

# Estimasi Variabel Keadaan Gerak Longitudinal Pesawat Terbang Menggunakan Metode Fuzzy Kalman Filter

Resi Arumin Sani, Erna Apriliani, dan Mohammad Isa Irawan  
 Jurusan Matematika, Fakultas MIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
 Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia  
*e-mail*: april@matematika.its.ac.id, mii@its.ac.id

**Abstrak**—Pesawat terbang merupakan sarana transportasi udara yang memiliki enam derajat kebebasan gerak (DOF) yaitu sistem gerak yang dikontrol oleh *aileron*, *elevator* dan *rudder*. Gerak longitudinal pesawat terbang dikontrol oleh sistem *elevator*. Sistem pengendalian gerak pesawat terbang dengan mempertimbangkan adanya suatu noise, sehingga dibutuhkan estimator yang digunakan untuk mengestimasi gerak pesawat terbang. Estimasi dilakukan dengan metode Kalman Filter dan kombinasi Logika Fuzzy-Kalman Filter yang disebut Fuzzy Kalman Filter, serta *optimal smoothing*. Berdasarkan hasil penelitian, nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) menunjukkan bahwa metode Fuzzy Kalman Filter relatif lebih kecil daripada metode Kalman Filter pada semua variabel gerak longitudinal pesawat terbang. Peningkatan error variabel masing-masing yaitu kecepatan translasi ke depan 62,4 %, kecepatan translasi ke atas 0,7 %, kecepatan sudut *pitch* 0,009 % dan sudut *pitch* 1,7 %. Namun berdasarkan waktu komputasi, metode Kalman Filter lebih cepat dengan waktu 0,1628 s dibandingkan Fuzzy Kalman Filter yang membutuhkan waktu 0,2802 s.

**Kata Kunci**— Gerak Pesawat Terbang, Kalman Filter, Fuzzy Kalman Filter, *Optimal Smoothing*.

## I. PENDAHULUAN

Pesawat terbang merupakan sarana transportasi udara yang diperlukan bagi khalayak umum. Pesawat terbang memiliki enam derajat kebebasan gerak (*six degree of freedom*). Sistem kontrol gerak pesawat terbang dibagi menjadi tiga yaitu sistem *aileron*, sistem *elevator* dan sistem *rudder*. Berdasarkan arah, gerak terbang pesawat terdapat dua yaitu gerak longitudinal dan gerak lateral. Dengan adanya faktor-faktor internal dan eksternal dari pesawat yang dapat menghambat kestabilan pesawat terbang saat terbang di udara. Sistem pengendalian pesawat terbang yang telah dirancang sesuai kebutuhan dengan tingkat pengukuran yang akurat akan terdapat adanya suatu noise [1],[6].

Noise tersebut ukurannya sangat kecil. Noise tersebut dapat terjadi pada noise sistem dan noise pengukuran. Meskipun ukurannya sangat kecil, noise-noise tersebut dapat menghambat kinerja dari sistem pengendalian gerak pesawat. Untuk mengetahui tingkat noise pada sistem gerak pesawat terbang tersebut diperlukan adanya suatu pendekatan yang lebih akurat dari sebelumnya. Suatu pendekatan yang dilakukan yaitu berupa adanya estimator. Estimator digunakan untuk memprediksi

variabel-variabel kontrol gerak pesawat terbang dengan adanya noise tersebut [7].

Kalman Filter merupakan metode yang berhasil digunakan dalam estimasi dan identifikasi variabel [9]. Fuzzy Kalman Filter merupakan suatu metode fusi yang berasal dari Logika Fuzzy dan Kalman Filter. Logika Fuzzy merupakan metode penalaran yang dapat menangani masalah ketidakpastian pada dunia nyata [2]. Sedangkan Kalman Filter merupakan metode estimasi variabel keadaan dari sistem linear dinamik [3]. Pada penelitian ini membahas tentang estimasi variabel keadaan gerak longitudinal pesawat terbang menggunakan metode Fuzzy Kalman Filter.

