



Majelis Guru Besar
Institut Teknologi Bandung



Majelis Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Pidato Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Profesor Roberd Saragih

**KONTROL ROBUST BERORDE MINIMUM:
TEORI DAN APLIKASINYA**

7 Januari 2011
Balai Pertemuan Ilmiah ITB

Hak cipta ada pada penulis

**Pidato Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**

7 Januari 2011

Profesor Roberd Saragih

**KONTROL ROBUST BERORDE MINIMUM:
TEORI DAN APLIKASINYA**



Majelis Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada penulis

Judul: KONTROL ROBUST BERORDE MINIMUM:
TEORI DAN APLIKASINYA
Disampaikan pada sidang terbuka Majelis Guru Besar ITB,
tanggal 7 Januari 2011.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kepada Tuhan yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang atas kasih dan karuniaNyalah naskah pidato ini dapat diselesaikan. Pertama-tama, kami mengucapkan terima kasih dan rasa hormat yang sebesar-besarnya kepada pimpinan dan anggota Majelis Guru Besar Institut Teknologi Bandung yang telah memberikan kesempatan untuk menyampaikan pidato ilmiah di hadapan sidang pleno yang terhormat dari Majelis Guru Besar ini.

Pada kesempatan yang berbahagia ini kami ingin menyampaikan pidato tentang “**Kontrol Robust Berorde Minimum: Teori dan Aplikasinya**” yang mencakup dalam tiga model dinamik yaitu sistem linear time-invariant, sistem linear dengan parameter berubah waktu, dan sistem linear berdimensi takberhingga.

Pidato ini tidak lain merupakan bentuk komitmen dan pertanggung-jawaban akademik kami sebagai Guru Besar kepada masyarakat. Semoga karya ini dapat memberikan kontribusi dan kemajuan bagi pendidikan, penelitian, dan ilmu pengetahuan.

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Prof. Edy Soewono, Prof. Edy Tri Baskoro, Prof. Ismunandar dan Prof. Julia Onggo atas rekomendasi yang diberikan untuk ke kedudukan Guru Besar.

Kami amat berhutang budi dan oleh karena itu menyampaikan rasa

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Hak Cipta ada pada penulis
Data katalog dalam terbitan

Roberd Saragih
KONTROL ROBUST BERORDE MINIMUM: TEORI DAN APLIKASINYA
Disunting oleh Roberd Saragih

Bandung: Majelis Guru Besar ITB, 2011
vi+60 h., 17,5 x 25 cm
ISBN 978-602-8468-29-9
1. Teknologi 1. Roberd Saragih

hormat yang setinggi-tingginya disertai rasa terima kasih yang amat dalam kepada ayahanda Alm. J. Saragih dan ibunda Almh. M. Sihaloho atas segala dukungan dan dorongan untuk mengikuti pendidikan, kepada istri tercinta Fenti Hotnida Tambunan yang senantiasa memberikan dukungan dalam menjalankan tugas dalam bidang pendidikan, dan anak-anakku tersayang Diova Rika Febriana Saragih, Hakase Hasiholan Saragih, dan Maria Agnesi Saragih.

Terimakasih yang setulusnya kami sampaikan kepada para hadirin untuk bersedia hadir dan mengikuti paparan kami dengan penuh kesabaran, teriring permohonan maaf apabila ada ungkapan serta tutur kata yang kurang pantas.

Akhirnya mudah-mudahan materi yang kami sampaikan dapat kiranya membawa manfaat bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Bandung, 7 Januari 2011

Roberd Saragih

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
1. PENDAHULUAN	1
1.1. Sejarah Singkat Perkembangan Sistem Kontrol	1
1.2. Sistem Kontrol Berorde Minimum	3
2. KONTROL ROBUST	5
3. BEBERAPA KONTRIBUSI PADA SISTEM KONTROL ROBUST BERORDE MINIMUM	9
3.1. Sistem Linear Time-Invariant	9
3.2. Sistem Linear dengan Parameter Berubah Terhadap Waktu	18
3.3. Sistem Linear Berdimensi Takberhingga	29
3.3.1 Reduksi model melalui transformasi resiprokal	29
3.3.2 Reduksi model melalui dekomposisi sistem	31
3.3.3 Redusi model berdasarkan kesetimbangan Riccati	32
4. PENUTUP	36
5. UCAPAN TERIMA KASIH	37
BAHAN RUJUKAN	38
CURRICULUM VITAE	45

KONTROL ROBUST BERORDE MINIMUM: TEORI DAN APLIKASINYA

1. PENDAHULUAN

1.1 Sejarah Singkat Perkembangan Sistem Kontrol

Banyak masalah dalam sains dan rekayasa mempunyai model dalam bentuk sistem dinamik. Untuk berbagai keperluan perilaku sistem dinamik ini penting untuk diatur atau dikendalikan. Salah satu cara yang banyak dilakukan adalah dengan memberikan masukan yang sesuai pada sistem dinamik tersebut. Pada awalnya dilakukan dengan coba-coba sampai diperoleh perilaku sistem dinamik yang diinginkan. Proses untuk menentukan bentuk masukan kedalam suatu sistem dinamik sehingga diperoleh respon seperti yang diinginkan kita sebut sebagai perancangan sistem kontrol, selanjutnya masukan tersebut dikenal sebagai kontrol. Bila terkait dengan memaksimumkan atau meminimumkan suatu fungsi objektif disebut sebagai kontrol optimal.

Fungsi kontrol sendiri sudah dikenal sejak James Watt pada abad kedelapanbelas menemukan mesin uap, yaitu kontrol kecepatan, namun untuk menentukannya belum sistematis atau belum menggunakan formulasi matematika. Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, perkembangan teori kontrol berkembang demikian pesat.

Perkembangan teori kontrol dipicu oleh dua hal yaitu akibat perkembangan penelitian di bidang matematika dan juga akibat tantangan penggunaan dibidang teknologi.

Secara historis teori kontrol dikelompokkan menjadi dua area yaitu kontrol konvensional dan kontrol modern. Kontrol konvensional mengkover konsep dan teknik yang berkembang sampai tahun 1950, sementara kontrol modern dari tahun 1950 sampai saat ini. Beberapa metoda yang populer pada kontrol konvensional seperti metoda root-locus (dikenal juga sebagai metoda grafik), Nyquist, dan Bode. Era kontrol moden dimulai saat persamaan sistem kontrol dapat distrukturkan sehingga komputer dapat dengan efisien menyelesaikannya. Pada saat ini, model sistem kontrol dapat direduksi dari bentuk persamaan diferensial orde n menjadi orde satu, yang dikenal sebagai persamaan ruang keadaan, yang dengan mengagumkan dapat dengan sukses menangani sistem dengan banyak masukan dan banyak keluaran (MIMO), yang kontras pada masa sebelumnya, yang hanya mampu untuk masalah satu masukan dan satu keluaran (SISO). Masa kontrol konvensional juga dikenal dimana para disainer kontrol bekerja dalam kawasan frekuensi, dan masa setelah itu bekerja dalam kawasan waktu.

Seiring dengan semakin kompleksnya permasalahan yang dihadapi manusia, dimana timbul persoalan untuk mengatur plant (objek yang diatur) yang tidak diketahui secara pasti dengan dinamika yang tidak diketahui dan berkaitan pula dengan disturbansi yang tidak diketahui.

Perancangan sistem kontrol yang mampu menangani persoalan ini yang dirujuk sebagai kontrol robust. Beberapa teori yang masuk kategori kontrol robust adalah H_{∞} control, μ synthesis, dan gap metric yang sudah banyak dipublikasikan dan saat ini sudah/sedang dikembangkan untuk berbagai sistem seperti sistem linear time-varying, sistem linear dengan parameter berubah waktu, sistem bilinear, sistem nonlinear, dan sistem parameter terdistribusi.

1.2 Sistem Kontrol Berorde Minimum

Perancangan sistem kontrol dengan menggunakan kontrol robust cenderung menghasilkan orde pengontrol yang tinggi akibat penggunaan fungsi-fungsi bobot yang diharapkan dapat mereduksi pengaruh berbagai gangguan, perturbasi, maupun ketidakpastian. Sementara itu, banyak masalah dalam sains dan rekayasa mempunyai model dengan derajat kebebasan yang tinggi. Dalam implementasi, sistem kontrol dengan orde yang tinggi dapat menimbulkan ketidakpastian ,kesulitan numerik, dan ongkos yang sangat mahal. Oleh karena itu, sistem kontrol berorde minimum menjadi suatu keharusan. Ada dua pendekatan yang dapat dilakukan untuk memperoleh sistem kontrol berorde minimum yaitu cara langsung dan taklangsung. Cara langsung artinya parameter-parameter sistem pengontrol berorde minimum ditaksir secara langsung. Pada umumnya metoda ini banyak mengalami kesulitan. Sedangkan cara tidak langsung terdiri atas dua bagian yaitu, yang pertama, sistem kontrol

terlebih dahulu dirancang untuk plant berorde tinggi, kemudian orde sistem kontrol tersebut direduksi, yang dikenal sebagai *controller reduction*. Yang kedua adalah, orde plant berorde tinggi terlebih dahulu direduksi, kemudian sistem kontrol untuk plant dengan orde tereduksi dirancang, dikenal sebagai *model reduction*. Cara yang kedua ini yang paling banyak digunakan para peneliti. Untuk sistem linear time-invariant dan sistem linear dengan parameter berubah terhadap waktu, apabila menggunakan controller reduction, degradasi kinerja sistem kontrol dapat diketahui akibat reduksi orde, sementara apabila menggunakan model reduction hal tersebut tidak dapat diketahui. Degradasi dapat diketahui melalui perhitungan numerik.

Konsep mereduksi orde model, dimulai dari yang paling sederhana yaitu modal truncasi. Konsep dari metoda ini adalah variabel state yang memberikan kontribusi pada sistem dapat diabaikan. Adapun kontribusi state pada sistem berkaitan dengan nilai karakteristik sistem. Selanjutnya karena metoda ini mempunyai kesalahan yang relatif besar, maka beberapa peneliti mencoba memperbaikinya dengan metoda balanced truncation. Secara ringkas ide dari metoda ini adalah, sistem terlebih dahulu ditransformasi menjadi balanced system, kemudian state yang memberikan kontribusi kecil diabaikan. Dalam metoda ini kontribusi state terkait dengan nilai singular sistem. Pada umumnya metoda ini memberikan hasil yang baik untuk sistem yang mempunyai frekuensi tinggi. Sementara itu, ada beberapa sistem yang mempunyai frekuensi

rendah, sehingga metoda yang sudah dikembangkan untuk menyederhanakan sistem ini adalah aproksimasi singular perturbation. Dalam metoda ini state dibagi menjadi dua mode yaitu fast dan slow mode. Model yang lebih sederhana akan diperoleh dengan membuat kecepatan dari state pada fast mode sama dengan nol. Hal yang menakjubkan adalah bahwa batas atas kesalahan dari metoda balanced truncasi dan aproksimasi singular perturbasi adalah sama. Kesalahan yang terjadi pada semua metoda diatas dapat diperbaiki dengan metoda proyeksi. Hasil dari metoda diatas digunakan sebagai syarat awal untuk metoda proyeksi, dan parameter model sederhana diperoleh dengan proses iterasi berulang sampai mempunyai kesalahan seperti yang diinginkan. Sampai saat ini sudah banyak metoda yang sudah dikembangkan yang didasarkan pada metoda yang disebutkan sebelumnya.

2. KONTROL ROBUST

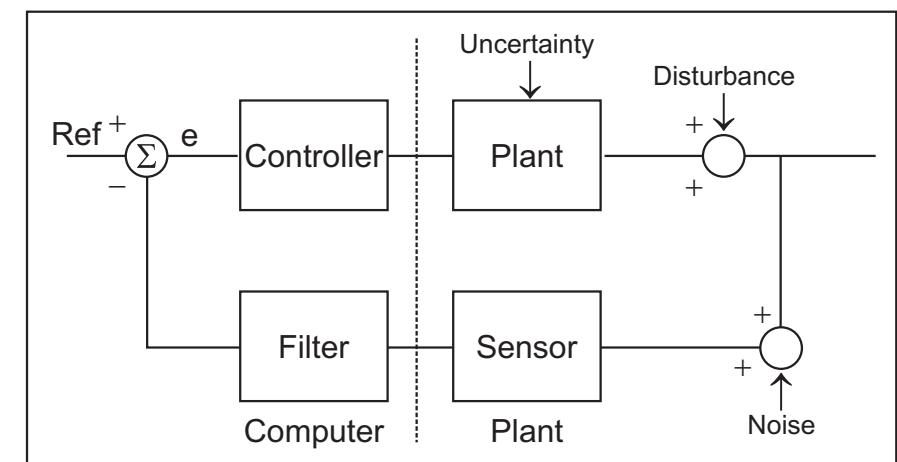
Ada tiga teori kontrol yang masuk dalam kelompok robust control yaitu teori kontrol H_∞ , μ synthesis, dan Gap metric. Pada bagian ini akan diberikan formulasi masalah yang berkaitan dengan H_∞ control untuk sistem linear time-invariant, karena pada dasarnya konsepnya dapat dimanfaatkan untuk sistem yang lain. Penelitian H_∞ optimization pada sistem kontrol dimulai pada tahun 1979 oleh Zames yang mengerjakan minimisasi ∞ -norm untuk fungsi sensitivitas dari sistem SISO. Adapun

kONSEP yang digunakan dalam H_∞ control memanfaatkan konsep di Ruang Hardy yang dikembangkan oleh Hardy, yang dalam suatu essaynya pernah mengatakan:

For Hardy, the most beautiful mathematics was that which had no applications in the outside world (pure mathematics) and, in particular, his own special field of number theory. He justifies the pursuit of pure mathematics with the argument that its very "uselessness" meant that it could not be misused to cause harm. On the other hand, Hardy denigrates applied mathematics, describing it as "ugly", "trivial" and "dull". These characterizations concerning applied mathematics mean that it is not the fact that it is applied that makes it "ugly", "trivial" and "dull" but it is because more often the most "ugly", "trivial" and "dull" mathematics is usually that finding application.

