

Pembangkitan *Decoupled Residual* untuk Isolasi Kesalahan Aktuator Pesawat Terbang Bergerak *Lateral*

Samiadji Herdjunto¹

Abstract— Implementation of time scheduled maintenance is not suitable if it is applied for systems with many varieties of heavy workload and harsh environment, since on that condition components degrade earlier than those under normal condition. Therefore, it has been shifted to condition-based maintenance (CBM). One important aspect, among others, toward successful implementation of CBM method is fault isolation. The problem to be investigated is related to generate decoupled residual for actuator fault isolation of an aircraft on lateral movement. The proposed solution for that problem is to implement combination of transformation matrix and special filter. Transformation matrix is used to convert feature locations of actuator faults to signature vectors. Moreover, the signature vectors will be processed further by the special filter to generate decoupled residuals. It is assumed that the actuator is the only fault when the aircraft is on lateral movement. The results show that special filter and transformation matrix can be designed so that the residual of aileron actuator fault is decoupled from the residual of rudder actuator fault.

Intisari— Impelemntasi pemeliharaan sistem yang berbasis *time-schedule* tidak cocok untuk kondisi sistem yang memiliki beban dengan variasi yang tinggi dan kondisi lingkungan yang buruk karena pada kondisi tersebut komponen-komponen sistem mengalami degradasi lebih cepat dibandingkan dengan kondisi normal. Oleh karena itu, pemeliharaan bergeser menjadi berbasis kondisi sistem. Salah satu aspek penting adalah penentuan lokasi kesalahan. Permasalahan yang harus diselesaikan adalah membangkitkan *decoupled residual* untuk isolasi kesalahan aktuator untuk pesawat terbang yang bergerak lateral. Solusi yang diusulkan menggunakan kombinasi matriks tranformasi dan tapis khusus. Matriks transformasi berfungsi untuk mengubah ciri lokasi-ciri lokasi kesalahan aktuator menjadi *signature vector*. Adapun *signature vector* akan diproses lebih lanjut untuk menghasilkan *residual-residual* yang saling *decoupled* yang berhubungan dengan kesalahan-kesalahan aktuator. Diasumsikan kesalahan hanya berasal dari aktuator untuk pesawat terbang yang bergerak lateral. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi tapis khusus dan matriks transformasi telah berhasil dirancang sehingga menghasilkan *residual* kesalahan aktuator *aileron* yang *decoupled* terhadap *residual* kesalahan aktuator *rudder*.

Kata Kunci— Tapis Khusus, Matriks Transformasi, Gerak Lateral, Pesawat Terbang, Deteksi, Isolasi, Aktuator

I. PENDAHULUAN

Tujuan pemeliharaan (*maintenance*) adalah untuk mengurangi terjadinya kerusakan fatal sistem akibat

¹Staf pengajar, Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Universitas Gadjah Mada, Jalan Grafika 2 Yogyakarta 55281, INDONESIA (telp: 0274-90-2202; fax: 552305; e-mail: samiadji@ugm.ac.id)

kegagalan komponen yang dapat menimbulkan kerugian material atau bahkan hilangnya nyawa manusia. Bentuk awal atau perawatan tradisional disebut *reactive maintenance*. Pada metode ini pemeliharaan dilakukan setelah komponen mengalami kegagalan. Cara pemeliharaan berikutnya adalah yang sekarang masih lazim dilakukan, yaitu inspeksi secara periodis untuk memonitor tentang keadaan sistem. Bila beban kerja sistem sering tinggi maka komponen akan mengalami degradasi lebih awal sehingga bila dipakai metode inspeksi periodis bisa terjadi keterlambatan dalam melakukan evaluasi tentang keadaan sistem. Akibatnya sistem sudah terlanjur mengalami kerusakan tanpa terdeteksi sehingga diperlukan biaya tambahan yang tinggi untuk perbaikan atau penggantian komponen. Untuk itu perlu metode baru untuk pemeliharaan yaitu dapat memonitor kondisi sistem dari waktu ke waktu. Oleh karena itu, komponen yang mengalami degradasi, dalam hal ini *actuator*, harus dapat dideteksi dan diketahui lokasinya dengan benar.

