

INVESTIGASI PERANAN *DETECTION FILTER* PADA PEMELIHARAAN BERBASIS KONDISI SISTEM

Studi kasus : Motor DC

Herdjunanto, S. dan Rahayu, E.S.

Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Jalan Grafika nomer 2, Yogyakarta, Indonesia

samiadji@jteti.gadjahmada.edu

Abstract— Implementation of time scheduled preventive maintenance faces a problem if it is applied for systems with many varieties of heavy workloads 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 of important component, among others, of systems are actuators. Actuator fault should be detected immediately since actuators supply energy to the systems. The problem is that this fault signal is contaminated by disturbance. Therefore a detection filter is proposed to be used to solve the problem by considering the disturbance as pseudo actuator fault. Then actuator fault and disturbance can be separately by a detection filter using mutually detectable concept which is the unique characteristic of a detection filter. The proposed method has been tested on a DC motor. The result is that the fault residual caused by the actuator fault can be separately from the disturbance.

Keywords: *disturbance, actuator, detection filter, mutually detectable, residual*

Intisari- Pemeliharaan suatu sistem dengan melakukan inspeksi kondisi sistem secara periodis dalam interval waktu tertentu mempunyai kelemahan ketika sistem yang ditinjau mempunyai beban kerja yang sering tinggi dari waktu ke waktu. Beban kerja yang tinggi dapat mengakibatkan komponen sistem akan mengalami degradasi lebih cepat dibanding bila sistem berbeban normal. Akibatnya inspeksi dengan interval waktu tertentu menjadi terlambat dalam mendeteksi abnormalitas suatu komponen sistem dan bisa menimbulkan biaya besar karena kerusakan alat. Oleh karena itu pemeliharaan sistem dengan berbasis pada kondisi sistem atau condition-based maintenance (CBM) akan lebih tepat.

Salah satu komponen penting dalam sistem adalah aktuator karena berfungsi mensuplai energy ke sistem. Oleh karena itu kesalahan aktuator harus segera dideteksi. Problemnnya adalah sinyal kesalahan aktuator terkontaminasi oleh *disturbance*. Diusulkan penyelesaiannya memakai *detection filter* yang dapat menghasilkan *detection space* yang tidak saling berinteraksi bila syarat *mutually detectable* dapat dipenuhi. Dalam hal ini *disturbance* dimodelkan sebagai *pseudo actuator fault*. Untuk melihat keefektifan usulan penyelesaian ini maka metode ini telah diujicobakan pada motor dc. Hasilnya adalah *fault residual* yang berasal dari aktuator motor dc dapat dipisahkan dari sinyal *disturbance*.

Kata kunci: *disturbance, aktuator, detection filter, mutually detectable, residual*

I. PENGANTAR

Tujuan pemeliharaan (*maintenance*) adalah untuk mencegah terjadinya kerusakan fatal yang tidak diinginkan akibat abnormalitas komponen. Oleh karena itu lazim dilakukan inspeksi secara periodis untuk memonitor tentang keadaan sistem. Metode ini sering disebut *preventive maintenance* yang berbasis *time schedule*. Bila beban kerja sistem tinggi dan sangat variatif ditambah pengaruh lingkungan yang kotor dengan temperature yang berubah-ubah maka komponen akan lebih mudah aus sehingga bila dipakai metode inspeksi periodis bisa terjadi keterlambatan dalam melakukan evaluasi tentang keadaan sistem. Akibatnya sistem sudah terlanjur mengalami kerusakan tanpa terdeteksi sehingga memerlukan biaya tambahan yang tinggi untuk perbaikan atau penggantian komponen. Untuk itu perlu metode baru untuk pemeliharaan yaitu berbasis kondisi sistem yang disebut *condition-based maintenance* (CBM). Salah satu studi kasus yang penting adalah pendeteksian kerusakan aktuator karena pasokan energy pada system dilakukan oleh aktuator sehingga kerusakannya membuat system terdegradasi unjuk kerjanya. Pada awalnya pendeteksian kerusakan komponen dalam sistem dilakukan dengan *hardware redundancy*. Sayang cara ini mahal dan memerlukan material yang banyak untuk implementasinya sehingga tidak cocok dengan konsep *green system*. Oleh karena itu konsep *analytical redundancy* secara berangsur-angsur menggantikan konsep *hardware redundancy*. Hal ini tampak dari munculnya beberapa metode untuk deteksi kesalahan antara lain berbasis *sliding mode* dengan asumsi batas atas *uncertainty* diketahui [1]. Problem yang dihadapi adalah sinyal kesalahan aktuator terkontaminasi oleh *disturbance*. Oleh karena itu metode berbasis *sliding mode* mempunyai keterbatasan karena *disturbance* adalah bentuk sinyal *uncertainty* yang tidak diketahui batas atasnya. Ada metode lain dengan konsep *analytical redundancy* dengan berbasis *detection filter* [2]-[3]. Walaupun pembahasan *detection filter* tidak menyangkut pada *disturbance* tetapi ada sifat khas *detection filter* yaitu dapat menghasilkan *detection space* yang tidak saling berinteraksi bila syarat *mutually detectable* terpenuhi. Oleh karena itu pada penelitian ini diusulkan dipakai *detection filter* untuk memisahkan *actuator fault residual* dari *disturbance* yang dalam hal ini dimodelkan sebagai *pseudo actuator fault* untuk diimplementasikan pada motor dc. Pertanyaannya adalah apakah syarat *mutually detectable* dapat dipenuhi pada kasus motor dc.