Sejak itu hasil penelitian yang berkaitan dengan H_∞ control sungguh luar biasa banyaknya. Sudah begitu banyak buku maupun paper yang terbit baik untuk pengembangan teori maupun untuk aplikasi. Secara umum, diagram blok untuk masalah kontrol untuk sistem dinamik diberikan seperti pada Gambar 1. Objek yang akan kita kontrol/kendalikan adalah suatu sistem dinamik yang akan disebut sebagai plant. Pada masalah real/nyata tentu saja plant ini tidak terlepas dari berbagai pengaruh seperti disturbance, uncertainty, dan noise. Dalam hal ada state dari sistem yang tidak dapat diukur, akan dilakukan penaksiran. Hal ini akan dikerjakan pada komponen filter. Jadi persoalannya adalah

menentukan controller/pengendali agar keluaran dari sistem dekat dengan fungsi refensi yang diberikan meskipun plant mengalami berbagai gangguan.



Gambar 1.: Bentuk Umum Masalah Kontrol Sistem Dinamik

Permasalahan diatas dapat diformulasikan ke dalam bentuk matematis. Misalkan plant yang diperumum (gabungan antara model dinamik dari masalah yang akan dikontrol dengan beberapa fungsi bobot yang berfungsi untuk mengkover berbagai gangguan). Model dinamik dari plant yang diperumum ini dapat dituliskan dalam bentuk:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t) \\ z(t) &= C_1 x(t) + D_{11} w(t) + D_{12} u(t) \\ y(t) &= C_2 x(t) + D_{21} w(t) + D_{22} u(t)\end{aligned}\tag{1}$$

dimana $u \in R^n$ sebagai masukan (kontrol), $w \in R^l$ adalah disturbance, $z \in R^p$

adalah keluaran yang akan dikontrol, $y \in R^q$ adalah keluaran yang diukur, $x \in R^n$ adalah variabel keadaan (state), $A \in R^{n \times n}$, $B_1 \in R^{n \times l}$, $B_2 \in R^{n \times m}$, $C_1 \in R^{p \times n}$, $C_2 \in R^{q \times n}$, $D_{11} \in R^{p \times l}$, $D_{12} \in R^{p \times m}$, $D_{21} \in R^{q \times l}$ dan $D_{22} \in R^{q \times n}$.

Adapun tujuannya adalah menentukan hukum kontrol umpanbalik $u = Ky$ yang meminimumkan fungsi transfer sistem lup tertutup dari z ke w dalam H_∞ -norm. Fungsi transfer sistem lup tertutup dapat dituliskan dalam bentuk:

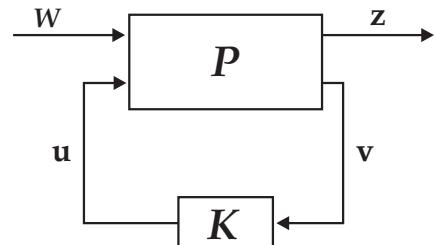
$$F_{zw}(s) = \bar{C}(sI - \bar{A})^{-1}\bar{B} + \bar{D} \quad (2)$$

dimana

$$\bar{A} = A + B_2 K(I - D_{12} K)^{-1} C_1, \quad \bar{B} = B_1 + B_2 K(I - D_{12} K)^{-1} D_{11},$$

$$\bar{C} = C_2 + D_{22} K(I - D_{12} K)^{-1} C_1, \quad \bar{D} = D_{21} + D_{22} K(I - D_{12} K)^{-1} D_{11}$$

Menentukan pengontrol H_∞ yang optimal secara numerik sulit diperoleh, sehingga dalam kepentingan yang lebih praktis sering digunakan konsep suboptimal yaitu diberikan $\gamma > 0$, **akan ditentukan semua pengontrol $K(s)$** , sehingga $\|T_{zw}\|_\infty < \gamma$, dimana $\|T_{zw}\|_\infty = \text{sup}_{\omega} |\bar{\sigma}(T_{zw}(j\omega))|$. Meminimumkan H_∞ -norm dari fungsi transfer ekivalen dengan meminimumkan magnitude terbesar dari respon frekuensi. Jadi secara sederhana, persoalan H_∞ control dapat dinyatakan sebagai berikut: Perhatikan Gambar 2, jika diberikan plant yang diperumum P , akan ditentukan $K(s)$, sehingga $\|T_{zw}\|_\infty < \gamma$.



Gambar 2.: Sistem lup tertutup

3. BEBERAPA KONTRIBUSI DALAM SISTEM KONTROL BERORDE MINIMUM

3.1 Sistem Linear Time-Invariant

Kelebihan sistem kontrol berorde minimum yang kami kembangkan ini adalah batas kesalahan akibat reduksi orde pengontrol dapat dibuat seminimum mungkin dengan cara membuat nilai awalnya dari metoda yang sudah ada.

Persamaan dinamik dari sistem kontrol $K(s)$ dapat dituliskan dalam bentuk

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= \hat{A}\hat{x}(t) + \hat{B}y(t) \\ u(t) &= \hat{C}\hat{x}(t) + \hat{D}y(t) \end{aligned} \quad (3)$$

Berikut ini akan diberikan syarat perlu dan cukup untuk menjamin eksistensi dan ketunggalan model pengatur yang lebih sederhana.

- **EKSISTENSI DAN SISTEM KONTROL TEREDUKSI**

Teorema: Diberikan $\gamma > 0$, model pengatur yang lebih sederhana ada

jika terdapat matriks definit positif $X, Y \in R^{n \times n}$ sehingga

$$\begin{bmatrix} \hat{A}^T X + X\hat{A} & X\hat{B} \\ \hat{B}^T X & -\gamma I \end{bmatrix} < 0, \quad \begin{bmatrix} \hat{A}^T Y + Y\hat{A} & \hat{C}^T \\ \hat{C} & -\gamma I \end{bmatrix} < 0, \quad \begin{bmatrix} X & I_n \\ I_n & Y \end{bmatrix} \geq 0,$$

$$\text{rank} \begin{bmatrix} X & I_n \\ I_n & Y \end{bmatrix} = n + r \quad (4)$$

Jika (4) dipenuhi maka sistem kontrol berorde minimum adalah sebagai berikut:

$$\hat{A}_r = N^{-1}MN^{-T} - N^{-1}\hat{A}^TN, \hat{B}_r = -N^{-1}Y\hat{B}, \hat{C}_r = -\hat{C}N^{-T} \quad (5)$$

dengan $M = \hat{A}^T Y + Y\hat{A}, NN^T = Y - X$.

Dapat kita lihat dengan jelas dari teorema ini bahwa jika ada X dan Y yang memenuhi (4) secara simultan, maka model yang lebih sederhana dapat diperoleh melalui persamaan (5). Tetapi, adalah sulit untuk menentukan X dan Y , karena persamaan (4) tidak konveks. Untuk itu, dilakukan suatu transformasi melalui proyeksi alternating yang mengakibatkan sistem menjadi konveks.

• Metoda Proyeksi Alternating

Metoda proyeksi alternating merupakan skema iteratif untuk menentukan titik-titik persekutuan dari beberapa himpunan konveks tertutup. Dibandingkan dengan metoda yang lain, teknik ini lebih sederhana dan efisien untuk menyelesaikan masalah pada non-smooth convex. Metoda ini juga telah diperumum untuk masalah non-convex

feasibility. Tetapi dalam kasus ini, hanya kekonverganan secara lokal yang dijamin. Untuk memperoleh titik-titik persekutuan dari beberapa himpunan konveks tertutup, berikut ini akan didefinisikan himpunan solusi yang memenuhi suatu kendala yaitu:

$$C_{1a} = \left\{ X : X \geq I, \begin{bmatrix} \hat{A}^T X + X\hat{A} & X\hat{B} \\ \hat{B}^T X & -\gamma I \end{bmatrix} \leq I \right\},$$

$$C_{1b} = \left\{ Y : Y \geq I, \begin{bmatrix} \hat{A}^T Y + Y\hat{A} & \hat{C}^T \\ \hat{C} & -\gamma I \end{bmatrix} \leq I \right\}$$

$$C_2 = (X, Y) : \begin{bmatrix} X & \gamma I \\ \gamma IY & I \end{bmatrix} \geq 0, C_3 = (X, Y) : \text{rank} \begin{bmatrix} X & \gamma I \\ \gamma IY & I \end{bmatrix} = n + r \quad (6)$$

Langkah-langkah dari proyeksi alternatings untuk memperoleh X dan Y yang memenuhi persamaan (4) secara simultan adalah sebagai berikut:

Diberikan (X_0, Y_0) sebagai syarat awal.

Pertama, hitung proyeksi X_0 pada C_{1a} dan juga proyeksi Y_0 pada C_{1b} . Misalkan X_1 dan Y_1 secara berurutan adalah hasilnya. Proyeksi ini dapat diformulasikan sebagai suatu masalah optimisasi Linear Matrix Inequalities (LMI) dengan memperkenalkan tambahan kendala Z :

$$\begin{bmatrix} Z & X_1 - X_0 \\ X_1 - X_0 & I \end{bmatrix} \geq 0 \quad (7)$$

Proyeksi Y_0 pada C_{1b} dapat diperoleh dengan cara formulasi LMI yang mirip dengan yang diatas.

Kedua, proyeksi ortogonal (X_1, Y_1) pada C_2 diberikan oleh

$$\begin{aligned} X_2 &= (Y_1 + X_1 - L\Lambda_+ L^T)/2 \\ Y_2 &= (Y_1 + X_1 + L\Lambda_+ L^T)/2 \end{aligned} \quad (8)$$

dimana Λ_+ matriks diagonal yang diperoleh dengan menggantikan nilai eigen negatif dari Λ dengan bilangan nol dan $Y_1 - X_1 = L\Lambda L^T$.

Terakhir, proyeksi (X_2, Y_2) pada C_3 dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$\begin{aligned} X_3 &= (Y_2 + X_2 - U\Sigma_k V^T)/2 \\ Y_3 &= (Y_2 + X_2 + U\Sigma_k V^T)/2 \end{aligned} \quad (9)$$

dimana Σ_k matriks diagonal yang diperoleh dengan menggantikan nilai singular Σ sebanyak ($n-r$) dengan bilangan nol dan $Y_2 - X_2 = U\Sigma V^T$.

Dengan menggunakan nilai X_3 dan Y_3 , model yang lebih sederhana dapat ditentukan. Apabila model tersebut belum seperti yang diinginkan maka tahap selanjutnya adalah mengulangi langkah dari awal sampai sesuai dengan yang diinginkan. Kekonvergenan dari barisan proyeksi alternating diberikan dalam teorema berikut.

Teorema: Barisan $(X_i, Y_i)_{i=1}^\infty$ konvergen ke suatu titik irisan $C_{1a} \cap C_{1b} \cap C_2 \cap C_3$ untuk suatu nilai awal (X_0, Y_0) . Jika irisannya tidak ada, maka barisan proyeksi alternating tidak konvergen.

Algoritma ini dapat diimplementasikan dengan mudah dalam program komputer tetapi bisa terjadi dengan kekonvergenan yang

lambat. Hal ini bisa diatasi dengan memberikan beberapa informasi arah.

Barisan $(X_i, Y_i)_{i=1}^\infty$ juga konvergen ke suatu titik dalam irisan $C_{1a} \cap C_{1b} \cap C_2 \cap C_3$ untuk suatu nilai awal (X_0, Y_0) . Algoritma ini merupakan teknik komputasi yang efisien untuk menyelesaikan masalah konveks.