Pada awalnya pemeliharaan sistem banyak menggunakan data statistik [1]. Karena perkembangan teknologi yang pesat maka sistem cenderung membesar dan dioperasikan pada daerah maksimumnya dalam waktu yang lama. Oleh karena itu, beban kerja sistem menjadi tinggi dan sangat variatif sehingga pemeliharaan sistem berbasis data statistik menjadi mahal. Berbasis observasi tersebut, akhir-akhir ini pemeliharaan sistem bergeser menjadi pemeliharaan sistem berbasis model [2], [3]. Unsur-unsur yang penting dalam pemeliharaan berbasis model adalah bisa dideteksi adanya kesalahan bahkan sampai penentuan lokasi kesalahan.

Deteksi kesalahan dengan menggunakan jaringan syaraf tiruan telah dilakukan beberapa peneliti. Keutamaan penggunaan deteksi dengan jaringan syaraf tiruan adalah mempunyai kemampuan belajar. Hal ini pernah dilakukan dalam hal deteksi kesalahan secara otomatis dengan mempelajari sinyal-sinyal kesalahan dengan harapan jika ada kesalahan serupa bisa langsung terdeteksi [4]. Jaringan syaraf tiruan juga digunakan untuk diagnosis kesalahan sistem robot [5]. Kemampuan jaringan syaraf tiruan juga dimanfaatkan untuk deteksi kesalahan pada multi sensor dengan melakukan pembelajaran dari masing-masing kesalahan sensor [6]. Jaringan syaraf tiruan memiliki kelebihan untuk belajar suatu sinyal kesalahan yang baru. Akan tetapi jaringan syaraf tiruan memiliki kelemahan yaitu membutuhkan waktu belajar untuk menjadikan pustaka sinyal-sinyal kesalahan. Dalam deteksi kesalahan dan penentuan lokasi kesalahan dibutuhkan waktu yang cepat sehingga jaringan syaraf tiruan tidak bisa mendeteksi atau menentukan lokasi kesalahan di luar pustaka yang dimiliki dalam waktu yang singkat.

Selain jaringan syaraf tiruan, akhir-akhir ini banyak diimplementasikan deteksi kesalahan berbasis pada logika

fuzzy. Hal ini didasari pada pemikiran bahwa dalam implementasi *fuzzy* tidak diperlukan detail persamaan matematis. Persamaan matematis tersebut terkadang bersifat sangat kompleks, padahal untuk mendapatkan model matematis membutuhkan pemikiran yang mendalam dan waktu yang lama. Beberapa peneliti menggunakan kelebihan ini untuk penelitian dalam area deteksi kesalahan. Hal ini tampak pada penelitian yang menggunakan logika *fuzzy* untuk evaluasi residual yang berasal dari kesalahan pada sistem robot [7]. Ketertarikan ini berlanjut seperti tampak pada pemakaian *fuzzy* berbasis pada model sistem Takagi-Sugeno [8]. Kelemahan *fuzzy* dalam deteksi dan penentuan lokasi kesalahan adalah aturan-aturannya bersifat *ad hoc* atau khusus untuk suatu sistem dengan kondisi tertentu. Maksud dari *ad hoc* di sini dapat dicontohkan bahwa aturan mengemudi becak tidak dapat diterapkan pada aturan mengemudi truk gandeng. Begitu juga sebaliknya aturan mengemudi truk gandeng tidak dapat diterapkan pada aturan mengemudi becak.

Untuk mengatasi kelemahan implementasi logika *fuzzy* pada deteksi kesalahan dan penentuan lokasi kesalahan diperlukan model matematis sistem sehingga jangkauan penyelesaian masalah menjadi lebih luas. Selain itu, untuk mengatasi kelemahan jaringan syaraf tiruan dalam hal mendeteksi atau menentukan lokasi kesalahan yang tidak terdapat pada pustaka sebelumnya, digunakan konsep vektor dengan arah tertentu seperti yang telah diimplementasikan dengan menggunakan kombinasi tapis khusus dan matriks transformasi untuk penentuan lokasi kesalahan multi sensor pada *web winding system* [9]. Pada paper ini, metode tadi akan dimodifikasi untuk keperluan penentuan lokasi kesalahan aktuator dan yang lebih khusus lagi adalah dapat menghasilkan sinyal *residual* yang berasal dari aktuator *aileron* dan aktuator *rudder* yang saling *decoupled* pada pesawat terbang yang bergerak lateral. Keuntungan menggunakan konsep vektor tersebut adalah dapat menangani sinyal-sinyal kesalahan baru yang tidak terdapat sebelumnya karena yang diperlukan hanya arah vektor ciri, sementara magnitude vektor yang diakibatkan oleh perubahan-perubahan sinyal-sinyal kesalahan yang variatif tidak akan mengubah arah vektor ciri, sehingga jangkauan penyelesaian masalah menjadi sangat luas. Dengan kata lain arah vektor ciri hanya berkorespondensi dengan lokasi kesalahan. Oleh karena itu, *residual-residual* sinyal kesalahan dapat dibuat *decoupled* dengan menata arah vektor ciri.