## II. PEMBAHASAN

### A. Menentukan Model Sistem dan Model pengukuran

Model sistem dan model pengukuran dapat ditulis sebagai berikut [3]:

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + G_k w_k$$

$$z_k = H_k x_k + v_k$$

dimana  $w_k \sim N(0, Q_k)$  dan  $v_k \sim N(0, R_k)$ . Variabel keadaan yang meliputi yaitu kecepatan translasi ke depan ( $u$ ), kecepatan translasi ke atas ( $w$ ), kecepatan sudut *pitch* ( $q$ ) dan sudut *pitch* ( $\theta$ ).

### B. Implementasi Kalman Filter

Penerapan metode Kalman Filter yang digunakan dalam waktu diskrit. Tahap-tahap yang dilakukan untuk metode Kalman Filter yaitu [3]

1. Pelinearan  
Sistem model gerak longitudinal pesawat terbang dilakukan pelinearan dengan metode jacobian.
2. Pendiskritan  
Pendiskritan dengan metode beda hingga maju yaitu [4]

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} \approx \frac{x_{k+1} - x_k}{\Delta t}$$

3. Tahap Prediksi dan Tahap Koreksi  
Pada tahap ini akan diperoleh perhitungan nilai estimasi dan kovarian error.

### C. Implementasi Fuzzy Kalman Filter

Tahap-tahap yang dilakukan untuk metode Fuzzy Kalman Filter yaitu

1. Pendiskritan  
Pendiskritan dengan metode beda hingga maju yaitu [4]

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} \approx \frac{x_{k+1} - x_k}{\Delta t}$$

2. Proses Fuzzifikasi

Pada tahap ini merupakan proses fuzzifikasi untuk menentukan fungsi keanggotaan dari masing-masing variabel Fuzzy. Fungsi keanggotaan yang diterapkan menggunakan fungsi keanggotaan linear yaitu pada saat maksimum dan minimum [2],[4],[5].

- Jika variabel minimum, maka fungsi keanggotaan

$$\mu_{x_1} = \frac{(x - x^-)}{(x^+ - x^-)}$$

- Jika variabel maksimum, maka fungsi keanggotaan

$$\mu_{x_2} = \frac{(x^+ - x)}{(x^+ - x^-)}$$

3. Menentukan Aturan Dasar Logika Fuzzy

Pada tahap ini, aturan dasar Logika Fuzzy diperoleh dari kombinasi dari variabel-variabel minimum dan variabel-variabel maksimum. Penentuan aturan dasar berdasarkan dari variabel yang difuzzikan. Aturan dasar terbentuk yaitu  $2^n$  dengan n merupakan jumlah variabel yang difuzzikan. Sehingga terdapat  $2^n$  aturan yang akan digunakan untuk penerapan Fuzzy Kalman Filter [4],[5].

4. Penerapan Algoritma Kalman Filter

Pada tahap ini dilakukan estimasi dengan algoritma Kalman Filter pada waktu diskrit dengan model sistem dan model pengukuran diperoleh melalui proses fuzzifikasi dan aturan dasar Logika Fuzzy [4],[5].

5. Defuzzifikasi

Proses defuzzifikasi merupakan proses filter untuk memperoleh hasil estimasi akhir. Rumus bobot yang diperoleh berdasarkan himpunan-himpunan Fuzzy yang terbentuk dari kombinasi fungsi keanggotaan dari variabel-variabel Fuzzy sesuai aturan dasar. Rumus bobot tersebut diperoleh dari jumlah dari setiap himpunan Fuzzy yang dikalikan dengan hasil estimasi masing-masing kemudian dibagi dengan jumlah dari himpunan-himpunan Fuzzy [4],[5].

$$x_{k+1} = \frac{\rho^1 x_{k+1}^1 + \rho^2 x_{k+1}^2 + \dots + \rho^i x_{k+1}^i}{\rho^1 + \rho^2 + \dots + \rho^i}$$

dimana  $i = 2^n$ .