- **BILINEAR MATRIX INEQUALITIES DAN ALGORITMA GENETIKA**

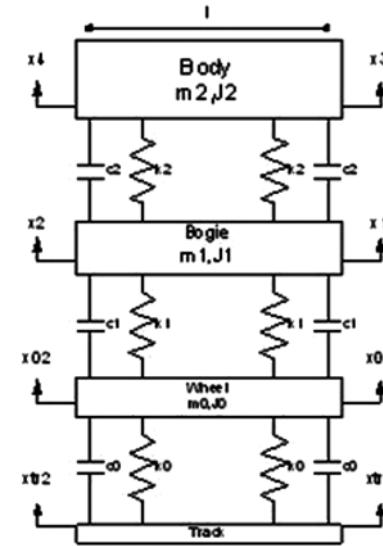
Untuk menentukan sistem kontrol, khususnya kontrol passive, telah dikembangkan metoda komputasi dengan menggunakan Bilinear Matrix Inequalities (BMI) dan Algoritma Genetika (AG). Berikut ini adalah masalah perancangan kontrol passive untuk suspensi pada kereta api. Model dari masalah suspensi tersebut seperti yang diberikan pada Gambar 3, dan persamaan dinamiknya dapat dituliskan dalam bentuk

$$Eu + F_p f + F_v \dot{f} = M\ddot{X} + C\dot{X} + KX \quad (10)$$

dimana M, K, C adalah masing-masing sebagai massa, stiffness dan damping, u adalah gaya kontrol, f dan \dot{f} adalah masing-masing sebagai displacement excitations dan velocity excitation.

$$K = \begin{bmatrix} k_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} c_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$F_p = \begin{bmatrix} k_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad F_v = \begin{bmatrix} c_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$



Gambar 3.: 6-dof suspension system model

$$X = [x_{01} \ x_{02} \ x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T, \quad f = [x_{tr1} \ x_{tr2}]^T,$$

$$Y_t = [x_{01} \ x_{02} \ x_1 \ x_2 \ x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T, \quad Y = \begin{bmatrix} Y_t \\ \dot{Y}_t \end{bmatrix}$$

$$E_t = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad E = [E_t \ E_t], \quad U = K_s Y.$$

Dengan mendefinisikan $X_s = \begin{bmatrix} X \\ \dot{X} \\ X - M^{-1}F_v f \end{bmatrix}$, persamaan state dari

masalah suspensi dapat dituliskan dalam bentuk

$$\dot{X}_s = AX_s + B_1 f + B_2 U \quad (11)$$

dimana

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} M^{-1}F_v \\ M^{-1}(F_p - CM^{-1}F_v) \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E \end{bmatrix}$$

Berdasarkan geometri kereta api, persamaan measured output dari masalah suspensi dapat dituliskan dalam bentuk

$$Y = C_2 X_s + D_{21} f \quad (12)$$

Dan persamaan output adalah

$$z = \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = C_1 X_s + D_{11} f \quad (13)$$

Dengan demikian persamaan lup tertutup dari f ke z adalah

$$\begin{aligned} \dot{X}_s &= \Psi X_s + \Phi f \\ z &= \Theta X_s + \Gamma f \end{aligned} \quad (14)$$

dimana

$$\begin{bmatrix} \Psi & \Phi \\ \Theta & \Gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + B_2 K_s C_2 & B_1 + B_2 K_s D_{21} \\ C_1 & D_{11} \end{bmatrix},$$

$$K_s = \text{diag}(k_1 \ k_1 \ k_1 \ k_1 \ k_2 \ k_2 \ k_2 \ k_2 \ c_1 \ c_1 \ c_1 \ c_1 \ c_2 \ c_2 \ c_2 \ c_2).$$

Untuk menyelesaikan masalah ini, dapat dilakukan dengan menggunakan BMI yaitu menentukan S, K_s yang memenuhi

$$\begin{aligned} S &> 0 \\ K_s &\geq 0 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \Psi' S + S\Psi & S\Phi & \Theta' \\ \Phi S & \gamma^2 I & \Gamma' \\ \Theta & \Gamma & I \end{bmatrix} < 0 \quad (15)$$

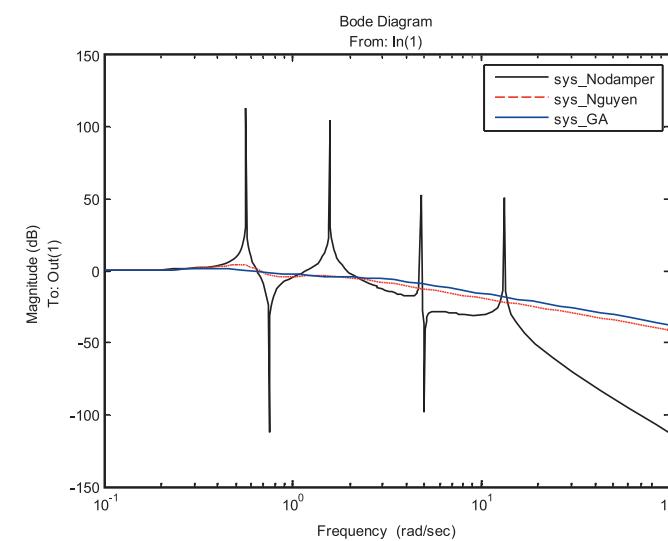
Hal ini bisa juga diselesaikan dengan menggunakan algoritma genetika. Adapun perbandingan hasilnya adalah sebagai berikut:

TABLE 1: FINAL DESIGN OF PARAMETERS BY BMI

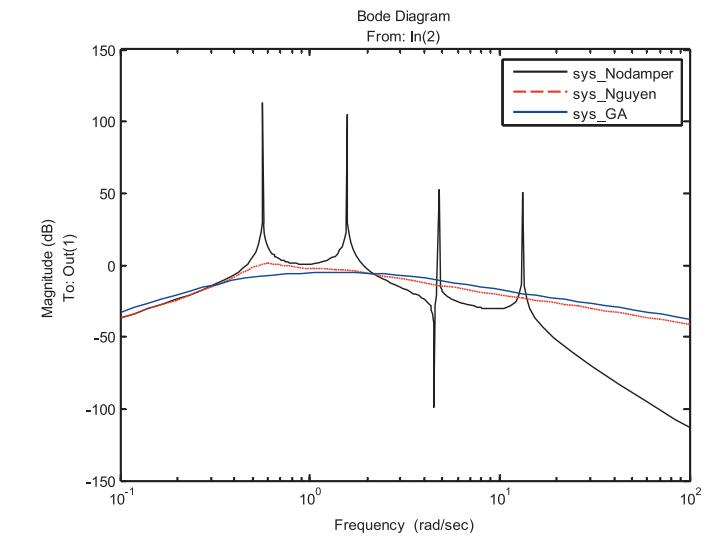
c_1	49,448	Nsm^{-1}	k_1	60,896	Nm^{-1}
c_2	21,703	Nsm^{-1}	k_2	26,808	Nm^{-1}

TABLE 2: FINAL DESIGN OF PARAMETERS BY GENETIC ALGORITHM

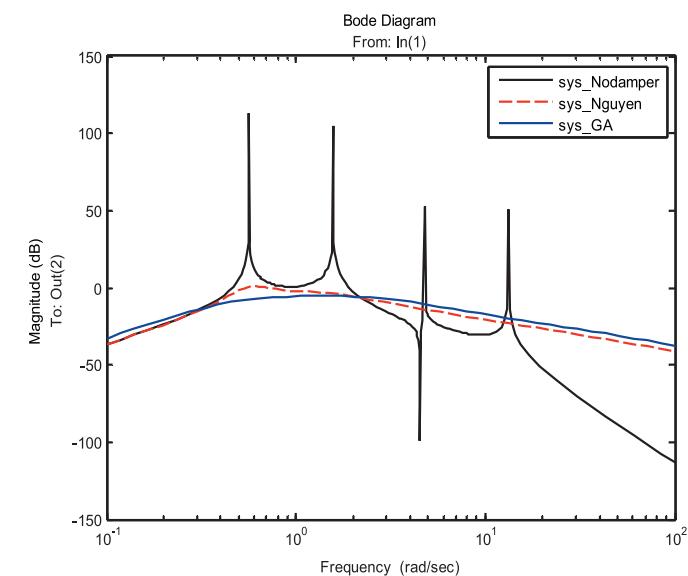
c_1	47,400	Nsm^{-1}	k_1	17,600	Nm^{-1}
c_2	57,400	Nsm^{-1}	k_2	13,200	Nm^{-1}



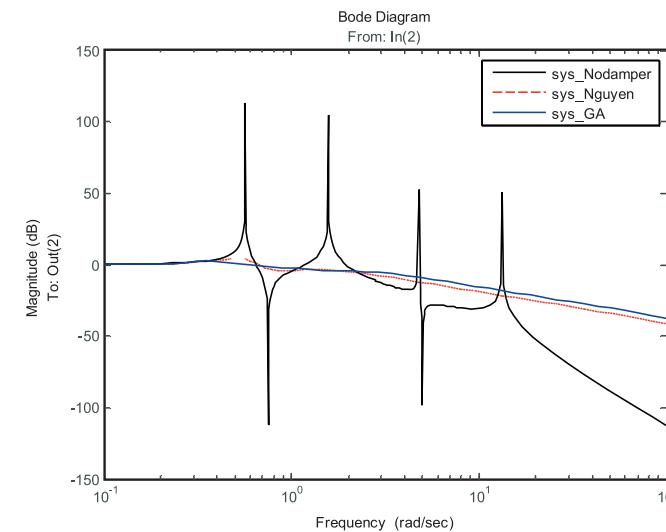
Gambar 4. Gain of frequency response of $X_3(s)/X_{tr1}(s)$



Gambar 5. Gain of frequency response of $X_3(s)/X_{tr2}(s)$



Gambar 6. Gain of frequency response of $X_4(s)/X_{tr1}(s)$



Gambar 7. Gain of frequency response of $X_4(s)/X_{tr2}(s)$

3.2 Sistem Linear dengan Parameter Berubah Terhadap Waktu

Untuk lebih merepresentasikan masalah real seringkali model yang digunakan adalah dalam bentuk sistem linear dengan parameter berubah terhadap waktu. Pada bagian ini akan diberikan langkah-langkah untuk menentukan sistem kontrol berorde minimum untuk sistem linear dengan parameter berubah terhadap waktu. Pada tahap awal akan dijelaskan konstruksi sistem kontrol berorde penuh yang dikembangkan oleh Apkarian. Bentuk pengontrol dengan orde penuh akan direpresentasikan dalam contractive right coprime factorizations (CRCF). Selanjutnya sistem kontrol berbentuk CRCF di balanced, dan dengan aproksimasi singular perturbation, sistem kontrol berorde minimum akan diperoleh.

Perhatikan sistem linear dengan parameter berubah terhadap waktu

$G(\rho)$ dengan persamaan dinamik

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A(\rho(t))x(t) + B_1(\rho(t))w(t) + B_2(\rho(t))u(t) \\ z(t) &= C_1(\rho(t))x(t) + D_{11}(\rho(t))w(t) + D_{12}(\rho(t))u(t) \\ y(t) &= C_2(\rho(t))x(t) + D_{21}(\rho(t))w(t) + D_{22}(\rho(t))u(t)\end{aligned}\quad (16)$$

Atau dapat dituliskan dalam bentuk polytopic

$$\begin{bmatrix} A(\rho(t)) & B_1(\rho(t)) & B_2(\rho(t)) \\ C_1(\rho(t)) & D_{11}(\rho(t)) & D_{12}(\rho(t)) \\ C_2(\rho(t)) & D_{21}(\rho(t)) & D_{22}(\rho(t)) \end{bmatrix} \in \bigcup_{i=1}^l \begin{bmatrix} A_i & B_{1i} & B_{2i} \\ C_{1i} & D_{11i} & D_{12i} \\ C_{2i} & D_{21i} & D_{22i} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Persamaan dinamik sistem kontrol berorde penuh $K(\rho)$, dapat dituliskan dalam bentuk

$$\begin{aligned}\dot{x}_k(t) &= A_k(\rho(t))x_k(t) + B_k(\rho(t))y(t) \\ u(t) &= C_k(\rho(t))x_k(t) + D_k(\rho(t))y(t)\end{aligned}\quad (18)$$

yang memenuhi kriteria performansi H_∞ yaitu parameter varying sistem lup tertutup (16)-(18) stabil kuadratik atas Θ dan L_2 gain dari parameter varying sistem lup tertutup dibatasi oleh γ , $\gamma > 0$. Karakteristik dari sistem kontrol berorde penuh diberikan dalam teorema berikut.

Theorem : Consider the generalized LPV plant with polytopic form (11). There exists a polytopic LPV controller enforcing quadratic stability and a bound γ , ($\gamma > 0$), on the L_2 gain of the closed-loop system, whenever there exist symmetric positive definite matrices Y and Z and quadruples $(\bar{A}_{ki}, \bar{B}_{ki}, \bar{C}_{ki}, \bar{D}_{ki})$ such that the following LMI problems is feasible

$$\begin{bmatrix} YA_i + \bar{B}_{ki}C_{2i} + (*) & * & * & * \\ \bar{A}_{ki}^T & A_iZ + B_{2i}\bar{C}_{ki} + (*) & * & * \\ (YB_{1i} + \bar{B}_{ki}D_{21i})^T & (B_{1i} + B_{2i} + \bar{D}_{ki}D_{21i})^T & -\gamma I & * \\ C_{1i} + D_{12i}\bar{D}_{ki}C_{2i} & C_{1iZ} + D_{21i}\bar{C}_{ki} & D_{11i} + D_{12i}\bar{D}_{ki}D_{21i} & -\gamma I \end{bmatrix} < 0$$

$$\begin{bmatrix} Y & I \\ I & Z \end{bmatrix} > 0 \quad (19)$$

where $i=1, 2, \dots, l$, terms denoted * will be induced by symmetry.

Contoh:

$$\begin{bmatrix} M+N+(*) & * \\ Q & P \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} M+M^T+N+N^T & O^T \\ Q & P \end{bmatrix}$$

Pengontrol LPV berorde penuh dapat diperoleh melalui prosedur berikut

1. Tentukan N dan M yang memenuhi $I - YZ = NM^T$.
2. Kontruksi $A_{ki}, B_{ki}, C_{ki}, D_{ki}$ dengan

$$A_{ki} = N^{-1} \left(\bar{A}_{ki} - (\tilde{A}_{ki})^T - Y(\tilde{B}_{ki})Z - \tilde{C}_{ki} \right) M^{-T}$$

dimana $\tilde{A}_{ki} = A_i + B_{2i}\bar{D}_{ki}C_{2i}$, $\tilde{B}_{ki} = A_i - B_{2i}\bar{D}_{ki}C_{2i}$, $\tilde{C}_{ki} = \bar{B}_{ki}C_{2i}Z + YB_{2i}\bar{C}_{ki}$, $B_{ki} = N^{-1}(\bar{B}_{ki} - YB_{2i}\bar{D}_{ki})$, $D_{ki} = \bar{D}_{ki}$, $i=1, 2, \dots, l$.