Pada metode yang menggunakan kombinasi tapis khusus dan transformasi matriks, tapis khusus berfungsi untuk menghasilkan dinamika sinyal *error* tapis. Sinyal *error* tapis ini mengandung sinyal kesalahan yang lengkap termasuk sinyal kesalahan aktuator, sinyal *state* sistem, dan sinyal *input* sistem. Adapun fungsi matriks transformasi adalah mengubah ciri lokasi aktuator yang mengalami kesalahan menjadi vektor ciri atau *signature vector* yang dirancang mempunyai arah tetap. Vektor ini akan diproses lebih lanjut oleh tapis khusus untuk menghasilkan sinyal *residual* kesalahan aktuator yang saling *decoupled*. Lain daripada itu, matriks transformasi juga berfungsi untuk menghilangkan sinyal *state* sistem dan sinyal

input sistem pada sinyal *error* tapis. Konsep ini akan diterapkan pada deteksi kesalahan dan penentuan lokasi kesalahan aktuator yang saling *decoupled* pada pesawat terbang yang bergerak lateral.

II. MODEL MATEMATIS

A. Model Matematis Plant dengan Kesalahan Aktuator

Model matematis sistem *plant* dengan kesalahan aktuator dinyatakan dalam persamaan keadaan (1).

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) - \mathbf{f}_{ai}\mu(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t)\end{aligned}\quad (1)$$

$\mathbf{x}(t) \in \mathcal{R}^n$ adalah *state vector*

$\mathbf{y}(t) \in \mathcal{R}^m$ adalah *output vector*

$\mathbf{u}(t) \in \mathcal{R}^h$ adalah *input vector*

Adapun \mathbf{f}_{ai} adalah vektor lokasi aktuator yang mengalami kesalahan. Lebih lanjut \mathbf{f}_{ai} sama dengan \mathbf{b}_i yaitu vektor kolom ke- i dari matriks \mathbf{B} . Sinyal kesalahan diberi simbol $\mu(t)$.

B. Analisis untuk Menghasilkan Decoupled Residual untuk Isolasi Kesalahan Aktuator

Uraian berikut ini adalah hasil modifikasi metode yang telah dikemukakan pada [9] untuk menangani kasus kesalahan aktuator. Agar dihasilkan vektor *residual*, maka diperlukan tapis khusus dan matriks transformasi \mathbf{T} . Tapis digunakan untuk membangkitkan sinyal *error* tapis yang salah satu anggotanya adalah sinyal kesalahan aktuator. Adapun matriks transformasi digunakan untuk mengubah ciri lokasi aktuator yang mengalami kesalahan menjadi vektor ciri yang mempunyai arah tetap. Sinyal *error* didefinisikan sebagai $\mathbf{e}(t) = \mathbf{s}(t) - \mathbf{T}\mathbf{x}(t)$ dengan \mathbf{T} seperti yang telah disebutkan sebelumnya adalah matriks transformasi, dan $\mathbf{s}(t)$ adalah *state* tapis. Adapun model dinamis tapis dapat dinyatakan oleh (2).

$$\dot{\mathbf{s}}(t) = \mathbf{E}\mathbf{s}(t) + \mathbf{F}\mathbf{y}(t) + \mathbf{G}\mathbf{u}(t) \quad (2)$$