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Persamaan Gerak Longitudinal Pesawat Terbang

Gerak longitudinal pesawat terbang dipengaruhi oleh kecepatan translasi ke depan ( $u$ ), kecepatan translasi ke atas ( $w$ ), kecepatan sudut *pitch* ( $q$ ) dan sudut *pitch* ( $\theta$ ). Persamaan gerak longitudinal pesawat terbang diperoleh sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{u} &= X_u u + X_w w - wq - g\theta + X_{\delta_e} \delta_e + X_{\delta_T} \delta_T \\ \dot{w} &= Z_u u + Z_w w + U_0 q + qu + Z_{\delta_e} \delta_e + Z_{\delta_T} \delta_T \\ \dot{q} &= (M_u + M_w Z_u)u + (M_w + M_w Z_w)w + \\ &\quad (M_q + M_w U_0)q + M_w qu + (M_{\delta_e} + M_w Z_{\delta_e})\delta_e \\ &\quad + (M_{\delta_T} + M_w Z_{\delta_T})\delta_T \\ \dot{\theta} &= q \end{aligned} \tag{1}$$

Dengan memisalkan [6]:

$$\begin{aligned} \tilde{M}_u &= M_u + M_w Z_u & \tilde{M}_{\delta_e} &= M_{\delta_e} + M_w Z_{\delta_e} \\ \tilde{M}_w &= M_w + M_w Z_w & \tilde{M}_{\delta_T} &= M_{\delta_T} + M_w Z_{\delta_T} \\ \tilde{M}_q &= M_q + M_w U_0 \end{aligned}$$

Dan untuk outputnya berdasarkan penelitian yang dirujuk, variabel yang dapat diami yaitu  $w, q$  sehingga diperoleh [6]

$$z = \begin{bmatrix} w \\ q \end{bmatrix}$$

1. Diskritisasi

Berdasarkan persamaan (1) untuk memperoleh sistem persamaan waktu diskrit dengan cara melakukan proses pendiskritan dengan menggunakan metode beda hingga maju. Sehingga diperoleh persamaan gerak longitudinal pesawat terbang waktu diskrit yaitu

$$\begin{aligned} u_{k+1} &= (X_u \Delta t + 1)u_k + X_w \Delta t w_k - \Delta t w_k q_k - g \Delta t \theta_k \\ &\quad + X_{\delta_e} \Delta t \delta_e + X_{\delta_T} \Delta t \delta_T \\ w_{k+1} &= Z_u \Delta t u_k + (Z_w \Delta t + 1)w_k + U_0 \Delta t q_k + \Delta t q_k u_k \\ &\quad + Z_{\delta_e} \Delta t \delta_e + Z_{\delta_T} \Delta t \delta_T \\ q_{k+1} &= \tilde{M}_u \Delta t u_k + \tilde{M}_w \Delta t w_k + (\tilde{M}_q \Delta t + 1)q_k + \\ &\quad M_w \Delta t q_k u_k + \tilde{M}_{\delta_e} \Delta t \delta_e + \tilde{M}_{\delta_T} \Delta t \delta_T \\ \theta_{k+1} &= \Delta t q_k + \theta_k \end{aligned} \tag{2}$$

2. Pembentukan Sistem Diskrit Stokastik

Sistem persamaan gerak longitudinal pesawat terbang sebenarnya memuat noise, sehingga dapat dibentuk:

$$\begin{aligned} u_{k+1} &= (X_u \Delta t + 1)u_k + X_w \Delta t w_k - \Delta t w_k q_k - g \Delta t \theta_k \\ &\quad + X_{\delta_e} \Delta t \delta_e + X_{\delta_T} \Delta t \delta_T + \xi_{1k} \\ w_{k+1} &= Z_u \Delta t u_k + (Z_w \Delta t + 1)w_k + U_0 \Delta t q_k + \Delta t q_k u_k \\ &\quad + Z_{\delta_e} \Delta t \delta_e + Z_{\delta_T} \Delta t \delta_T + \xi_{2k} \\ q_{k+1} &= \tilde{M}_u \Delta t u_k + \tilde{M}_w \Delta t w_k + (\tilde{M}_q \Delta t + 1)q_k + \\ &\quad M_w \Delta t q_k u_k + \tilde{M}_{\delta_e} \Delta t \delta_e + \tilde{M}_{\delta_T} \Delta t \delta_T + \xi_{3k} \\ \theta_{k+1} &= \Delta t q_k + \theta_k + \xi_{3k} \end{aligned} \tag{3}$$

Output juga memuat noise pengukuran, sehingga output pada waktu diskrit yaitu

$$z_k = \begin{bmatrix} w_k \\ q_k \end{bmatrix} + \eta_k$$

Dengan  $\xi_k$  merupakan noise sistem dan  $\eta_k$  merupakan noise pengukuran.