Realisasi ruang keadaan sistem kontrol berorde penuh adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} A_k(\rho(t)) & B_k(\rho(t)) \\ C_k(\rho(t)) & D_k(\rho(t)) \end{bmatrix} := \sum_{i=1}^l \alpha_i(t) \begin{bmatrix} A_{ki} & B_{ki} \\ C_{ki} & D_{ki} \end{bmatrix}, \quad \alpha_i(t) \geq 0, \quad \sum_{i=1}^l \alpha_i(t) = 1 \quad (20)$$

Selanjutnya akan digunakan aproksimasi balanced singular perturbation

(SPA) untuk mereduksi sistem kontrol melalui contractive right coprime factorizations (CRCF). Lemma berikut diperlukan untuk menurunkan CRCF pengontrol LPV $K(\rho)$.

Lemma: Let $K(\rho)$ have a continuous, quadratically stabilizable, and quadratically detectable state space realization. Let $F_k(\rho)$ and $L_k(\rho)$ such that $A_k(\rho) + B_k(\rho)F_k(\rho)$ and $A_k(\rho) + L_k(\rho)C_k(\rho)$ are quadratically stable for all $\rho \in \Theta$. Defigine

$$\begin{bmatrix} U(\rho) & \tilde{Y}(\rho) \\ V(\rho) & \tilde{X}(\rho) \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} \hat{A}_k(\rho) & | & B_k(\rho) & -L_k(\rho) \\ --- & | & --- & --- \\ \hat{C}_k(\rho) & | & D_k(\rho) & I \\ F_k(\rho) & | & I & 0 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

where

$$\hat{A}_k(\rho) = A_k(\rho) + B_k(\rho)F_k(\rho), \quad \hat{C}_k(\rho) = C_k(\rho) + D_k(\rho)F_k(\rho)$$

$$\begin{bmatrix} X(\rho) & Y(\rho) \\ \tilde{V}(\rho) & -\tilde{U}(\rho) \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} \check{A}_k(\rho) & | & L_k(\rho) & -\check{B}_k(\rho) \\ --- & | & --- & --- \\ F_k(\rho) & | & 0 & I \\ C_k(\rho) & | & I & -D_k(\rho) \end{bmatrix},$$

where

$$\check{A}_k(\rho) = A_k(\rho) + L_k(\rho)C_k(\rho), \quad \check{B}_k(\rho) = B_k(\rho) + L_k(\rho)D_k(\rho).$$

then

$$\begin{bmatrix} X(\rho) & Y(\rho) \\ \tilde{V}(\rho) & -\tilde{U}(\rho) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U(\rho) & \tilde{Y}(\rho) \\ V(\rho) & \tilde{X}(\rho) \end{bmatrix} = I.$$

Definition: The ordered pair $[U(\rho) \ V(\rho)]$ represents a CRCF of $K(\rho)$ if

1. $K(\rho) = U_\rho V_\rho^{-1}$,
2. There exist $X(\rho), Y(\rho)$ such that $X(\rho)U(\rho) + Y(\rho)V(\rho) = I$,
3. $[U^T(\rho) \ V^T(\rho)]$ is a contraction in the following sense

$$\sup_{\rho(t) \in F_\rho} \sup_{u \in L_2: \|u\|_2 \leq 1} \left\| \begin{bmatrix} U(\rho) \\ V(\rho) \end{bmatrix} u \right\| \leq 1. \quad (22)$$

Eksistensi CRCF untuk m -order parameter varying controller $K(\rho)$, diberikan dalam teorema berikut.

Teorema: Misalkan $K(\rho)$ kontinu, dapat distabilkan dan dideteksi secara kuadratik, maka CRCF $K(\rho)$ diberikan oleh *right coprime factorization* (RCF) dari

$$K(\rho) = U(\rho)V^{-1}(\rho),$$

$$\begin{bmatrix} U(\rho) \\ V(\rho) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{A}_k(\rho) & | & B_k(\rho) \\ \cdots & | & \cdots \\ \hat{C}_k(\rho) & | & D_k(\rho) \\ F_k(\rho) & | & I \end{bmatrix}, \quad (23)$$

dimana $F_k(\rho) = -B_k^T(\rho)X$, dan $X = X^T > 0$ adalah solusi yang diperkenankan dari $XA_k(\rho) + A_k^T(\rho)X - XB_k(\rho)B_k^T(\rho)X < 0$, $\forall \rho \in \Theta$.

Selanjutnya misalkan matriks simetri definit positif P dan Q masing-masing sebagai controllability dan observability Gramians dari $\begin{bmatrix} U(\rho) \\ V(\rho) \end{bmatrix}$.

Berdasarkan $\begin{bmatrix} U(\rho) \\ V(\rho) \end{bmatrix}$ dalam persamaan (23), P dan Q memenuhi pertaksamaan Liapunov berikut

$$\begin{aligned} \hat{A}_k(\rho)P + P\hat{A}_k^T(\rho) + B_k(\rho)B_k^T(\rho) &< 0, \quad \forall \rho \in \Theta, \\ \hat{A}_k^T(\rho)Q + Q\hat{A}_k(\rho) + \hat{C}_k^T(\rho)\hat{C}_k(\rho) + F_k^T(\rho)F_k(\rho) &< 0, \quad \forall \rho \in \Theta \end{aligned} \quad (24)$$

Dengan menggunakan Schur complement dan merubah variabel $\tilde{P} = P^{-1}$ dan $\tilde{Q} = Q^{-1}$, pertaksamaan diatas ekivalen dengan LMIs berikut

$$\begin{bmatrix} \tilde{P}\hat{A}_k(\rho) + \hat{A}_k^T(\rho)\tilde{P} & \tilde{P}B_k(\rho) \\ B_k^T(\rho)\tilde{P} & -I \end{bmatrix} < 0, \quad \begin{bmatrix} \tilde{Q}\hat{A}_k^T(\rho) + \hat{A}_k(\rho)\tilde{Q} & \tilde{Q}\hat{C}_k^T(\rho) \\ \tilde{C}_k(\rho)\tilde{Q} & -I \end{bmatrix} < 0, \\ \begin{bmatrix} \tilde{P} & I \\ I & \tilde{Q} \end{bmatrix} > 0 \quad (25)$$

dimana $\tilde{C}_k(\rho) = \begin{bmatrix} C_k(\rho) + D_k(\rho)F_k(\rho) \\ F_k(\rho) \end{bmatrix}$. Solusi persamaan (24) dapat diperoleh dengan mengambil invers dari (25).

Dengan menggunakan matriks transformasi balancing state, kita akan memperoleh transformed controllability dan observability Gramians

$$\tilde{P} = \tilde{Q} = \Sigma = \text{diag}(\Sigma_1, \Sigma_2), \quad \text{dengan} \quad \tilde{P} = T^{-1}PT^{-T}, \quad \tilde{Q} = T^TQT, \\ \Sigma_1 = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_r), \quad \Sigma_2 = \text{diag}(\sigma_{r+1}, \dots, \sigma_m), \quad \sigma_r > \sigma_{r+1} \quad \text{dan} \quad \sigma_j = \sqrt{\lambda_j(PQ)}, \\ \sigma_j > \sigma_{j+1}, \quad j = 1, 2, \dots, r, r+1, \dots, m.$$

Balanced parameter varying CRCF untuk $K(\rho)$ dapat dinyatakan sebagai

$$\begin{bmatrix} U(\rho) \\ V(\rho) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_k(\rho) + \bar{B}_k(\rho)\bar{F}_k(\rho) & | & \bar{B}_k(\rho) \\ \cdots & | & \cdots \\ \bar{C}_k(\rho) + D_k(\rho)\bar{F}_k(\rho) & | & D_k(\rho) \\ \bar{F}_k(\rho) & | & I \end{bmatrix}, \quad (26)$$

dimana

$$\begin{aligned}\bar{A}_k(\rho) &= T^{-1} A_k(\rho) T, & \bar{B}_k(\rho) &= T^{-1} B_k(\rho), & \bar{C}_k(\rho) &= C_k(\rho) T, \\ \bar{F}_k(\rho) &= -\bar{B}_k^T(\rho) X.\end{aligned}$$

Partisi balanced parameter varying CRCF bersesuaian dengan $\Sigma = \text{diag}(\Sigma_1, \Sigma_2)$ yaitu

$$\begin{bmatrix} U(\rho) \\ V(\rho) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{k1}(\rho) & \bar{A}_{k2}(\rho) & | & \bar{B}_{k1}(\rho) \\ \bar{A}_{k3}(\rho) & \bar{A}_{k4}(\rho) & | & \bar{B}_{k2}(\rho) \\ \hline \bar{C}_{k11}(\rho) & \bar{C}_{k12}(\rho) & | & D_k(\rho) \\ \bar{F}_{k1}(\rho) & \bar{F}_{k2}(\rho) & | & I \end{bmatrix}, \quad (27)$$

dimana

$$\bar{A}_{k1}(\rho) = \bar{A}_{k11}(\rho) + \bar{B}_{k1}(\rho) \bar{F}_{k1}(\rho), \quad \bar{A}_{k2}(\rho) = \bar{A}_{k12}(\rho) + \bar{B}_{k1}(\rho) \bar{F}_{k2}(\rho),$$

$$\bar{A}_{k3}(\rho) = \bar{A}_{k21}(\rho) + \bar{B}_{k2}(\rho) \bar{F}_{k1}(\rho), \quad \bar{A}_{k4}(\rho) = \bar{A}_{k22}(\rho) + \bar{B}_{k2}(\rho) \bar{F}_{k2}(\rho),$$

$$\bar{C}_{k11}(\rho) = \bar{C}_{k1}(\rho) + D_k(\rho) \bar{F}_{k1}(\rho), \quad \bar{C}_{k12}(\rho) = \bar{C}_{k2}(\rho) + D_k(\rho) \bar{F}_{k2}(\rho),$$

dengan

$$\bar{A}_{k11} \in R^{r \times r}, \quad \bar{A}_{k12} \in R^{r \times (m-r)}, \quad \bar{A}_{k21} \in R^{(m-r) \times r}, \quad \bar{A}_{k22} \in R^{(m-r) \times (m-r)}, \quad \bar{B}_{k1} \in R^{r \times m_y},$$

$$\bar{B}_{k2} \in R^{(m-r) \times m_y}, \quad \bar{C}_{k1} \in R^{m_u \times r}, \quad \bar{C}_{k2} \in R^{m_u \times (m-r)}, \quad \bar{F}_{k1} \in R^{m_y \times r}, \quad \bar{F}_{k2} \in R^{m_y \times (m-r)}.$$

Apabila sistem sudah balanced, states yang berkaitan dengan ϑ -smaller singular values ($\Sigma_2(\rho)$) merepresentasikan fast dynamics dari sistem. Berdasarkan konsep metoda singular perturbation, kita set derivatif semua state yang berkaitan dengan Σ_2 sama dengan nol. Selanjutnya, metoda generalized singular perturbation dapat diterapkan untuk mengaproksimasi balanced CRCF (27) dimana

matriks state space dievaluasi pada setiap polytope vertices yaitu.

$$\begin{aligned}A_{k,i} &= \bar{A}_{k11i} + \bar{B}_{k1i} \bar{F}_{k1i} - (\bar{A}_{k12i} + \bar{B}_{k1i} \bar{F}_{k2i}) \times (\bar{A}_{k22i} + \bar{B}_{k2i} \bar{F}_{k2i})^{-1} (\bar{A}_{k21i} + \bar{B}_{k2i} \bar{F}_{k1i}), \\ B_{k,i} &= \bar{B}_{k1i} - (\bar{A}_{k12i} + \bar{B}_{k1i} \bar{F}_{k2i}) \times (\bar{A}_{k22i} + \bar{B}_{k2i} \bar{F}_{k2i})^{-1} \bar{B}_{k2i}, \\ C_{ku,i} &= \bar{C}_{k1i} + D_k \bar{F}_{k1i} - (\bar{C}_{k2i} + D_k \bar{F}_{k2i}) \times (\bar{A}_{k22i} + \bar{B}_{k2i} \bar{F}_{k2i})^{-1} (\bar{A}_{k22i} + \bar{B}_{k2i} \bar{F}_{k2i})^{-1} \times \\ &\quad (\bar{A}_{k21i} + \bar{B}_{k2i} \bar{F}_{k1i}), \\ C_{kv,i} &= \bar{F}_{k1i} - \bar{F}_{k2i} (\bar{A}_{k22i} + \bar{B}_{k2i} \bar{F}_{k2i})^{-1} \times (\bar{A}_{k21i} + \bar{B}_{k2i} \bar{F}_{k1i}), \\ D_{ku,i} &= D_{ki} - (\bar{C}_{k2i} + D_k \bar{F}_{k2i}) \times (\bar{A}_{k22i} + \bar{B}_{k2i} \bar{F}_{k2i})^{-1} \bar{B}_{k2i}, \\ D_{kv,i} &= I - \bar{F}_{k2i} (\bar{A}_{k22i} + \bar{B}_{k2i} \bar{F}_{k2i})^{-1} \bar{B}_{k2i}.\end{aligned}$$