Di sini terlihat \mathbf{s} adalah vektor ukuran $k_h \times 1$ yang merupakan fungsi variabel keadaan atau *state variable* melalui suatu matriks \mathbf{T} yang fleksibel sehingga mempunyai ekspresi $\mathbf{s}(t) = \mathbf{T}\mathbf{x}(t)$. Adapun \mathbf{E} adalah matriks proses tapis, \mathbf{F} adalah matriks konektivitas yang menghubungkan *output plant* dengan tapis, dan \mathbf{G} adalah matriks konektivitas yang menghubungkan *input plant* dengan tapis. Salah satu fungsi tapis khusus adalah menghasilkan dinamika *error* estimasi ($\mathbf{s}(t) - \mathbf{T}\mathbf{x}(t)$). Oleh karena itu, tapis khusus dirancang sehingga dalam kondisi *steady state* maka ($\mathbf{s}(t) = \mathbf{T}\mathbf{x}(t)$) adalah nol bila tidak ada kerusakan alat. Lain daripada itu tapis khusus dirancang untuk menghasilkan *residual-residual* yang saling *decoupled*.

Agar sinyal *error* dapat diinvestigasi dengan cermat maka model dinamis sinyal *error* tapis perlu dikembangkan dan dapat dilihat pada (3).

Setelah dilakukan pengelompokan sinyal yang menyumbang pada sinyal *error* tapis maka bentuk (3) menjadi (4). Jika terdapat dua aktuator yang mengalami kesalahan maka (4) berubah menjadi (5).

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}(t) &= \dot{\mathbf{s}}(t) - \mathbf{T}\dot{\mathbf{x}}(t) \\ &= \mathbf{E}\mathbf{s}(t) + \mathbf{F}\mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}\mathbf{u}(t) - \\ &\quad \mathbf{T}\mathbf{A}\mathbf{x}(t) - \mathbf{T}\mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{T}\mathbf{f}_{ai}\mu(t) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}(t) &= \mathbf{E}\mathbf{e}(t) + (\mathbf{E}\mathbf{T} + \mathbf{F}\mathbf{C} - \mathbf{T}\mathbf{A})\mathbf{x}(t) + (\mathbf{G} - \mathbf{T}\mathbf{B})\mathbf{u}(t) \\ &\quad + \mathbf{T}\mathbf{f}_{ai}\mu(t) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}(t) &= \mathbf{E}\mathbf{e}(t) + (\mathbf{E}\mathbf{T} + \mathbf{F}\mathbf{C} - \mathbf{T}\mathbf{A})\mathbf{x}(t) + (\mathbf{G} - \mathbf{T}\mathbf{B})\mathbf{u}(t) \\ &\quad + \mathbf{T}\mathbf{f}_{ai}\mu_i(t) + \mathbf{T}\mathbf{f}_{ak}\mu_k(t) \end{aligned} \quad (5)$$

Dari (5) dapat dilihat bahwa tanggapan tapis tergantung pada *input plant* $\mathbf{u}(t)$, *state* dari *plant* $\mathbf{x}(t)$, sinyal kesalahan $\mu_i(t)$ dan sinyal kesalahan $\mu_k(t)$. Oleh karena itu, agar tanggapan tapis hanya tergantung pada sinyal kesalahan aktuator saja maka (6) dan (7) harus dipenuhi.

$$\mathbf{E}\mathbf{T} + \mathbf{F}\mathbf{C} - \mathbf{T}\mathbf{A} = \mathbf{0} \quad (6)$$

$$\mathbf{G} - \mathbf{T}\mathbf{B} = \mathbf{0} \quad (7)$$

Jika (6) dan (7) dipenuhi maka (5) menjadi (8), yang terlihat sebagai

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = \mathbf{E}\mathbf{e}(t) + \mathbf{T}\mathbf{f}_{ai}\mu_i(t) + \mathbf{T}\mathbf{f}_{ak}\mu_k(t) \quad (8)$$

Selanjutnya matriks \mathbf{E} dibuat berbentuk diagonal sehingga perlu dipenuhi (9) yang terlihat sebagai

$$\begin{bmatrix} \mathbf{T}\mathbf{f}_{ai} & \mathbf{T}\mathbf{f}_{ak} \end{bmatrix} = \mathbf{I}_2 \quad (9)$$