Dipakainya motor dc sebagai obyek penelitian karena motor dc masih banyak dipakai sampai saat ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Pada awalnya pemeliharaan sistem banyak menggunakan data statistis [4]. Karena perkembangan teknologi yang pesat maka sistem cenderung dioperasikan pada daerah maksimumnya dalam waktu yang lama sehingga beban kerja sistem menjadi tinggi. Kondisi lingkungan yang kotor dan fluktuatif memperberat kerja sistem sehingga komponen lebih mudah terdegradasi unjuk kerjanya. Oleh karena itu akhir-akhir ini pemeliharaan sistem bergeser menjadi pemeliharaan sistem berbasis model matematis sistem [5]. Dengan basis model matematis sistem telah dikembangkan deteksi kesalahan sensor berbasis observer seperti tampak pada [6] dan [7]. *Observer* pertama kali dikemukakan oleh Luenberger [8]. Dalam perkembangannya *gain observer* Luenberger dirancang khusus sehingga menghasilkan *detection space* yang tidak saling berinteraksi bila syarat *mutually detectable* dipenuhi. *Observer* yang mempunyai sifat khusus tersebut lalu dinamakan *detection filter* [2], [3], dan [9]. Ternyata syarat *mutually detectable* tersebut tidak selalu dapat direalisasikan akan tetapi masih tergantung pada *plant* yang ditinjau. Untuk itu perlu diteliti apakah *detection space* bisa terbentuk pada *plant* motor dc. Untuk lebih spesifik *detection space* yang akan diteliti pada motor dc adalah berasal dari kesalahan aktuator dan *disturbance*.

III. LANDASAN TEORI

A. Model motor DC

Model motor DC dinyatakan dalam bentuk ruang keadaan (*state space*) oleh Persamaan (1).

$$\dot{\underline{x}}(t) = A \underline{x}(t) + B u(t); y(t) = C \underline{x}(t) \quad (1)$$

dengan $\underline{x}(t) = [x_1(t) \quad x_2(t)]^T = [\omega(t) \quad i(t)]^T$ yaitu *state* pertama $x_1(t)$ adalah kecepatan sudut $\omega(t)$ dan *state* kedua $x_2(t)$ adalah arus armature $i(t)$. Adapun $u(t)$ adalah tegangan *armature* $e_a(t)$.

$$A = \begin{bmatrix} -B/J & K_i/J \\ K_b/L & -R/L \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/L \end{bmatrix}$$

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

B = viscous-friction coefficient of motor and load

J = moment of inertia of motor and load ,Nm/rad/sec²

K_i = motor torque constant , Nm/A

K_b = motor back emf constant , V/rad/sec

L = armature inductance , h

R = armature resistance , Ω

Bila ditinjau ada *actuator fault* dengan *directional vector* f_i disertai *mode* $\mu(t)$ dan *external disturbance*

dengan *directional vector* d_i disertai *mode* $w(t)$ maka persamaan keadaan system diberikan oleh Persamaan (2).

$$\dot{\underline{x}}(t) = A\underline{x}(t) + B u(t) + f_i \mu_i(t) + d_i w(t) \quad (2)$$

Detection Filter dapat dimodelkan oleh Persamaan (3).