Dengan asumsi $(\bar{A}_{k22i} + \bar{B}_{k2i} \bar{F}_{k2i})$ mempunyai invers untuk setiap $i=1,2,\dots,l$. Realisasi ruang keadaan $U(\rho)$ dan $V(\rho)$ dinyatakan sebagai berikut

$$U_r(\rho) = \begin{bmatrix} A_{k_r}(\rho) & B_{k_r}(\rho) \\ C_{ku_r}(\rho) & D_{ku_r}(\rho) \end{bmatrix} := \sum_{i=1}^l \alpha_i(t) \begin{bmatrix} A_{k,i} & B_{k,i} \\ C_{ku,i} & D_{ku,i} \end{bmatrix}, \quad \alpha_i(t) \geq 0,$$

$$\sum_{i=1}^l \alpha_i(t) = 1. \quad (28)$$

$$V_r(\rho) = \begin{bmatrix} A_{k_r}(\rho) & B_{k_r}(\rho) \\ C_{kv_r}(\rho) & D_{kv_r}(\rho) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^l \alpha_i(t) \begin{bmatrix} A_{k,i} & B_{k,i} \\ C_{kv,i} & D_{kv,i} \end{bmatrix} \quad \alpha_i(t) \geq 0, \quad \sum_{i=1}^l \alpha_i(t) = 1. \quad (29)$$

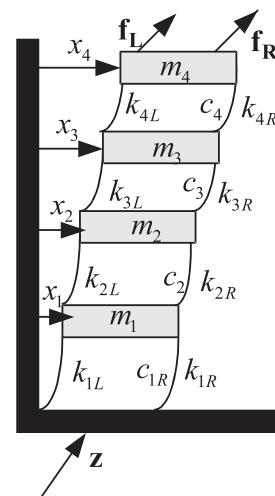
dan sistem kontrol berorde minimum r -order, dapat dituliskan dalam bentuk

$$K_r(\rho) = U_r(\rho)V_r^{-1}(\rho) = \begin{bmatrix} A_{k_r}(\rho) - B_{k_r}(\rho)D_{kv_r}^{-1}(\rho)C_{kv_r}(\rho) & B_{k_r}(\rho)D_{kv_r}^{-1}(\rho) \\ C_{ku_r}(\rho) - D_{ku_r}(\rho)D_{kv_r}^{-1}(\rho)C_{kv_r}(\rho)D_{ku_r}(\rho)D_{kv_r}^{-1}(\rho) \end{bmatrix}$$

$$:= \sum_{i=1}^l \alpha_i(t) \begin{bmatrix} A_{k_r} - B_{k_r}D_{kv_r}^{-1}C_{kv_r}(\rho) & B_{k_r}D_{kv_r}^{-1} \\ C_{ku_r} - D_{ku_r}D_{kv_r}^{-1}C_{kv_r} & D_{ku_r}D_{kv_r}^{-1} \end{bmatrix}, \alpha_i(t) \geq 0, \sum_{i=1}^l \alpha_i(t) = 1 \quad (30)$$

• HASIL SIMULASI

Berikut ini adalah hasil simulasi yang diaplikasikan ke suatu struktur fleksibel untuk mereduksi vibrasi yang terjadi. Bentuk struktur seperti yang diberikan dalam Gambar 8.



Gambar 8. Theoretical model of structure

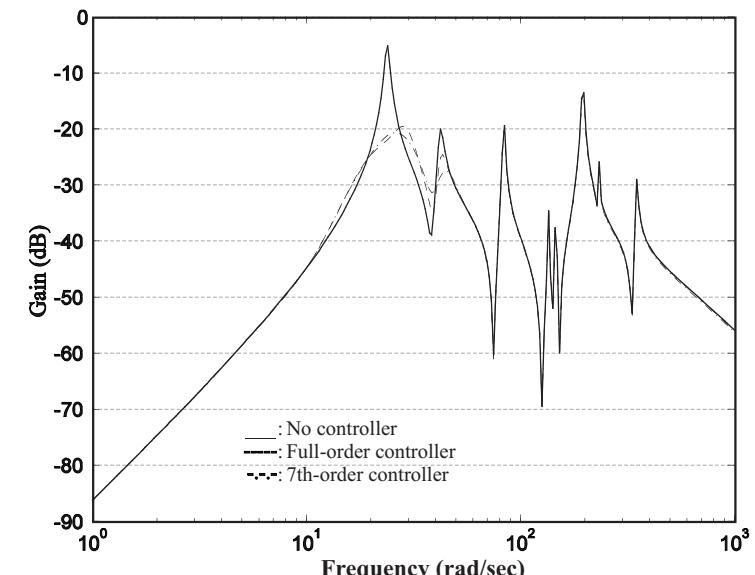
Persamaan dinamik dari masalah ini dapat dituliskan dalam bentuk

$$M_p(\rho)\ddot{x}_0(t) + C_p(\rho)\dot{x}_0(t) + K_p(\rho)x_0(t) + d_p\ddot{z}(t) + b_p f(t) = 0, \quad (31)$$

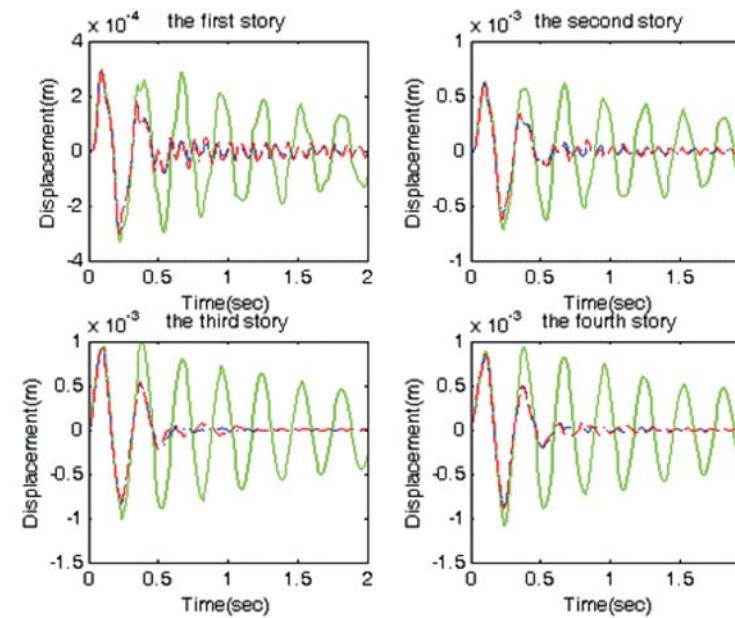
dimana M_p , C_p dan K_p adalah masing-masing inertia, damping dan stiffness dari structure. d_p adalah disturbansi untuk mengeksitasi

akselerasi \ddot{z} dan b_p adalah input matrix untuk gaya f .

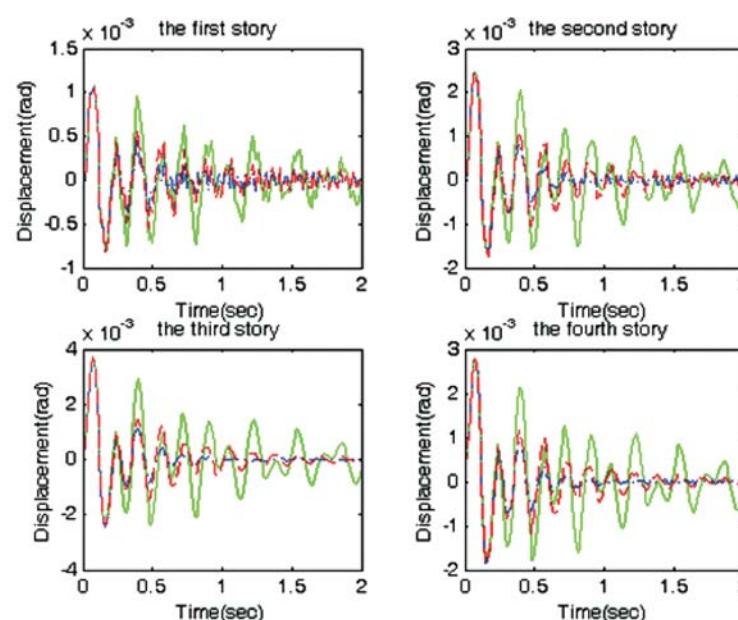
Sistem kontrol berorde penuh mempunyai orde 30 dan dengan menggunakan metoda reduksi yang telah dijelaskan sebelumnya orde pengontrol dapat direduksi sampai orde 7. Sebagaimana terlihat pada Gambar 9 bahwa performansi pengontrol berorde 30, pada mode pertama, nilai singularnya dapat direduksi sekitar 15 dB dan 8 dB pada mode kedua. Performansi ini dapat dipertahankan dengan pengontrol berorde 7. Demikian juga apabila kita lihat dari respon impulse untuk transversal dan torsional displacement, performansi pengontrol orde 30 relatif sama dengan performansi pengontrol berorde 7 sebagaimana diberikan oleh Gagmbar 10 dan Gambar 11.



Gambar 9. Frequency response of closed-loop system



Gambar 10. Impulse response of transversal displacement



Gambar 11. Impulse response of torsional displacement

3.3 Sistem Linear Berdimensi Takberhingga

Meskipun berbagai metoda untuk mereduksi orde model sistem berdimensi takberhingga telah berkembang dengan pesat, namun metoda tersebut belum banyak diaplikasikan untuk memperoleh pengontrol berorde rendah. Hal ini disebabkan karena adanya kesulitan numerik untuk menguji keefektifan metoda reduksi dari sistem semula. Persoalan ini kemudian memunculkan ide untuk mengganti sistem berdimensi takberhingga dengan sistem berskala besar yang memenuhi asumsi kekonvergenan. Pendekatan seperti ini relatif baru berkembang dalam beberapa tahun terakhir. Implementasi numerik perancangan pengontrol berorde rendah melalui reduksi model dengan balanced truncation dan LQG truncation telah di publikasikan.

Ada tiga pendekatan yang kami lakukan untuk memperoleh model tereduksi untuk sistem berdimensi takberhingga, yaitu:

- Reduksi model melalui transformasi Resiprokal
- Reduksi model melalui dekomposisi sistem
- Reduksi model berdasarkan kesetimbangan Riccati

3.3.1 Reduksi model melalui transformasi resiprokal

Bentuk abstrak dari sistem persamaan diferensial parsial dapat dinyatakan sebagai sistem linear berdimensi takberhingga dengan realisasi ruang keadaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t)\end{aligned}\tag{32}$$

dengan $x(t)$ adalah vektor keadaan pada ruang Hilbert berdimensi takberhingga χ , $u(t)$ adalah vektor input pada ruang Hilbert v dan $y(t)$ adalah vektor output pada ruang Hilbert v . Sedangkan A adalah operator linear takterbatas yang membangun C_0 -semigrup $T(t)$ pada χ , $B:v \rightarrow \chi$ merupakan operator input, $C:\chi \rightarrow v$ merupakan operator output dan $D:v \rightarrow v$. B dan C diasumsikan merupakan operator linear terbatas dan mempunyai rank hingga. Selain itu, ruang input v dan ruang output v diasumsikan berdimensi hingga.

Ide dasar untuk mengkonstruksi reduksi model berdasarkan transformasi resiprokal adalah mengkonversi teknik SPA menjadi teknik balanced truncation dari sistem resiprokal. Sistem balanced adalah realisasi yang mentransformasi sistem berdimensi takberhingga (A,B,C,D) sedemikian sehingga menghasilkan Gramian keterkontrolan dan Gramian keterobservasian yang keduanya sama dengan operator diagonal di ruang ℓ_2 yaitu ruang barisan yang terjumlah kuadrat. Balanced truncation dari sistem (A,B,C,D) diperoleh dengan cara mentrunkasi variabel yang sulit untuk dikontrol dan diobservasi yang bersesuaian dengan nilai singular Hankel kecil setelah sistem di balanced. Konsep balanced truncation tersebut hanya berlaku untuk sistem yang stabil eksponensial.

Perumuman reduksi model dengan konsep transformasi resiprokal pada sistem berdimensi takberhingga dikembangkan untuk dua kasus

yaitu, kasus yang pertama, transformasi resiprokal diterapkan pada sistem balanced di ruang ℓ_2 , kemudian dilakukan truncasi variabel keadaan yang bersesuaian nilai singular Hankel kecil sehingga diperoleh sistem resiprokal tereduksi berdimensi hingga. Hasil ini kemudian ditransformasi kembali sehingga diperoleh formula pertama model tereduksi. Sedangkan kasus kedua adalah, transformasi resiprokal diterapkan pada sistem semula sedemikian sehingga metoda balanced truncation dapat diaplikasikan pada sistem resiprokal.

Teorema. Misalkan G dan \hat{G} masing-masing adalah fungsi transfer dari sistem (A,B,C,D) dan resiprokal $(\hat{A},\hat{B},\hat{C},\hat{D})$. Jika sistem (A,B,C,D) stabil eksponensial, maka operator Hankel dari resiprokal $(\hat{A},\hat{B},\hat{C},\hat{D})$ bersifat kompak. Selain itu, nilai singular Hankel dari kedua sistem tersebut adalah identik. Berdasarkan teorema ini, teori realisasi balanced juga dapat diterapkan pada sistem resiprokal $(\hat{A},\hat{B},\hat{C},\hat{D})$. Model tereduksi yang didapat kemudian ditransformasi sehingga diperoleh formula kedua model tereduksi. Sistem tereduksi yang diperoleh bersifat stabil asimtotik serta mempertahankan karakteristik sistem semula pada kondisi tunak. Secara taklangsung, teknik ini dapat dipandang sebagai perumuman metoda SPA dari sistem FDLTI ke sistem berdimensi takberhingga.