\mathbf{I}_2 adalah matriks identitas yang mempunyai dua komponen diagonal. Masing-masing kolom matriks identitas adalah yang disebut dengan vektor ciri.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Metode Pencarian Matriks T

Ditinjau dari (6), matriks \mathbf{A} mempunyai n baris dan n kolom sedang matriks \mathbf{C} mempunyai m baris dan n kolom. Bentuk matriks $\mathbf{C} = [\mathbf{C}_1 \ \mathbf{0}]$ dengan $\mathbf{C}_1 = \mathbf{I}_m$ sebagai hasil pengukuran m buah keadaan. Diasumsikan *rank* matriks \mathbf{C} adalah m . Adapun bentuk matriks $\mathbf{A} = [\mathbf{A}1 \ \mathbf{A}2]$ dengan $\mathbf{A}1$ berukuran $n \times m$ sedang $\mathbf{A}2$ berukuran $n \times (n-m)$. Karena matriks \mathbf{E} berbentuk diagonal maka (6) dapat dipecah menjadi dua bagian yaitu (10) dan (11) [10].

Persamaan (11) dianalisis lebih lanjut sebelum diurai detail penyelesaiannya. Matriks $[\mathbf{T}\mathbf{A} - \mathbf{E}\mathbf{T}]$ mempunyai ukuran $k_h \times n$ dan bila matriks \mathbf{E} dalam bentuk diagonal, maka untuk tiap *eigenvalue* matriks \mathbf{E} akan menghasilkan (12).

$$[\mathbf{T}\mathbf{A} - \mathbf{E}\mathbf{T}] \begin{bmatrix} \mathbf{I}_m \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbf{F}\mathbf{C}_1 \quad (10)$$

$$[\mathbf{T}\mathbf{A} - \mathbf{E}\mathbf{T}] \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I}_{n-m} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (11)$$

$$\mathbf{t}_i^T [\mathbf{A}2 - \lambda_i \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I}_{n-m} \end{bmatrix}] = \mathbf{0} \quad (12)$$

Dan untuk memudahkan notasi, (13) ditulis

$$\mathbf{t}_i^T [\mathbf{L}_i] = \mathbf{0}. \quad (13)$$

Jadi \mathbf{t}_i^T terletak dalam *left nullspace* matriks \mathbf{L}_i . Oleh karena itu perlu dicari basis *left nullspace* matriks \mathbf{L}_i yang cacahnya m buah untuk *eigenvalue* ke- i . Untuk mencari m buah basis *left nullspace* matriks \mathbf{L}_i digunakan (14).

$$\mathbf{h}_y^T [\mathbf{A}2 - \lambda_i \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I}_{n-m} \end{bmatrix}] = \mathbf{0} \quad \text{untuk } j = 1, \dots, m \quad (14)$$

\mathbf{h}_y^T adalah basis ke- j *left nullspace* matriks \mathbf{L}_i yang berkorespondensi dengan *eigenvalue* ke- i . Karena bentuk matriks \mathbf{L}_i tidak bujur sangkar akan tetapi persegi panjang, maka diperlukan dua buah matriks transformasi *orthonormal* yang dapat memunculkan *left nullspace*, *column space*, *row space*, dan *nullspace*. Hal ini dapat dicapai melalui konsep SVD (*Singular Value Decomposition*) [11].

Untuk cacah aktuator sebanyak k_h , maka nilai koefisien \mathbf{c} dihitung dengan (15).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{c}_{i1} & \mathbf{c}_{i2} & \dots & \mathbf{c}_{ir} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{i1}^T \\ \mathbf{h}_{i2}^T \\ \vdots \\ \mathbf{h}_{ir}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{a_1} & \mathbf{f}_{a_2} & \dots & \mathbf{f}_{a_{k_h}} \end{bmatrix} = \mathbf{I}_i \quad (15)$$

Notasi \mathbf{I}_i menunjukkan elemen baris ke- i dari matriks identitas. Kemudian dicari nilai \mathbf{t}_i^T untuk $i = 1, \dots, k_h$, dengan k_h adalah cacah *eigenvalue* yang ada pada matriks \mathbf{E} dengan menggunakan (16).

$$\mathbf{t}_i^T = \mathbf{c}_{i1}\mathbf{h}_{i1}^T + \mathbf{c}_{i2}\mathbf{h}_{i2}^T + \dots + \mathbf{c}_{ir}\mathbf{h}_{ir}^T \quad (16)$$

Tampak bahwa dalam menghitung \mathbf{t}_i^T untuk i yang berbeda dapat dilakukan terpisah untuk tiap *eigenvalue* matriks \mathbf{E} sehingga komputasi lebih mudah.