$$\dot{\hat{\underline{x}}}(t) = A\hat{\underline{x}}(t) + B u(t) + K(y(t) - C\hat{\underline{x}}(t)) \quad (3)$$

dengan $\hat{\underline{x}}(t)$ adalah estimasi keadaan dan K adalah *gain detection filter*. K dirancang sehingga *filter* stabil sedangkan pengambilan keputusan dilakukan pada keluaran kesalahan keadaan atau *residual* yaitu $y_e(t) = y(t) - C\hat{\underline{x}}(t)$. Vektor $y_e(t)$ ini arahnya berkorespondensi dengan informasi lokasi komponen yang mengalami degradasi. *Detection space* berhubungan dengan sinyal kesalahan $e(t)$. Oleh karena itu perlu diungkapkan rumus dinamika kesalahan yang diberikan oleh Persamaan (4).

$$\dot{e}(t) = (A - KC)e(t) + f_i \mu_i(t) + d_i w(t) \quad (4)$$

Adapun *residual* diberikan oleh Persamaan (5).

$$y_e(t) = C e(t) \quad (5)$$

Dari persamaan (4) tampak bahwa K perlu dirancang sehingga dihasilkan:

1. Cf_i dan Cv_j^i adalah *collinear*. v_j^i adalah *eigenvector* ke j matriks $(A-KC)$. *Eigenvector* ini berada dalam *detection space* untuk f_i .
2. $(\lambda_j I - (A-KC))v_j = 0$ dengan λ_j adalah *eigenvalue* ke j matriks $(A-KC)$.

Untuk itu perlu dicari dimensi *detection space* untuk f_i dan dimensi *detection space* untuk d_i

a. Step untuk mencari dimensi *detection space* :

1. Definisikan :

$$O_i \triangleq [(C_i)^T (C_i K_i)^T \dots \dots \dots (C_i K_i^{n-1})^T]^T$$

dengan :

$$C_i = P(Cf_i)C$$

$$P(Cf_i) = I - (Cf_i)(Cf_i)^+$$

$$(Cf_i)^+ = [(Cf_i)^T (Cf_i)]^{-1} (Cf_i)^T$$

$$K_i = A[I - f_i(Cf_i)^+ C]$$

2. Hitung rank matriks $O_{f_i} = q_1$ lalu hitung $w_1 = n - q_1$ yang merupakan dimensi *detection space* untuk f_i .
3. Hitung rank matriks $O_{d_i} = q_2$ lalu hitung $w_2 = n - q_2$ yang merupakan dimensi ruang deteksi untuk d_i .

Maksimum kerusakan komponen yang dimungkinkan adalah sama dengan cacah *sensor* yang diberi notasi m maka bila diinginkan *detection space* tak gayut satu dengan lainnya maka harus dipenuhi persyaratan yang disebut *mutually detectable* yang dinyatakan oleh Persamaan (6).

$$\sum_{i=1}^{i=m} w_i = n \tag{6}$$

b. Mencari perolehan *detection filter* K

Definisikan $\omega_i = Cf_i = Cv_j^i$. Hitung K dari Persamaan (7).

$$\begin{bmatrix} \lambda_j^i - A & K \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_j^i \\ \omega_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_i \end{bmatrix} \tag{7}$$

dengan i adalah menunjuk pada *detection space* ke i dan index j menunjukkan *eigenvalue* ke j atau *eigenvector* ke j yang berada pada *detection space* ke i .

IV. PERHITUNGAN DAN HASIL SIMULASI

Ditinjau model matematis motor dc tereksitasi secara terpisah yang terkontaminasi oleh *disturbance* [10].

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + d_i w(t) \quad y(t) = C x(t)$$

atau

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{\omega}(t) \\ \dot{i}_a(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & \frac{K_i}{J} \\ -\frac{K_b}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} -\frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} w(t)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x(t)$$

dengan

i_a = armature current, A

$u = e_a$ = armature applied voltage, V

ω = motor velocity, rad/sec

B = viscous-friction coefficient of motor and load = 0

J = moment of inertia of motor and load = 0.02

Nm/rad/sec²

K_i = motor torque constant = 1 Nm/A

K_b = motor back emf constant = 1 V/rad/sec

w = disturbance (magnitude not known)