3.3.2 Reduksi model melalui dekomposisi sistem

Metoda ini dikembangkan untuk sistem yang tidak stabil

eksponensial, tetapi terstabilkan dan terdeteksi secara eksponensial. Konsep dasar pendekatan dekomposisi sistem adalah membagi sistem atas subsistem stabil berdimensi takberhingga dan subsistem tak stabil berdimensi hingga. Kemudian, metoda balanced truncation dan transformasi resiprokal diaplikasikan pada subsistem stabil untuk memperoleh model tereduksi. Langkah berikutnya adalah menjumlahkan subsistem tak stabil dengan model tereduksi dari subsistem stabil yang merupakan model tereduksi keseluruhan dari sistem semula.

Syarat perlu tentang keterstabilan dan keterdeteksian dari sistem tereduksi dituangkan dalam teorema berikut.

Teorema. Jika sistem (A, B, C, D) terstabilkan dan terdeteksi eksponensial dengan B dan C mempunyai rank hingga, maka sistem tereduksi dengan balanced truncation dan transformasi resiprokal, keduanya bersifat terstabilkan dan terdeteksi asimtotik serta memenuhi

$$\|G(s) - G_r(s)\|_{\infty} \leq 2 \sum_{i=r+1}^{\infty} \sigma_i \quad (33)$$

3.3.3 Reduksi model berdasarkan kesetimbangan Riccati

Metoda reduksi berdasarkan kesetimbangan solusi dari dua persamaan Riccati yang muncul dalam konstruksi pengontrol LQG disebut balanced truncation LQG. Sedangkan yang bersesuaian dengan pengontrol H_{∞} disebut balanced truncation H_{∞} . Kesetimbangan

Riccati adalah realisasi yang mentransformasi sistem sehingga solusi dari persamaan Riccati kontrol dan Riccati filter, keduanya sama dengan operator diagonal yang berupa nilai karakteristik.

Perangkat utama untuk menkonstruksi kesetimbangan H_{∞} adalah keterhubungan sistem yang terstabilkan dan terdeteksi eksponensial dengan eksistensi faktorisasi koprime-kiri ternormalkan yang bersifat stabil eksponensial. Gagasan dasar untuk mengkonstruksi realisasi kesetimbangan H_{∞} ini mengadopsi metoda yang bersesuaian dengan kesetimbangan LQG.

Eksistensi kesetimbangan H_{∞} untuk sistem berdimensi takberhingga diberikan dalam teorema berikut.

Teorema. Misalkan G adalah fungsi transfer dari sistem (A, B, C, D) yang terstabilkan dan terdeteksi eksponensial, dengan B dan C keduanya adalah operator terbatas dan mempunyai rank hingga. Maka terdapat realisasi setimbang H_{∞} pada ruang ℓ_2 untuk G sedemikian sehingga solusi Riccati memenuhi

$$\tilde{X} = \tilde{Y} = \Lambda = \text{diag}(\mu_1, \mu_2, \dots) \quad (34)$$

dengan μ_i disebut nilai karakteristik H_{∞} ke i dari G , untuk $i = 1, 2, \dots, \infty$.

Model tereduksi diperoleh dengan cara mentrunkasi variabel keadaan yang bersesuaian dengan nilai karakteristik kecil setelah diurutkan

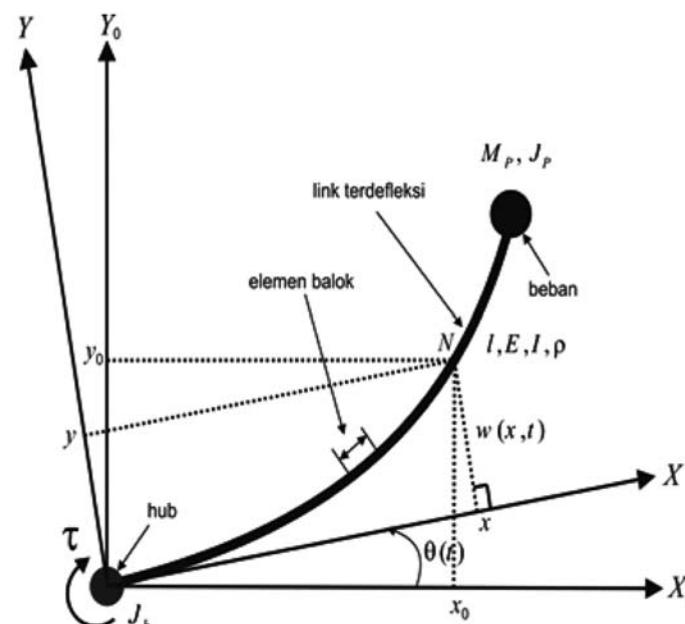
yang disebut dengan metoda balanced truncation H_∞ .

• HASIL SIMULASI

Untuk melihat kinerja pengontrol pada sistem berdimensi takberhingga, suatu simulasi terhadap single-link flexible arm dilakukan seperti yang diberikan pada Gambar 12. Persamaan gerak dari masalah ini dapat dituliskan dalam bentuk:

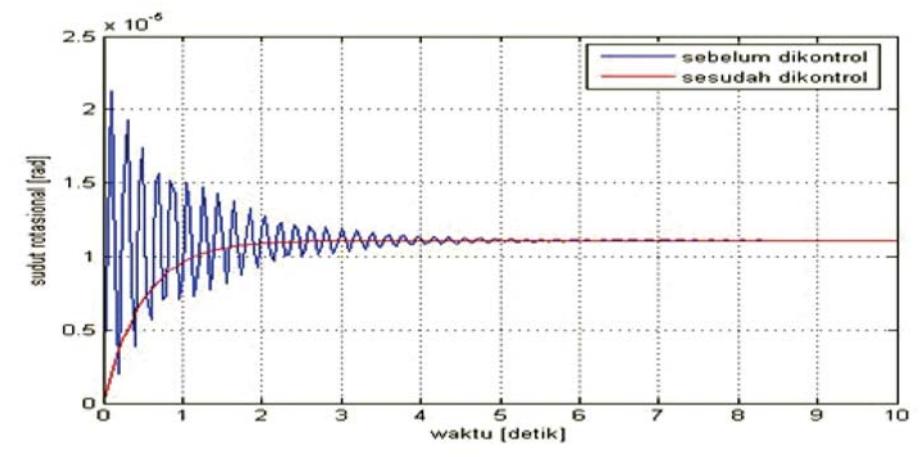
$$M(x+R)\ddot{\theta}(t) = - \left\{ M \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + C_e I \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right) \right\}$$

$$J\ddot{\theta}(t) + \int_0^L \left\{ M(x+R)^2 \ddot{\theta}(t) + M(x+R) \ddot{w}(x,t) \right\} dx = u(t)$$



Gambar 12. Single-link flexible arm

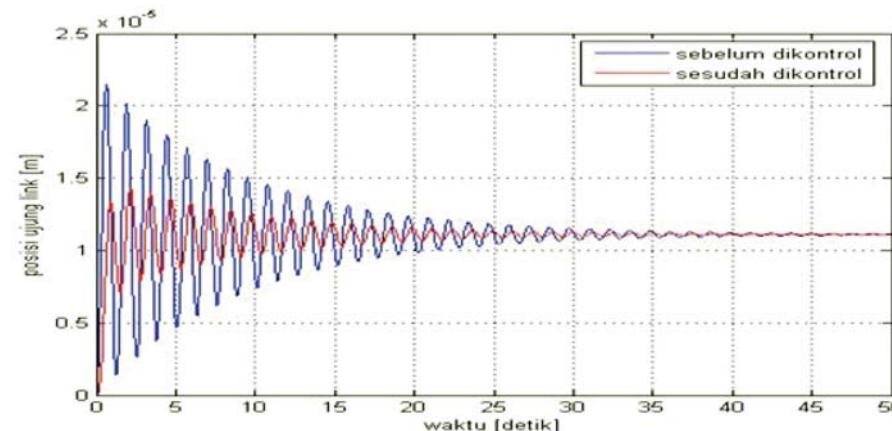
Adapun perbandingan dari sistem tanpa pengontrol dan dengan pengontrol diberikan seperti Gambar 13, Tabel 3, Gambar 14, dan Tabel 4.



Gambar 13. Impulse response of rotational displacement

Tabel 3: Perbandingan kinerja pengontrol pada torsional

Response	Sebelum dikontrol	Sesudah dikontrol
peak time	0,10 detik	3,30 detik
percent overshoot	91,35%	0 %
delay time	0,024 detik	0,35 detik
rise time	0,038 detik	1,10 detik
setting time	3,40 detik	1,45 detik



Gambar 14. Impulse response of transversal displacement

Tabel 4: Perbandingan kinerja pengontrol pada transversal

Response	Sebelum dikontrol	Sesudah dikontrol
peak time	0,65 detik	2,15 detik
percent overshoot	93,6%	28,92 %
delay time	0,22 detik	0,47 detik
rise time	0,20 detik	1,39 detik
setting time	28,5 detik	18,6 detik

4. PENUTUP

Sistem kontrol robust berorde minimum semakin diperlukan seiring dengan semakin tingginya kompetisi dalam era global ini, dimana efisiensi sudah merupakan keharusan. Secara numeric, optimisasi orde

pengontrol semakin dapat dilakukan dengan mudah akibat perkembangan teknologi komputer yang sangat pesat.

Pada masa yang akan datang, keakuratan dan representasi model akan semakin penting. Untuk itu model nonlinear akan menjadi pilihan untuk memodelkan berbagai masalah. Dengan demikian persoalan berikutnya adalah bagaimana mengoptimalkan orde pengontrol pada sistem kontrol nonlinear akan menjadi perhatian kami.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Pertama-tama kami menyampaikan penghargaan dan ucapan terimakasih kepada Pimpinan dan Anggota Majelis Guru Besar ITB atas kehormatan dan kesempatan yang diberikan sehingga kami dapat menyampaikan Pidato Ilmiah di hadapan hadirin sekalian.

Pada kesempatan yang berbahagia ini pula kami ingin menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih kepada para guru dan pendidik atas jasa yang besar dan tulus ikhlas yang telah memberikan pendidikan dan pengajaran kepada kami di SD Negeri Aeknauli dan SMP Budi Mulia Pangururan (Samosir), SMAN Perdagangan (Simalungun), Institut Teknologi Bandung dan Keio University, Jepang.

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang tulus juga kami sampaikan kepada beliau yang telah mempromosikan kami, mendukung dan memberi masukan yaitu Prof. Dr. Edy Soewono, Prof. Dr. Edy Tri

Baskoro, Prof. Dr. Ismunandar, Prof. Dr. Pudji Astuti, dan Prof. Dr. Akhmaloka serta seluruh Staf Dosen dan karyawan FMIPA-ITB. Secara khusus ucapan terima kasih dan penghargaan disampaikan kepada seluruh staf di KK Matematika Industri dan Keuangan FMIPA-ITB.

Terima kasih dan penghargaan yang tinggi disampaikan kepada Prof. Dr. S.M Nababan, Prof. Dr. R.K. Sembiring, Dr. Kusmayanto Kadiman, E. Hutahean, MS, atas bimbingan selama studi di program Sarjana maupun Magister di ITB. Demikian juga kepada Prof. Kazuo Yoshida(alm), Prof. Toru Watanabe dan Dr. Susumu Hara, atas bimbingan yang sangat berharga selama mengikuti program Doktor di Keio University, Jepang.

Terima kasih yang sebesar-besarnya disampaikan kepada orang tua kami ayahanda J. Saragih (alm.) dan ibunda M. Sihaloho (almh.), Ibu Mertua A. Pangaribuan serta Abang, Adik, Ito dan Lae kami atas kasih sayang serta dukungannya.

Secara khusus terima kasih kami sampaikan kepada istri tercinta, Fenti Tambunan yang senantiasa mendampingi dan memberikan dukungan dalam menjalankan tugas dalam bidang pendidikan, dan anak-anakku tersayang Diova Rika Febriana Saragih, Hakase Hasiholan Saragih, dan Maria Agnesi Saragih.