B. Implementasi Kalman Filter

Metode Kalman Filter digunakan untuk sistem diskrit yang linear. Sehingga dengan melakukan pelinearan terhadap sistem model pada persamaan (2) dengan metode jacobian yaitu

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k \\ J_x &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_k} & \frac{\partial f_1}{\partial w_k} & \frac{\partial f_1}{\partial q_k} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_k} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_k} & \frac{\partial f_2}{\partial w_k} & \frac{\partial f_2}{\partial q_k} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_k} \\ \frac{\partial f_3}{\partial u_k} & \frac{\partial f_3}{\partial w_k} & \frac{\partial f_3}{\partial q_k} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_k} \\ \frac{\partial f_4}{\partial u_k} & \frac{\partial f_4}{\partial w_k} & \frac{\partial f_4}{\partial q_k} & \frac{\partial f_4}{\partial \theta_k} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{1}$$

$$J_u = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \delta_e} & \frac{\partial f_1}{\partial \delta_T} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \delta_e} & \frac{\partial f_2}{\partial \delta_T} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \delta_e} & \frac{\partial f_3}{\partial \delta_T} \\ \frac{\partial f_4}{\partial \delta_e} & \frac{\partial f_4}{\partial \delta_T} \end{bmatrix}$$

Selanjutnya dengan menambahkan noise pada sistem dan pengukuran yang sesuai pada persamaan (3). Penerapan algoritma Kalman Filter yaitu sebagai berikut [3]:

- model sistem dan model pengukuran
 
$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + G \xi_k$$

$$z_k = H x_k + \eta_k$$

$$x_0 \sim N(\bar{x}_0, P_{x_0}), \xi_k \sim N(0, Q_k), \eta_k \sim N(0, R_k)$$
- inisialisasi
 
$$\hat{x}_0 = \bar{x}_0, P_0 = P_{x_0}$$
- tahap prediksi (*time update*)
 
$$P_{\bar{k}+1} = A_k P_k A_k^T + G_k Q_k G_k^T$$

$$\hat{x}_{\bar{k}+1} = A_k \hat{x}_k + B_k u_k$$
- tahap koreksi (*measurement update*)
 
$$K_{k+1} = P_{\bar{k}+1} H_{k+1}^T (H_{k+1} P_{\bar{k}+1} H_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1}$$

$$P_{k+1} = (I - K_{k+1} H_{k+1}) P_{\bar{k}+1}$$

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_{\bar{k}+1} + K_{k+1} (z_{k+1} - H_{k+1} \hat{x}_{\bar{k}+1})$$

C. Implementasi Fuzzy Kalman Filter

Langkah-langkah dari metode Fuzzy Kalman Filter, sebagai berikut:

1. Fuzzifikasi

Variabel-variabel yang melalui proses fuzzifikasi yaitu kecepatan translasi ke depan ( $u$ ), kecepatan translasi ke atas ( $w$ ) dan kecepatan sudut *pitch* ( $q$ ). Dengan proses fuzzifikasi, variabel tersebut ditentukan pada interval masing-masing, sebagai berikut:

$$u \in [u^-, u^+]$$

$$w \in [w^-, w^+]$$

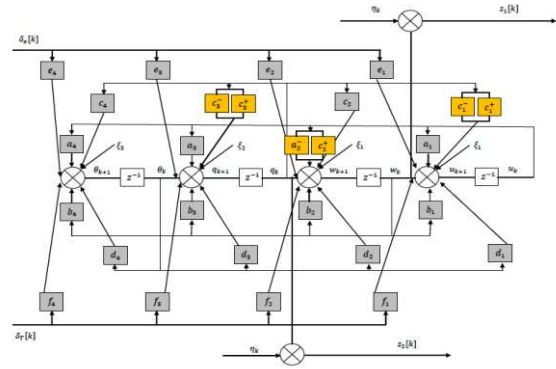
$$q \in [q^-, q^+]$$

Dimana  $x^-$  pada saat minimum dan  $x^+$  pada saat maksimum. Sehingga diperoleh fungsi keanggotaannya yaitu

- Jika  $x$  minimum
 
$$\mu_{x_{min}} = \frac{(x-x^-)}{(x^+-x^-)}$$
- Jika  $x$  maksimum

$$\mu_{x_{max}} = \frac{(x^+-x)}{(x^+-x^-)}$$

Dimana  $x$  adalah variabel-variabel Fuzzy. Berikut ini adalah diagram blok sistem Fuzzy model gerak longitudinal pesawat terbang.