B. Model Matematis Pesawat Terbang Bergerak Lateral

Penjabaran lengkap model matematis pesawat terbang yang bergerak lateral telah dapat dilaksanakan [12]. Objek penelitian yang digunakan adalah pesawat terbang CHARLIE yaitu pesawat terbang jet berbadan sangat besar bermesin empat (*A very large, four-engined, passenger jet aircraft*) yang beroperasi pada ketinggian 6100 m dan *Mach number* adalah 0,8 dengan gerak lurus yang diberikan oleh (17).

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), \quad \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (17)$$

dengan

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -0,12 & 0 & -1 & 0,04 \\ -4,12 & -0,98 & 0,29 & 0 \\ 1,62 & -0,016 & -0,232 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0,014 \\ 0,31 & 0,18 \\ 0,013 & -0,92 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

C. Simulasi Pembangkitan Decoupled Residual yang Berasal Dari Dua Aktuator yang Mengalami Kesalahan pada Pesawat Terbang yang Bergerak Lateral

Berbasis matriks \mathbf{A} pada persamaan keadaan pesawat terbang maka tampak bahwa harga n adalah empat. Lebih lanjut dari matriks *output* \mathbf{C} dapat disimpulkan bahwa harga m adalah dua. Adapun cacah aktuator pada pesawat terbang dapat dilihat dari cacah kolom pada matriks \mathbf{B} yaitu dua. Aktuator pertama adalah *aileron* sedang aktuator kedua adalah *rudder*. Karena cacah sinyal kesalahan dari aktuator yang akan dibuat *decoupled* adalah dua maka *order* tapis khusus adalah dua dengan harga *eigenvalue* tapis khusus adalah masing-masing $\lambda_1 = -10$ dan $\lambda_2 = -12$.

Berdasarkan (14), (15), dan (16) dengan harga $k_h = 2$, karena cacah *eigenvalue* tapis khusus adalah dua, maka didapat matriks \mathbf{T} ,

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 8,2587 & 3,1943 & 0,7507 & -0,033 \\ -15,4081 & 0,055 & -1,3107 & 0,0514 \end{bmatrix}.$$

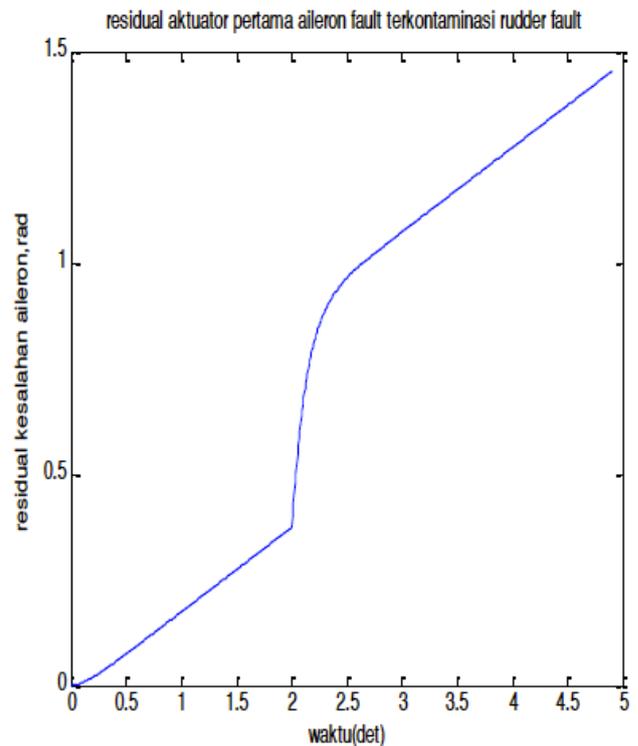
Berdasarkan (10) maka didapat harga matriks \mathbf{F} .