BAHAN RUJUKAN

1. Apkarian, P. and Adam, R. J., 1997, Advanced Gain Scheduling

- Techniques for Uncertain System, *Proceeding of the American Control Conference*, Vol. 5, pp. 3331-3335.
2. Apkarian, P. and Biannie, J. M., 1995, Self-Scheduled Control of Missile via Linear Matrix Inequality, *Journal of Guidance, Control and Dynamic*, Vol.18, No.3, pp.532-538.
3. Apkarian, P., Gahinet, P. and Becker, G., 1995, Self-Scheduled Control of Linear Parameter Varying Systems: a Design Example, *Automatica*, Vol. 31, No. 9, pp. 1251-1261.
4. Barnett S., 1971, Matrices in Control Theory, Van Nostrand Reinhold, London. p. 10 Kailath T., 1980, Linear Systems, Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ.
5. Bode H.W., 1945, Network Analysis and Feedback Amplifier Design, D. VanNostrand Company, Inc., Princeton, N.J.
6. Boyd, S., El Ghaoui L., Feron E. and Balakrishnan V., 1994, Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory, SIAM.
7. Do Chang Oh, Kyeong Ho Bang and Hong Bang Park, 1997, Controller Order Reduction using Singular Perturbation Approximation, *Automatica*, Vol.33, No. 6, pp. 1203-1207.
8. Doyle J.C., Glover K., Khargonekar P. and Francis, B.A., 1989, State-space solution to standard H₂ and H₁ control problems, *IEEE Trans. Auto Control*, 34, (8), 831–846.
9. El-Zobaidi, H. M. H. and Jaimoukha, I., 1998, Robust Control and Model and Controller Reduction of Linear Parameter Varying Systems, *Proc. of the 37th IEEE Conference on Decision and Control*, Tampa, Florida- USA, Vol. 3, pp. 3015-3020.
10. Fatmawati, **Roberd Saragih**, Bambang, R., and Yudi Soeharyadi,

Model and controller order reduction for infinite dimensional systems, ITB Journal of Engineering Science, Vol. 42, No. 1, pp . 1-16, 2010.

11. Fatmawati, **Roberd Saragih**, Bambang, R., and Yudi Soeharyadi, Balanced Truncation for Unstable Infinite Dimensional Systems Via Reciprocal Transformation, International Journal of Control, Automation and Systems (Accepted).
12. Francis B.A., 1987, A Course in H1 Control Theory, Springer Verlag, NY.
13. Grimble M.J. and Johnson M.A., 1988, Optimal Multivariable Control and Estimation Theory: Theory and Applications, Vols I and II, Wiley, Chichester.
14. Hardy G.H., 1915, The mean value of the modulus of an analytic function, Proc. London Math. Soc., 14, 269–277.
15. Kalman R.E., 1960, A new approach to linear filtering and prediction problems, Journal of Basic Engineering, 82, 35–45.
16. Kwakernaak H., 1986, A polynomial approach to minimax-frequency domain optimization of multivariable feedback systems, Int. J. Control, 117–156.
17. Kwakernaak H., 1984, Minimax frequency domain optimization of multivariable linear feedback systems, IFAC World Congress, Budapest, Hungary.
18. Kwakernaak H., 1985, Minimax frequency domain performance and robustness optimization of linear feedback systems, IEEE Trans. Auto. Control, AC-30, (10), 994–1004.
19. Kwakernaak H., 1990, The polynomial approach to H1-optimal

regulation, Lecture Notes, CIMIE Course on Recent Developments in H1 Control Theory, Como Villa Olmo.

20. Kwakernaak H., 1990, MATLAB Macros for Polynomial H1 Control System Optimization, Memorandum 881, Faculty of Maths, University of Twente, The Netherlands.
21. Liu, Y. and Anderson, B.D.O., Singular Perturbation Approximation of Balanced Systems, International Journal of Control, Vol. 50, No.4, 1379-1405, 1989.
22. MacFarlane A.G.J., 1971, Linear multivariable feedback theory: a survey, IFAC Symposium on Multivariable Control Systems, Dusseldorf.
23. Mayne D.Q., 1973, The design of linear multivariable systems, Automatica, 9, 201–207.
24. Moore, B.C., Principal Component Analysis in Linear Systems: Controllability, Observability, and Model Reduction, IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. AC-26, No.1, 17-31, 1981.
25. Morari M., and Zafiriou E., 1989, Robust Process Control, Prentice Hall: Hemel Hemstead.
26. Mustafa D. and Bernstein D. S., 1991, LQG cost bounds in discrete-time H2/H1 control, Proc. Symposium Organised by Inst. of Meas. and Control on Robust Control System Design Using H1 and Related Methods. P. Hammond (ed.), 295–307.
27. Nyquist H., 1932, Regeneration Theory Bell System Tech.
28. Petersen I.R., Anderson B.D.O. and Jonckheere E.A., 1991, A first principle solution to the non-singular H1 control problem, Int. J. Robust Nonlinear Control, 2, 181–185.

29. Prime H., 1969, Modern Concepts in Control Theory, McGraw-Hill, pp. 140–142.
30. Ravi, R., Pascoal, A. M., and Khargonekar, P. P., 1992, Normalized Coprime Factorizations for Linear Time Varying Systems, *Systems and Control Letters*, Vol.18, pp. 455-465.
31. Roberd Saragih and Kazuo Yoshida, Order Reduction Method of Controller for Structural Control Based on LMIs, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 1998, Vol. 64, No. 623, 218-225.
32. Roberd Saragih and Kazuo Yoshida, Reduced-Order Reduction of Transverse-Torsional Coupled Vibration Based on Modal Truncation, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 1998, Vol. 64, No. 626, 218-225.
33. Saragih, R. and Yoshida, K., 1999, Reduced-Order Controller of Transverse-Torsional Coupled Vibration Based on Linear Matrix Inequalities, *Journal of Vibration and Control*, vol. 5, pp. 907-923.
34. Roberd Saragih and Widowati, Coprime Factor Reduction of Parameter Varying Controller, *International Journal of Control, Automation, and System*, Vol.6, No. 6, 2008.
35. Stoervogel A., 1992, The H1 Control Problem, a State Space Approach, Prentice Hall, London.
36. Vidyasagar M., 1985, Control System Synthesis: A Factorization Approach, the MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
37. Widowati, et. al, 2004, Model Reduction for Unstable LPV Systems Based on Coprime Factorizations and Singular Perturbation, *Proceedings of The 5th Asian Control Conference*, Melbourne, Australia, pp. 692-699.
38. Wiener N., 1949, Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series, with Engineering Applications, New York Technology Press and Wiley (Originally issued in Feb. 1942 as a classified National Defence Research Council Report).
39. Wood, G. D., Goddard, P. J., and Glover, K., Approximation of Linear Parameter-Varying Systems, *Proceedings of 35th IEEE Conference on Decision and Control*, Kobe, Vol. 4, pp. 406-411, 1996.
40. Zames G., 1979, Feedback and optimal sensitivity: model reference transformation, weighted seminorms, and approximate inverses, Proc. 17th Allerton Conference, 744–752.
41. Zames G., 1981, Feedback and optimal sensitivity: model reference transformations, multiplicative seminorms and approximate inverses, *IEEE Trans. Auto. Control*, AC-26, 301–320.
42. Zames G. and Francis B.A., 1981, A new approach to classical frequency methods feedback and minimax sensitivity, *IEEE Conf. on Dec. and Control*, San Diego, 867–874.
43. Zhou K., Doyle, J., Glover K. and Bodenheimer B., 1990, Mixed H2 and H1 control, ACC Conf. Proc., San Diego, California, 2502–2507.
44. Zhou K., 1992, Comparison between H2 and H1 controllers, *IEEE Trans. Auto. Control*, 37, (8), 1261–1265.
45. Zhou, K., and Chen, J., 1995, Performance Bounds for Coprime Factor Controller Reductions, *System and Control Letter*, Vol. 26, pp.119-127.
46. Zhou, K., D'Souza, C., and Cloutier, J. R., 1995, Structurally Balanced Controller Order Reduction with Guaranteed Closed Loop Performance, *System and Control letters*, Vol. 24, pp.235-242.

CURRICULUM VITAE



Nama : **ROBERD SARAGIH**
Tmpt. & tgl. lahir: Aeknauli, 27 Desember 1962
Pekerjaan : Staf Pengajar Fakultas
Matematika dan Ilmu
Pengetahuan Alam (FMIPA)
ITB

Alamat Kantor : KK Matematika Industri dan Keuangan, FMIPA-ITB,
Jl. Ganesa 10, Bandung 40132,
Telp. (022) 2502545
Nama Isteri : Fenti Hotnida Tambunan
Nama Anak : Diova Rika Febriana Saragih
Hakase Hasiholan Saragih
Maria Agnesi Saragih

1. RIWAYAT PENDIDIKAN:

- Sarjana Matematika, ITB, Bandung, 1986.
- Magister dalam bidang Kontrol, ITB, Bandung, 1993.
- Doktor dalam bidang Sistem Kontrol, Keio University, Japan, 1998.

2. RIWAYAT PENUGASAN di ITB:

- Staf Pengajar FMIPA-ITB, 1987 - sekarang.

- Anggota Tim Studi Kebijakan Tugas Akhir dan Konseling, 1999 – 2000.
- Sekretaris Departemen Matematika Bidang Kemahasiswaan, FMIPA-ITB, 2000 – 2001.
- Ketua Panitia Konferensi Nasional Matematika X, 2000.
- Manager Program, Project QUE-ITB, 2001 – 2002.
- Anggota Tim Penyusun Proporsal Program B, 2004.
- Sekertaris Akademik, Project QUE-ITB, 2002 – 2004.
- Ketua Tim Penyusun Akreditasi Program Magister dan Aktuaria, 2004.
- Anggota Tim Gugus Tugas Penyusunan Evaluasi Diri MA, 2005.
- Anggota Tim Verifikasi Angka Kredit TFA-FMIPA ITB, 2005.
- Nara Sumber Penyusunan Evaluasi Diri MA, 2006.
- Anggota Tim Perumus Rekomendasi Akreditasi, 2006.
- Anggota Tim Seleksi Program PascaSarjana 2006.
- Anggota Tim Penilai Angka Kredit dan Kinerja FMIPA ITB, 2006-2010.
- Ketua Kelompok Keilmuan Matematika Industri dan Keuangan, 2005 – sekarang.
- Sekretaris Tim Pengkaji Program Studi Magister Pengajaran MA, 2008.
- Anggota Tim Penyusun Akreditasi Program Doktor, 2008.
- Anggota Tim Penyusun Akreditasi Program Sarjana Matematika, 2008.

- Anggota Komisi Kegurubesaran MGB-ITB, 2010.
- Anggota Komisi Permasalahan Bangsa MGB-ITB, 2010.
- Chair of the Organizing Committee of the 3rd International conference of Mathematics and Natural Sciences, 2010.

3. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL FMIPA-ITB:

- Guru Besar, 2010
- Lektor Kepala, 2002
- Lektor, 2001
- Lektor Madya, 1999
- Lektor Muda, 1995
- Asisten Ahli, 1993
- Asisten Ahli Madya, 1990

4. KEGIATAN PENELITIAN:

1. Studi Persamaan Diferensial Acak, 1987, OPF-ITB.
2. Sifat-sifat statistik solusi persamaan diferensial stokastik, 1990, OPF-ITB.
3. Suatu estimator optimal untuk lapangan acak, 1991, OPF-ITB.
4. Keterkontrolan dan Keteramatatan system linear stokastik, 1992, OPF-ITB.
5. Menentukan Sistem Kontrol Berorde Minimum yang Mempertahankan Kestabilan dan Performansi, 1999, DIP-ITB.
6. Mereduksi orde Pengontrol, 1999, P4M-ITB.

7. Mereduksi vibrasi pada struktur elastis, 1999, Project QUE.
8. Pengembangan Teori Kontrol Optimum dan Penerapannya dalam Masalah Perminyakan, 2000, Project QUE.
9. Model optimasi jaringan pipa gas di Indonesia, 2000-2002, RUT VIII, RISTEK.
10. Optimisasi distribusi jaringan pipa gas dan minyak, 2002-sekarang, OPINET.
11. Mereduksi Orde Pengontrol Sistem Linear dengan Parameter Berubah Terhadap Waktu, 2004-2005, HIBAH PEKERTI.
12. Robust Control Berorde Minimum untuk Sistem Linear dengan Parameter Berubah Terhadap Waktu, 2006, RISET ITB.
13. Mereduksi Vibrasi pada Sistem Elastis dengan Menggunakan - Control Berorde Minimum, 2007, RISET ITB.
14. Masalah Optimasi pada Pengendali Sistem Bilinear, 2009, RISET ITB.
15. Sistem Kontrol Berorde Minimum untuk Sistem Parameter Terdistribusi, 2009, HIBAH PASCASARJANA.
16. Aproksimasi Model dan Pengontrol untuk Sistem Terdistribusi Spasial, 2009, International Publication research Grant Batch III
17. Mereduksi orde model sistem bilinear, 2010, RISET ITB.

5. PUBLIKASI

1. **Roberd Saragih** and Kazou Yoshida, Reduced-Order Controller of Transverse-Torsional Coupled Vibration Based on LMIs, *Journal*

- of Vibration and Control*, Vol. 5 No. 6, p. 907-923, 1999.
2. **Roberd Saragih** and Kazuo Yoshida, Reduced-Order Reduction of Transverse-Torsional Coupled Vibration Based on Modal Truncation, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 64, No. 626, 218-225, 1998.
3. **Roberd Saragih** and Kazuo Yoshida, Order Reduction Method of Controller for Structural Control Based on LMIs, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 64, No. 623, 218-225, 1998.
4. Widowati, **R. Saragih**, B. Riyanto, Controller Reduction of Parameter Dependent Systems, *Proceedings ITB on Engineering Science*, Vol. 36 B No. 1, 43-56, 2004.
5. J. Naiborhu, S.M Nababan, **R. Saragih**, and I. Pranoto, Direct Gradient Descent Control and Sontag's Formula on Asymptotic Stability of General Nonlinear Control System, *International Journal of Control, Automation, and System*, Vol.3, No.2, pp. 244-251, 2005.
6. J. Naiborhu, S.M Nababan, **R. Saragih**, and I. Pranoto, Direct Gradient Descent Control as a Dynamic Feedback Control for Linear Syatem, *Bull. Malaysian Mathematical Science Society* (2) 29(1), pp. 131-146, 2006.
7. **Roberd Saragih** and Widowati, Coprime Factor Reduction of Parameter Varying Controller, *International Journal of Control, Automation, and System*, Vol.6, No. 6, pp. 836-844, 2008.