Gambar 1. Diagram blok sistem Fuzzy untuk Model Gerak Longitudinal Pesawat Terbang

2. Aturan Dasar Logika Fuzzy

Berdasarkan aturan dasar Logika Fuzzy, variabel-variabel yang termuat dalam Fuzzifikasi sehingga diperoleh 8 aturan. Sesuai aturan dasar Logika Fuzzy, yaitu:

$$rule\ i : IF \dots THEN \dots$$

Maka :

- rule 1 : IF  $u = u^-$  &  $w = w^-$  &  $q = q^-$  THEN  $A^1$
- rule 2 : IF  $u = u^-$  &  $w = w^-$  &  $q = q^+$  THEN  $A^2$
- ⋮
- rule 8 : IF  $u = u^+$  &  $w = w^+$  &  $q = q^+$  THEN  $A^8$

3. Algoritma Fuzzy Kalman Filter

Berdasarkan proses fuzzifikasi dan aturan dasar Logika Fuzzy, sistem gerak longitudinal pesawat terbang diperoleh terdapat 8 aturan yang akan diterapkan pada algoritma Fuzzy Kalman Filter.

Rule ke- $i$  :

$$A^i = \begin{bmatrix} X_u \Delta t + 1 & X_w \Delta t & -\Delta t w_k^j & -g \Delta t \\ (Z_u + q_k^j) \Delta t & Z_w \Delta t + 1 & U_0 \Delta t & 0 \\ \tilde{M}_u \Delta t & \tilde{M}_w \Delta t & (\tilde{M}_q + M_w \Delta t u_k^j) \Delta t + 1 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t & 1 \end{bmatrix}$$

dengan  $j$  yaitu pada saat minimum dan maksimum.

- model sistem dan model pengukuran
 
$$x_{k+1}^i = A_k^i x_k + B_k u_k + G \xi_k$$

$$z_k = H x_k + \eta_k$$

$$x_0 \sim N(\bar{x}_0, P_{x_0}), \xi_k \sim N(0, Q_k), \eta_k \sim N(0, R_k)$$
- inisialisasi
 
$$\hat{x}_0 = \bar{x}_0, P_0 = P_{x_0}$$
- tahap prediksi (*time update*)
 
$$P_{\bar{k}+1}^i = A_k^i P_k (A_k^i)^T + G_k Q_k G_k^T$$

$$\hat{x}_{\bar{k}+1}^i = A_k^i \hat{x}_k + B_k u_k$$
- tahap koreksi (*measurement update*)
 
$$K_{k+1}^i = P_{\bar{k}+1}^i H_{k+1}^T (H_{k+1} P_{\bar{k}+1}^i H_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1}$$

$$P_{k+1}^i = (I - K_{k+1}^i H_{k+1}) P_{\bar{k}+1}^i$$

$$\hat{x}_{k+1}^i = \hat{x}_{\bar{k}+1}^i + K_{k+1}^i (z_{k+1} - H_{k+1} \hat{x}_{\bar{k}+1}^i)$$

Dimana  $i = 1, 2, \dots, 8$ .

4. Defuzzifikasi

Berdasarkan rumus bobot rata-rata, sebagai berikut [11]:

$$\hat{x}_{k+1} = \frac{\rho^1 \hat{x}_{k+1}^1 + \rho^2 \hat{x}_{k+1}^2 + \dots + \rho^8 \hat{x}_{k+1}^8}{\rho^1 + \rho^2 + \dots + \rho^8}$$

Dimana nilai dari masing-masing  $\rho^i$  ditentukan dari kombinasi fungsi keanggotaan sesuai aturan.