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 69,6518 & 28,7678 \\ -185,3975 & 0,678 \end{bmatrix}.$$

Berdasarkan (7) maka didapat harga matriks \mathbf{G}

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Hasil simulasi *residual* yang berasal dari aktuator *aileron* yang mengalami kesalahan tapi terkontaminasi oleh sinyal *rudder fault* tampak pada Gbr. 1. Pada keadaan ini tapis khusus tidak dirancang untuk proses *decoupling* antara dua sinyal *fault* yang berasal dari masing-masing aktuator yang mengalami kesalahan.

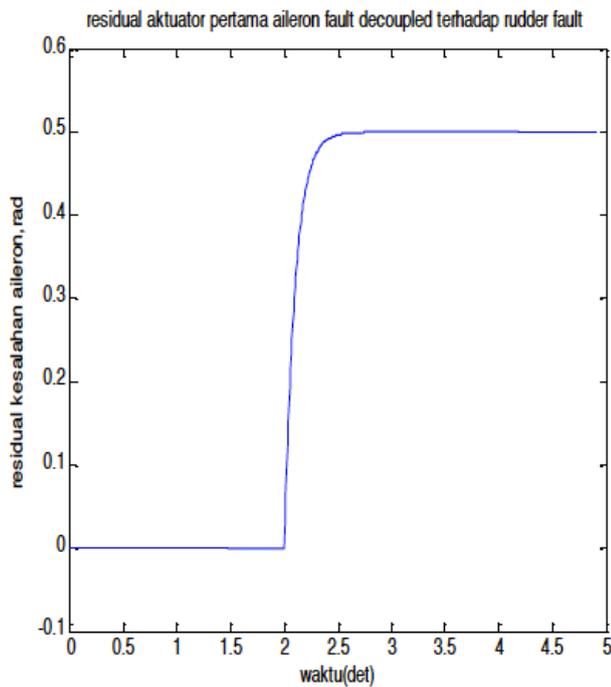


Gbr. 1 *Residual* aktuator *aileron* yang tidak *decoupled* terhadap *residual* aktuator *rudder*.

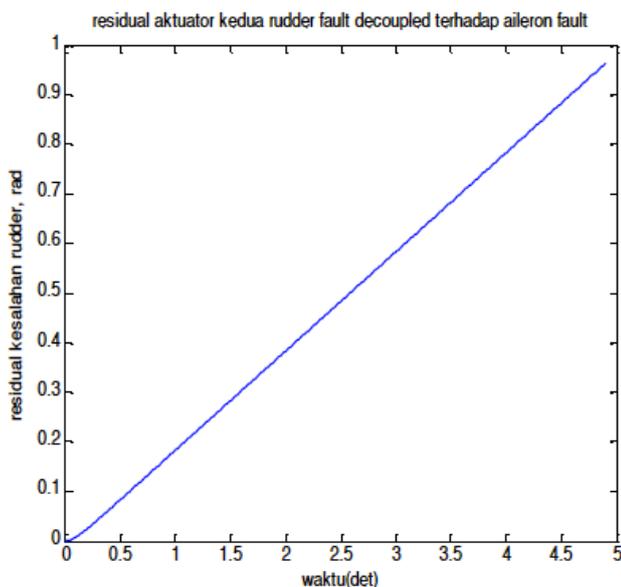
Pada Gbr. 1 tampak sinyal *drift fault* yang berasal dari aktuator *rudder* melonjak akibat sinyal *fault* yang berbentuk *bias* yang berasal dari aktuator *aileron*. Dari Gbr. 1 terlihat bahwa *residual* aktuator *aileron* yang berbentuk sinyal kesalahan *bias* mengkontaminasi sinyal *drift fault* yang berasal dari aktuator *rudder* pada detik kedua. Adapun sinyal *drift fault* yang berasal dari aktuator *rudder* mulai mengalami kesalahan pada detik ke-nol.

Ketika tapis khusus dirancang untuk menghasilkan *residual-residual* yang saling *decoupled*, hasil *residual* yang berasal dari masing-masing aktuator yang mengalami kesalahan tampak pada Gbr. 2 dan Gbr. 3. Lebih jelasnya, pada Gbr. 2 terlihat *residual* yang berasal dari kesalahan

aktuator *aileron*, sedangkan Gbr. 3 merupakan *residual* yang berasal dari kesalahan aktuator *rudder*.



