilan dari sistem diberikan pada Gambar 3.2. Dari gambar dapat terlihat bahwa daerah stabilitas, yang menunjukkan sistem dapat mentoleransi

tundaan naik menjadi periode sampling penuh ketika periode sampling h kecil. Ketika h menjadi lebih besar, batas dari menjadi lebih kecil. Sebuah pengamatan menarik adalah bahwa untuk nilai tertentu yang lebih besar dari h , batas bawah dari bukanlah nol. Oleh karena itu meningkatkan tundaan sekali-kali dapat membantu.

3. PENUTUP

Sistem kontrol jaringan terhadap tundaan dibagi atas dua kasus, yaitu dari satu periode sampling dan yang lebih dari satu periode sampling. Untuk tundaan yang kurang dari satu periode sampling diperoleh jika tundaannya bernilai konstan untuk setiap saat maka sistem tersebut merupakan sistem yang tidak berubah terhadap waktu (time invariant). Untuk tundaan yang lebih dari satu periode sampling, diperoleh sistem lup tertutup yang berubah terhadap waktu, karena matriks yang bersesuaian bergantung terhadap tundaan yang berubah terhadap waktu.

Kestabilan pada sistem kontrol jaringan bergantung pada parameter h (periode sampling) dan (*Maximum Allowble Transfer Interval*). Dari hasil simulasi diperoleh bahwa daerah kestabilan dari satu periode sampling untuk kasus integrator, sistem dapat mentoleransi tundaan yang lebih besar ketika periode sampling kecil. Ketika periode sampling menjadi besar, batas dari tundaan menjadi kecil.

4. DAFTAR PUSTAKA

[1] Anton, H, (1997), *Aljabar Linear Elementer*, Alih bahasa oleh Pantur Silaban, I. Nyoman Susila, Penerbit Erlangga, Jakarta.
 [2] G.C.Wals, H.Ye, dan L.Bushnell, (2002), *Stability Analysis of Networked Control System*, Penerbit Amer,Control Conf, San Diego.
 [3] Hartono, Thomas Wahyu Dwi, (2003), *Analisis dan Desain Sistem Kontrol*

- dengan *MATLAB*, Penerbit Andi Yogyakarta, Yogyakarta.
- [4] Ogata, Katsuhiko, (1994), *Teknik Kontrol Automatik (Sistem Pengaturan)*, Alih Bahasa oleh Edi Laksono, Penerbit Erlangga, Jakarta
- [5] Ogata, Katsuhiko, (1995), *Modern Control Engineering, Second Edition*, Prentice-Hall International, Inc., Singapore.
- [6] Michael S. Branicky, (2001), *Stability of Networked Control Systems : Explicit Analysis of Delay*. Chicago :illinois
- [7] Zhoou, K dan Jhon C. Doyle, (1998), *Essentiasials of Robust Countrol*, Prentice Hall International, Inc., New Jersey
-