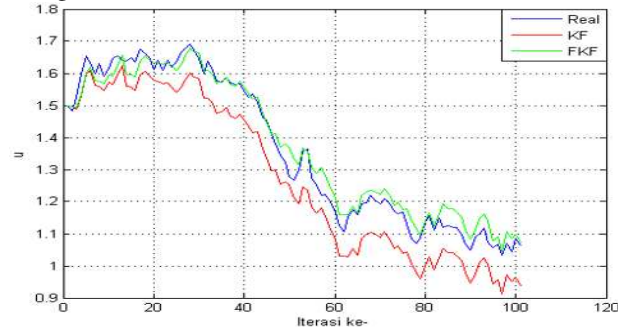
$$\begin{aligned} \rho^1 &= \mu_{u_{min}} \cdot \mu_{w_{min}} \cdot \mu_{q_{min}} \\ \rho^2 &= \mu_{u_{min}} \cdot \mu_{w_{min}} \cdot \mu_{q_{max}} \\ &\vdots \\ \rho^8 &= \mu_{u_{max}} \cdot \mu_{w_{max}} \cdot \mu_{q_{max}} \end{aligned}$$

**D. Simulasi**

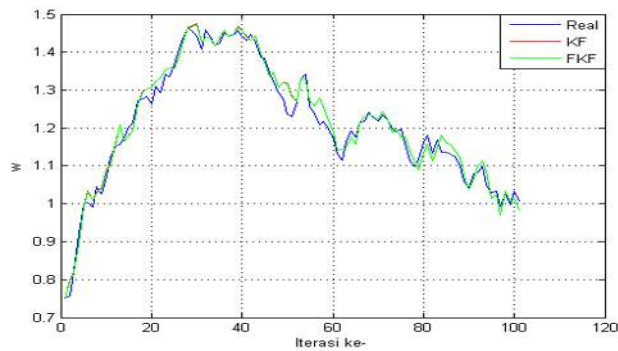
Pada penelitian ini, error model pada variabel Fuzzy yang digunakan yaitu 10% dari kondisi awal [4],[5]. Berikut ini adalah anggota dari variabel Fuzzy yaitu:

$$\begin{aligned} u &\in [u - 10\%u, u + 10\%u] \\ w &\in [w - 10\%w, w + 10\%w] \\ q &\in [q - 10\%q, q + 10\%q] \end{aligned}$$

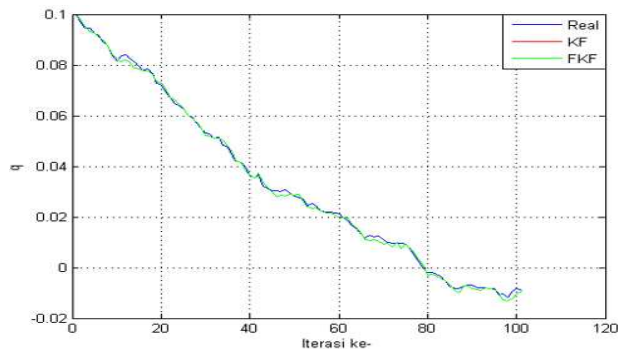
Pada kasus ini diberikan kondisi awal yaitu  $u(0) = 1,5 \text{ m/s}$ ,  $w(0) = 0,75 \text{ m/s}$ ,  $q(0) = 0,1 \text{ rad/s}$ ,  $\theta(0) = 0,05 \text{ rad}$ . Dengan mengambil nilai rata-rata hasil estimasi yang dilakukan 10 kali, hasil estimasi ditunjukkan sebagai berikut:



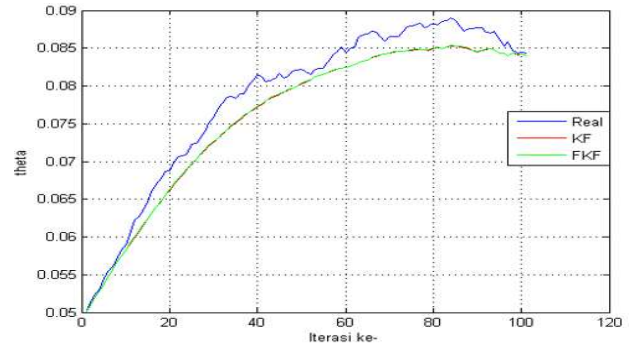
**Gambar 2.** Hasil Estimasi  $u$  pada KF dan FKF