Gbr. 2 *Residual* aktuator *aileron* yang berbentuk sinyal *bias*.



Gbr. 3 *Residual* aktuator *rudder* yang berbentuk sinyal *drift*.

Pada Gbr. 2, tampak bahwa *residual* aktuator *aileron* yang berbentuk sinyal *bias* yang kesalahannya mulai pada detik kedua telah dapat dibuat *decoupled* terhadap *residual* yang

berbentuk sinyal *drift* yang berasal dari aktuator *rudder*. Hal itu berarti sinyal kesalahan berbentuk *drift* yang berasal dari aktuator *rudder* tidak muncul pada Gbr. 2.

Pada Gbr. 3, tampak bahwa *residual* aktuator *rudder* yang berbentuk sinyal *drift* telah dapat dibuat *decoupled* terhadap *residual* yang berbentuk sinyal *bias* yang berasal dari aktuator *aileron*.

IV. KESIMPULAN

Telah berhasil dibuat tapis khusus dan matriks transformasi **T** yang dapat membuat *residual aileron* dan *residual rudder* saling *decoupled*. Hasil simulasi masing-masing *residual* yang saling *decoupled* tampak pada Gbr. 2 dan Gbr. 3. Adapun matriks **F** dan matriks **G** juga sudah dapat dihitung. Penelitian yang dapat dilakukan selanjutnya akan menggabungkan isolasi kesalahan pada aktuator dan teori kendali untuk mendapatkan *reconfiguration control system*.

REFERENSI

- [1] Barlow, R.E & Proschan, F., *Statistical Theory of Reliability and Life Testing* : Holt ,Reinhart and Winston, 1981.
- [2] Ambani,S.,Li,L.&Ni,J.,”Condition-Based Maintenance Decision-Making for Multiple Machines Systems”,*Journal of Manufacturing Science and Engineering*,vol 131,June 2009.
- [3] Donca,G., Mihaila, I. & Nica, M.,”Aspects of Model-Based Diagnostics in Condition Based Maintenance”,*Fasicle of Management and Technological Eng*,vol VII, 2008.
- [4] Trunov, A. B. and Polycarpou, M.M., “Automated Fault Diagnosis in Nonlinear Multivariable Systems Using a Learning Methodology”, *IEEE Trans. On Neural Networks*, vol.11, no. 1, pp. 91-101, 2000.
- [5] Vemuri, A.T., Polycarpou, M.M., “Neural-Network-Based Robust Fault Diagnosis in Robotic Systems”, *IEEE Trans. on Neural Networks*, vol.8, no.6, pp. 1410-1420, 1997.
- [6] Reppa, V., Polycarpou, M.M., Panayiotou, C.G., “Adaptive Approximation for Multiple Sensor Fault Detection and Isolation of Nonlinear Uncertain Systems”, *IEEE Trans. on Neural Networks and Learning Systems*, vol.20, no. 1, pp. 137-153, 2014.
- [7] Schneider, H., Frank, P.M., “Observer-Based Supervision and Fault Detection in Robots Using Nonlinear and Fuzzy Logic Residual Evaluation”, *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 19, no. 5, pp. 1260-1268, 1996.
- [8] Thumati, B.T., Feinstein, M.A., Jagannathan, S., “A Model-Based Fault Detection and Prognostics Scheme for Takagi-Sugeno Fuzzy Systems”, *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 736-748, 2014.
- [9] Herdjunanto,S., Susanto,A. & Wahyunggoro, O., “Robust Residual Generation for Sensor Fault Isolation in Systems with Structured Uncertainty. A Case Study: MIMO Web Winding System”, *International Conference on Information Technology and Electrical Engineering* , 2014.
- [10] Tsui, C.C., “A Complete Analytical Solution to the Equation $TA-FT=LC$ and Its Applications”, *IEEE Trans on Automatic Control*,vol.AC-32,no.8,pp 742-744, 1987.
- [11] Klema, V.C. and Laub, A.J., “The Singular Value Decomposition:Its Computation and Some Applications”, *IEEE Trans on Automatic Control*, vol.AC-25,no.2,pp 164-176, 1980.
- [12] McLean D., *Automatic Flight Control Systems*, Prentice Hall, 1990.