8. Roberd Saragih and Taufan Mahardhika, Design of Passive Control for Flexible Structure using Genetic Algorithm, *Far East Journal of Applied Mathematics*, Vol. 40, No. 1, pp. 19-31, 2010.
9. Fatmawati, Roberd Saragih, Bambang, R., and Yudi Soeharyadi, Model and controller order reduction for infinite dimensional systems, *ITB Journal of Engineering Science*, Vol. 42, No. 1, pp . 1-16, 2010.
10. Widowati dan Roberd Saragih, Perancangan Pengontrol Berorde Minimum Melalui Reduksi Orde Plant, *Journal of Indonesian Mathematical Society MIHMI*, Vol. 7, No. 2, 99-109, 2001.
11. Widowati dan Roberd Saragih, Mereduksi Orde Model dengan Menggunakan Singular Perturbasi, *Journal of Indonesian Mathematical Society MIHMI*, Vol. 6, No. 5, 569-574, 2000.
12. Mia Megania dan Roberd Saragih, Pengontrol Berorde Minimum yang Mempertahankan Performansi Lup Tertutup, *Journal of Indonesian Mathematical Society MIHMI*, Vol. 8, No. 1, 17-33, 2002.
13. D. Chaerani, S. Siregar, S. M. Nababan, dan Roberd Saragih, Optimisasi Diameter Jaringan Pipa Gas Alam Sebagai Suatu Alternatif untuk Meningkatkan Pendapatan Nasional, *Journal of Indonesian Mathematical Society MIHMI*, Vol. 7, No. 1, 49-57, 2001.
14. Roberd Saragih, Optimal Dimensioning of Pipeline for Gathering Network, *Jurnal Matematika atau Pembelajarannya*, Tahun VII, Edisi Khusus, Juli 2002, 297-303.
15. Arif Rahman Hakim dan Roberd Saragih, Parameterisasi Pengontrol Suboptimal di RH_2 , *Jurnal Matematika atau Pembelajarannya*, Tahun VII, Edisi Khusus, Juli 2002, 882-887.
16. Widowati, S. M. Nababan, dan Roberd Saragih, Kendali Kokoh Gain Scheduling untuk Sistem yang Tergantung pada Parameter, *Jurnal Matematika atau Pembelajarannya*, Tahun VII, Edisi Khusus, Juli 2002, 1158-1162.
17. Widowati, R. Saragih, B. Riyanto, dan S. M. Nababan, Transformasi Reciprocal pada Reduksi Model dari Sistem dengan Parameter Berubah-ubah, Prosiding Seminar Nasional Matematika, *Jurnal Matematika Integratif*, Vol.2, Edisi Khusus, 2003.
18. Adiwijaya, Roberd Saragih, and Bambang Riyanto, Sistem Kontrol Umpam Balik untuk Aliran TCP, *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Telekomunikasi*, Vol.8, No.2, 73-77, 2003.
19. Adiwijaya, Roberd Saragih, and Bambang Riyanto, Kontrol Kongesti Aliran TCP pada suatu Router dengan Pengontrol H^∞ , *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Telekomunikasi*, Vol.9, No.2, 87-92, 2004.
20. J. Naiborhu, S.M. Nababan, R. Saragih and I. Pranoto, Application of the direct gradient descent control in stabilization of nonlinear systems with non-stabilizable linearization via two examples, *Journal of Indonesian Mathematical Society MIHMI*, Vol.11, No.2, 89-

- 99, 2005.
21. Widowati, S.M. Nababan, B. Ryanto, **R. Saragih**, Reduced-Order Parameter Varying Controller with Guaranteed Closed-loop Performance, *Journal of Indonesian Mathematical Society MIHMI*, Vol.12, No.1, 1-15, 2006.
22. **Roberd Saragih** and Dede Tarwidi, Vibration Reduction on Single-link Flexible Manipulator using H^∞ -control, *Journal of Indonesian Mathematical Society MIHMI*, Vol. 14, No. 2, pp. 73-82, 2008.
23. **Roberd Saragih** and Kazuo Yoshida, Order Reduction Method of Controller Based on modal Truncation for Flexible Structures, *Proc.of the 3rd Int. Conf, on MOVIC*, Vol.1,30-35, Chiba, 1996.
24. **Roberd Saragih** and Kazuo Yoshida, Reduced-Order Controller Based on Balanced Truncation with Maintaining Closed-Loop Performance, *Proc of the Scientific Meeting of Indonesian Student for Science and Technology*, 106-112, Tokyo, 1996.
25. **Roberd Saragih** and Kazuo Yoshida, Controller Reduction of Flexible Structures Based on Modal Truncation, *Proc. of the 74th JSME Fall Annual Meeting*, 480-481, Kyoto, 1996.
26. **Roberd Saragih** and Kazuo Yoshida, Order Reduction of Controller Based on LMIs Improving error Bounds, *Proc. of the DETC7/VIB-3819*, Sacramento, 1997.
27. **Roberd Saragih** and Kazuo Yoshida, Order Reduction of Controller Based on LMIs, *Proc. of D&D'97 Conference*, 231-234, Tokyo, 1997.
28. **Roberd Saragih** and Kazuo Yoshida, Reduced-Order of Structural Control using Singular Perturbation Approach, *Proc. of the 4th Int. Conf. on MOVIC*, Vol. 3, 539-544, Zuric, 1998.
29. **Roberd Saragih** and Kazuo Yoshida, Order Reduction of Controller using Singular Perturbation Approach, *Proc. of the D&D'97 Conference*, 609-612, Hokkaido, 1998.
30. **Roberd Saragih** and Kazuo Yoshida, Reduced-Order Contoller Design of Active Vibration Absorbers for Structural Control, Proceedings of Second World Conference on Structural Control, *John Wiley & Sons*, p. 2087-2096, 1999.
31. **Roberd Saragih**, Balanced controller reduction with guaranteed closed-loop performance, *SEAMS-GMU Int. Conf. on Math. And Its Appl.*, Yogyakarta, Juli 1999.
32. **Roberd Saragih**, Computational issues in reducing order of controller, *Asia Pacific Int. Congress on Eng. Comp. Modeling & Signal Processing*, Bandung, November 1999.
33. **Roberd Saragih**, Structural Control Order Reduction based on Homotopy Algorithm, *Proc. of the fifth Int. Conf. on MOVIC*, Vol. 2, 749-753, Sydney, 2000.
34. **Roberd Saragih**, Some Computation Aspects in Model-Order Reduction of Flexible Structures, *Proceedings of the International*

Conference on Scientific & Engineering Computation, Imperial College Press, p.626-631, 2002.

35. Widowati, **R. Saragih**, B. Riyanto, and S. M. Nababan, Reduction Model for Unstable LPV Systems Based on Coprime Factorizations and Singular Perturbation, *Proceeding of The 5th Asian Control Conference*, July 20-23, 2004.
36. Widowati, **R. Saragih**, B. Riyanto, and S. M. Nababan, Application of Reduced-order LPV Controller to Jet Engine Compressor Model, *Proc. of The International Conference on Statistics and Mathematics and Its Applications in The Development of Science and Technology*, 241-247, 2004.
37. Widowati, **R. Saragih**, B. Riyanto, and S. M. Nababan, Model Reduction of Linear Parameter Varying System, International Conference on Mathematics and Its Applications, 376-383, 2003.
38. **Roberd Saragih**, Design of Reduced-order μ -Controller for Flexible Structures, *Proc. IRCMSA*, Vol.I, 175-181, 2005
39. **Roberd Saragih**, Model reduction of linear parameter varying systems based on LMIs, *Proc. of the 2nd IMT-GT Regional Conference on Mathematics, Statistics and Their Applications, Penang*, 2006, pp.235-241.
40. **Roberd Saragih**, Tracking optimal control for flexible system, *Proceeding of SEAMS-GMU Conference*, pp. 433-439, 2007.
41. **Roberd Saragih**, Vibration reduction for flexible sytem using

mixed H-2/H-infinity control based on state-feedback LMIs, *Mathematical Science in Engineering Conference Proceedings*, Putrajaya, pp.101-109, 2007.

42. Fatmawati, **Roberd Saragih**, Bambang R., Parameterized LMI approach to H-infinity control design for spatially invariant systems, *Proc. OfICIUS*, Bali, pp.383-387, 2007.
43. **Roberd Saragih**, Passive Controller design using linear matrix inequalities, *Proceedings of the 5th Asian Mathematical Conference*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2009.
44. **Roberd Saragih** and Taufan Mahardhika, Design of passive control for flexible structure using genetic algorithm, *Proceeding of the 7th IEEE International Conference on Control and Automation, Christchurch*, 9-11 December, pp. 2249-2253, 2009.
45. **Roberd Saragih**, Reduced-order controller for linear systems, *Proceeding of the 4th International Conference on Research and Education in Mathematics*, 21-23 October, Kuala Lumpur, pp. 57-67, 2009.
46. Fatmawati, **Roberd Saragih**, Bambang, R., and Yudi Soeharyadi, Model reduction for infinite dimensional systems using reciprocal transformation, *Proceeding of the 7th Asian Control Conference*, Hongkong, 2009.
47. **Roberd Saragih**, Designing Active Vibration Control with minimum order for Flexible Structure, *Proceeding of the 8th IEEE*

International Conference on Control and Automation, Xiamen, 9-11 June, pp. 450-453, 2010.

48. **Roberd Saragih**, Control Problem in Distributed System, *Konferensi Nasional Matematika XII*, Bali, 2004.
49. **Roberd Saragih** dan Ednawati Rainarli, Aplikasi control bilinear pada sum-sum tulang dengan kemoterapi cell-cycle specific, *Prosiding Konferensi Nasional Matematika XIII*, Semarang, 793- 800, 2006.
50. Fatmawati, **Roberd Saragih**, and Bambang Ryanto, Model Reduction for Minimum Order Control Design for Infinite Dimensional, *Prosiding Konferensi Nasional Matematika XIII*, 705-712, Semarang, 2006.
51. Fatmawati, **Roberd Saragih**, and Bambang Ryanto, Model Reduction for a Class of Infinite Dimensional System Using Singular Perturbation Approximation, *Prosiding Seminar Instrumentasi dan Kontrol*, Bandung, 2007.
52. **Roberd Saragih** dan Agus Gozali, Optimisasi injeksi surfaktan-polimer pada proses perolehan minyak tahap lanjut dengan menggunakan kontrol optimal H_2 , *Prosiding Konferensi Nasional Matematika XIV*, Palembang, 2008.

6. PRESENTASI DI PERTEMUAN ILMIAH

1. The 3rd International Conference on Motion and Vibration Control

- (MOVIC), Chiba, 1996
2. The 4th International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC), Zuric, 1998.
3. The 5th International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC), Sydney, 2000.
4. The Scientific Meeting of Indonesian Student for Science and Technology, Tokyo, 1996.
5. The 74th Japan Society of Mechanical Engineering(JSME) Fall Annual Meeting, Kyoto, 1996.
6. The DETC7/VIB-3819, Sacramento, USA, 1997.
7. The Dynamic and Design Conference, Tokyo, 1997.
8. The Dynamic and Design Conference, Hokkaido, 1998.
9. The Second World Conference on Structural Control, Kyoto, 1999.
10. The SEAMS-GMU International Conference on Mathematics and Its Applications, Jogjakarta, 1999.
11. The SEAMS-GMU International Conference on Mathematics and Its Applications, Jogjakarta, 2003.
12. Asia Pacific International Congress on Engineering Computation, Modeling & Signal Processing, Bandung, 1999.
13. The International Conference on Scientific & Engineering Computation, Singapore, 2002.
14. The first IMT-GT Regional Conference on Mathematics, Statistics and Their Applications, Parapat, 2005.

15. The 2nd IMT-GT Regional Conference on Mathematics, Statistics and Their Applications, Penang, 2006.
16. The SEAMS-GMU International Conference on Mathematics and Its Applications, Jogjakarta, 2007.
17. Mathematical Science in Engineering Conference, Putrajaya, Malaysia, 2007.
18. The 5th Asian Mathematical Conference, Kuala Lumpur, Malaysia 2009.
19. The 7th IEEE International Conference on Control and Automation, Christchurch, 9-11 December, 2009.
20. The 4th International Conference on Research and Education in Mathematics, Kuala Lumpur, 21-23 October, 2009 (**Invited Speaker**).
21. The International Symposium on Computational Science, Bali, 2009.
22. The 8th IEEE International Conference on Control and Automation, Xiamen, 9-11 June, 2010.
23. The 1st International Conference on Computation for Science and Technology, Chiang Mai, Thailand, 4-6 Agustus 2010 (**Invited Speaker**).
24. Konferensi Nasional Matematika XI, Malang, 2002.
25. Konferensi Nasional Matematika XII, Bali, 2004.
26. Konferensi Nasional Matematika XIII, Semarang, 2006.
27. Konferensi Nasional Matematika XIV, Palembang, 2008.
28. Konferensi Nasional Matematika XV, Menado, 2010 (**Pembicara Utama**).
29. Seminar Nasional dan Rapat Tahunan Bidang Ilmu MIPA, Pekanbaru, 2010 (**Pembicara Utama**).