**Gambar 3.** Hasil Estimasi  $w$  pada KF dan FKF



**Gambar 4.** Hasil Estimasi  $q$  pada KF dan FKF



**Gambar 5.** Hasil Estimasi  $\theta$  pada KF dan FKF

Berdasarkan perhitungan nilai RMSE dari hasil estimasi pada metode Kalman Filter dan Fuzzy Kalman Filter diperoleh yaitu

**Tabel 1.** Nilai RMSE untuk Kalman Filter dan Fuzzy Kalman Filter

| Variabel | RMSE       |            |
|----------|------------|------------|
|          | KF         | FKF        |
| $u$      | 0,092166   | 0,034619   |
| $w$      | 0,023070   | 0,022908   |
| $q$      | 0,00109609 | 0,00109599 |
| $\theta$ | 0,002600   | 0,002555   |

Terlihat bahwa pada setiap variabel gerak longitudinal pesawat terbang metode Fuzzy Kalman Filter relatif lebih kecil nilai error rata-ratanya daripada Kalman Filter. Namun Kalman Filter lebih cepat dengan waktu 0,1628 s daripada Fuzzy Kalman Filter dengan waktu 0,2802 s.

**IV. KESIMPULAN DAN SARAN**

**A. Kesimpulan**

1. Hasil estimasi menunjukkan bahwa setiap variabel gerak longitudinal pesawat terbang metode Fuzzy Kalman Filter lebih baik daripada metode Kalman Filter. Nilai RMSE juga menunjukkan bahwa error rata-rata dari metode Fuzzy Kalman Filter lebih kecil daripada metode Kalman Filter. Peningkatan error yaitu kecepatan translasi ke depan 62,4 %, kecepatan translasi ke atas 0,7 %, kecepatan sudut *pitch* 0,009 % dan sudut *pitch* 1,7 %.
2. Berdasarkan waktu komputasi menunjukkan bahwa metode Kalman Filter hanya membutuhkan waktu 0,1628 s lebih baik daripada metode Fuzzy Kalman Filter yang membutuhkan waktu 0,2802 s.

**B. Saran**

Model gerak longitudinal pesawat terbang merupakan sistem model nonlinear. Oleh karena itu, untuk penelitian selanjutnya dapat digunakan dengan metode Extended Kalman Filter. Dengan melakukan kombinasi metode Logika Fuzzy dan Extended Kalman Filter.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. McLean, *Automatic Flight Control Systems*. UK: Prentice Hall International (1990).
- [2] H. J. Zimmermann, *Fuzzy Set Theory and Its Applications*. Second Revised Edition. United States: Kluwer Academic Publishers (1992), 2nd ed.
- [3] F. L. Lewis, *Optimal Estimation with An Introduction to Stochastic Control Theory*. School of Electrical Engineering Georgia Institute of Technology Atlanta. Georgia: (1998).
- [4] H. Mahmuri, "Estimasi Perkembangan Sel Kanker Menggunakan Fuzzy Kalman Filter," Tesis Jurusan Matematika Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya (2011).
- [5] G. Chen, Q. Xie, and L. S. Shieh, "Fuzzy Kalman Filter," *Journal Information of Information Sciences*. No. 109 (1997) hal. 197-209.
- [6] A. Sukandi, "Pengendalian Gerak Longitudinal Pesawat Terbang dengan Metode *Decoupling*," Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta (2010).
- [7] N. L. Gozali, A. S. Aisjah and E. Apriliani, "Estimasi Variabel Dinamik Kapal Menggunakan Metode Kalman Filter," *Jurnal Teknik POMITS* Vol. 2, No. 1, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, (2013).
- [8] E. Apriliani, Subchan, F. Yunaini, and S. Hartini, "Estimation and Control Design of Mobile Robot Position," *Far East Journal of Mathematical Sciences (FJMS)*, PUSPHA PUBLISHER, Surabaya (2013).
- [9] A. Riski, M. I. Irawan, E. Apriliani, "Identifikasi Instrumen Gamelan Jawa Menggunakan Jaringan Fungsi Basis Radial dengan Metode Pelatihan Extended Kalman Filter," *Prosiding Seminar Nasional Matematika, Universitas Jember*, (2014).