L = armature inductance = 0.005 h

R = armature resistance = 1 Ω

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & \frac{K_i}{J} \\ \frac{K_b}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 50 \\ 200 & -200 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 200 \end{bmatrix} \quad d_i = \begin{bmatrix} -\frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -50 \\ 0 \end{bmatrix}$$

a. Menghitung dimensi *detection space* pertama yang berhubungan dengan f_i .

$$f_i = -\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -200 \end{bmatrix}$$

Setelah dilakukan perhitungan didapat rank matriks O_{fi} adalah satu sehingga dimensi *detection space* pertama w_1 adalah satu (n -rank matriks O_{fi}) karena untuk motor DC harga n sama dengan dua.

b. Menghitung dimensi *detection space* kedua yang berhubungan dengan d_i .

$$d_i = \begin{bmatrix} -\frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -50 \\ 0 \end{bmatrix}$$

setelah dilakukan perhitungan didapat rank matriks O_{di} adalah satu sehingga dimensi *detection space* kedua w_2 adalah satu (n -rank matriks O_{di}) karena untuk motor DC harga n sama dengan dua.

Oleh karena itu untuk motor dc harga $w_1 + w_2 = n$ maka pemisahan *detection space* dapat dilakukan karena syarat *mutually detectable* dipenuhi.

Perhitungan untuk mencari *gain* matriks K

Bentuk matriks **K** adalah :

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{21} \\ k_{12} & k_{22} \end{bmatrix}$$

- a. Untuk *detection space* pertama dipakai *eigenvalue* $\lambda_1^1 = -10$

Persamaan yang harus diselesaikan

$$\begin{bmatrix} -10 & -50 & k_{11} & k_{21} \\ -200 & 190 & k_{12} & k_{22} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{11}^1 \\ v_{12}^1 \\ 0 \\ -200 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -200 \end{bmatrix}$$

Didapatkan *eigenvector* pada *detection space* pertama

$$\begin{bmatrix} v_{11}^1 & v_{12}^1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0 & -200 \end{bmatrix}^T$$

dengan harga $k_{21}=50$ dan $k_{22}= -190$.

- b. Untuk *detection space* kedua dipakai *eigenvalue* $\lambda_1^2 = -15$

Persamaan yang harus diselesaikan

$$\begin{bmatrix} -15 & -50 & k_{11} & k_{21} \\ -200 & 185 & k_{12} & k_{22} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{21}^2 \\ v_{22}^2 \\ -50 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -50 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Didapatkan *eigenvector* pada *detection space* kedua

$$\begin{bmatrix} v_{21}^2 & v_{22}^2 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -50 & 0 \end{bmatrix}^T$$

dengan harga $k_{11} = 15$ dan $k_{12} = 200$.

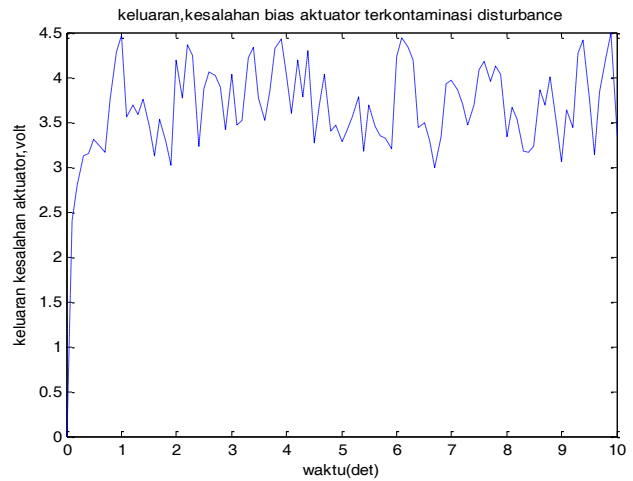
Harga **K** adalah:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 15 & 50 \\ 200 & -190 \end{bmatrix}$$

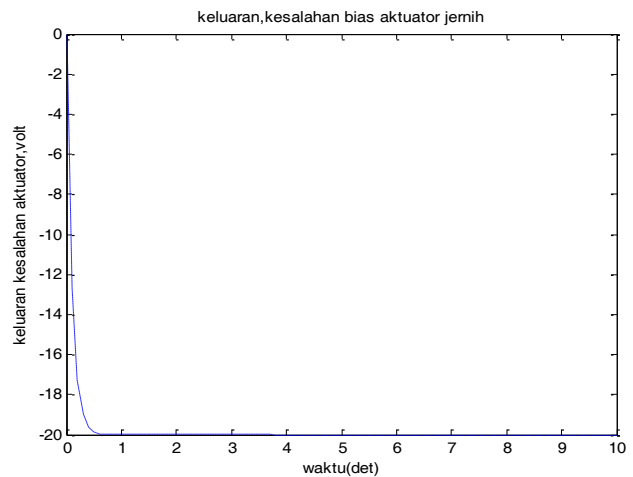
Gambar 1 merupakan hasil simulasi pertama yang menunjukkan keluaran *detection space* akibat sinyal kesalahan aktuator yang berupa sinyal *bias* yang terkontaminasi oleh *disturbance*. Pada keadaan ini tapis yang digunakan mempunyai *gain* K_1 . Pada saat ini *detection filter* tidak digunakan.

Harga K_1 adalah

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} 15 & 50 \\ 600 & 190 \end{bmatrix}$$



Gambar 1 Keluaran *detection space* kesalahan aktuator dengan arah $\begin{bmatrix} 0 & -200 \end{bmatrix}^T$ tanpa diproses *detection filter*



Gambar 2 Keluaran *detection space* kesalahan aktuator dengan arah $\begin{bmatrix} 0 & -200 \end{bmatrix}^T$ diproses dengan *detection filter*

Gambar 2 merupakan hasil simulasi kedua yang menunjukkan keluaran *detection space* akibat sinyal kesalahan aktuator yang berupa sinyal *bias* yang tidak terkontaminasi oleh *disturbance* sehingga gambar tampak bersih. Untuk mendapatkan keadaan ini dengan menggunakan *detection filter* dengan *gain* $k_{11} = 15$, $k_{12} = 200$, $k_{21} = 50$ dan $k_{22} = -190$.

V. KESIMPULAN

- 1) Syarat *mutually detectable* telah dapat dipenuhi oleh *detection space actuator fault* dan *detection space disturbance* yang diterapkan pada motor dc. Hal ini dapat dilihat dari *order detection space actuator* ($w_1 = 1$) ditambah *order detection space disturbance* ($w_2 = 1$) sama dengan *order* matriks **A** ($n=2$).
- 2) Sinyal kesalahan aktuator yang tertangkap pada keluaran *detection space* telah dapat dipisahkan dari *disturbance* dengan menggunakan *detection filter* dengan *gain detection filter* $k_{11} = 15$, $k_{12} = 200$, $k_{21} = 50$ dan $k_{22} = -190$ dan sinyal kesalahan dari aktuator yang keluar dari *detection space* seperti tampak pada Gambar 2.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Tan, C.P. and Edwards, C.,2010, Robust Fault Reconstruction in Uncertain Linear Systems Using Multiple Sliding Mode Observers in Cascade,IEEE Trans on Automatic Control,vol.AC-55.no.4,pp 855-867.
- [2] White, J.E., Speyer, J.L.,1987, *Detection Filter Design : Spectral Theory and Algorithms* , IEEE Trans on Automatic Control,vol.AC-32,no.7,pp 593-603.
- [3] Meskin, N. and Khorasani, K.,2009, *Actuator Fault Detection and Isolation for a Network of Unmanned Vehicles*, IEEE Trans on Automatic Control ,vol.AC-54,no.4,pp 835-840.
- [4] Barlow, R.E & Proschan, F.,1981,*Statistical Theory of Reliability and Life Testing* : Holt,Reinhart and Winston.
- [5] Donca,G., Mihaila, I. & Nica, M.,2008,*Aspects of Model-Based Diagnostics in Condition Based Maintenance*,Fasicle of Management and Technological Eng,vol VII.
- [6] Zhang, X.,2011, *Sensor Bias Fault Detection and Isolation in a class of Nonlinear Uncertain Systems Using Adaptive Estimation*,IEEE Trans on Automatic Control ,vol.AC-56,no.5,pp 1220-1226.
- [7] Reppa,V.,Polycarpou,M.M.,Panayiotou,C.G.,2014,*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.
- [8] Luenberger, D.G,1971, *An Introduction to Observers*,IEEE Trans of Automatic Control,vol AC16,no.6,December.
- [9] Massoumnia, M.A.,1986, *A Geometric Approach to the Synthesis of Failure Detection Filters*, IEEE Trans on Automatic Control,vol.AC-31,no.9,pp 839-846.
- [10] Kuo, B.C.,1982,*Automatic Control Systems*,4th edition,Prentice-Hall,Inc.