

Estimasi Lintasan AUV 3 Dimensi (3D) Dengan *Ensemble Kalman Filter*

Ngatini¹, Hendro Nurhadi²

Informatika, Universitas Internasional Semen Indonesia¹

Jl. Veteran, Kompleks PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk., Gresik, Jawa Timur, 61122¹

Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya²

*ngatini@uisi.ac.id*¹

Abstract - AUV is an unmanned underwater vehicle that is driven (controlled) by a computer device. The motion system of AUV requires a navigation and guidance control to direct the motion of the AUV, so an estimated position of the AUV is needed in accordance with the given path. This study develops the position estimation of AUV Segorogeni ITS using the Ensemble Kalman Filter (EnKF) method because EnKF can estimate the problem in the form of a non-linear system model where the equations of AUV are non-linear. Position estimation is carried out on a 3-dimensional (3D) trajectory which is built by using the Octave program. The simulation displays the results of AUV position estimation using the EnKF algorithm with several different ensembles which are 50, 100, 200 and 300 ensembles. The accuracy of the estimation is measured by the error value of the estimated result, namely the value of RMSE (Root Mean Square Error). The simulation results show an estimated error average of 0.4 m for x-position, 0.46 m for y-position, 0.08 m for z-position and 0.1 m for angle error.

Keywords – AUV, EnKF, 3D Trajectory.

Intisari – AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) merupakan kapal selam tanpa awak yang sistem geraknya dikendalikan (dikendalikan) oleh perangkat komputer. Sistem gerak dari AUV membutuhkan sebuah navigasi dan *guidance control* yang mampu mengarahkan gerak AUV, sehingga dibutuhkan sebuah estimasi posisi AUV sesuai dengan lintasan yang diberikan. Penelitian ini mengembangkan estimasi posisi dari AUV Segorogeni ITS menggunakan metode atau algoritma Ensemble Kalman Filter (EnKF) karena EnKF mampu mengestimasi persoalan berbentuk model sistem non linier dimana persamaan gerak dari AUV berbentuk non linear. Estimasi posisi dilakukan pada lintasan atau trayektori 3 dimensi (3D) yang dibangun dengan bantuan program Octave. Simulasi menampilkan hasil estimasi posisi AUV menggunakan algoritma EnKF dengan beberapa jumlah ensemble yang berbeda yaitu 50, 100, 200 dan 300 ensemble. Akurasi dari estimasi tersebut diukur dari nilai error hasil estimasi yaitu nilai RMSE (*Root Mean Square Error*). Hasil simulasi menunjukkan rata-rata error estimasi yaitu 0.4 m posisi-x, 0.46 m posisi-y, 0.08 m posisi-z dan 0.1 m error sudut.

Kata Kunci – AUV, EnKF, Lintasan 3 dimensi.

I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara maritim yang mempunyai kekayaan sumber daya laut dalam jumlah besar. Kekayaan yang terkandung di dalamnya meliputi spesies flora, fauna, mikroba, terumbu karang, sumber daya dapat diperbaharui ataupun tidak dapat diperbaharui hingga energi kelautan dan kekayaan lain. Kekayaan yang melimpah tersebut memerlukan pemeliharaan dan pemantauan secara teratur untuk menjaga keamanan dari bahaya yang merugikan negara. Pemantauan terhadap kondisi bawah laut yang tidak terstruktur dan berbahaya memerlukan suatu alat (wahana) bawah air yang mampu mengatasi kondisi tersebut. Wahana yang dapat digunakan untuk pemantauan bawah laut tersebut adalah wahana nir awak bawah air. Wahana nir awak bawah air saat ini banyak dikembangkan secara ilmiah dan dapat diaplikasikan dalam beberapa bidang kehidupan. Wahana nir awak bawah air menjadi suatu

alat penting untuk berbagai kegiatan bawah air karena memiliki kecepatan tinggi, daya tahan dan kemampuan menyelam yang lebih aman dibandingkan manusia [1]. Salah satu wahana nir awak bawah air yaitu AUV (Autonomous Underwater Vehicle). AUV adalah perangkat robotik yang dikendalikan di dalam air dengan menggunakan sistem penggerak, dikontrol dan dikemudikan (dikendalikan) oleh perangkat komputer, dan bermanuver pada tiga dimensi [2].

AUV mempunyai peranan penting dalam kegiatan bawah air. Pengembangan dari AUV harus terus dilakukan. Salah satu pengembangannya berupa estimasi lintasan AUV dengan trayektori lintasan yang ditentukan. Salah satu estimasi posisi AUV adalah dengan menggunakan Kalman Filter [3] dan juga estimasi AUV dengan menggunakan perbandingan antara Fuzzy Kalman Filter dan Ensemble Kalman Filter pada lintasan tertentu [4]. Pada dasarnya metode estimasi Kalman Filter memiliki beberapa modifikasi yang menyesuaikan dengan jenis model matematika pada permasalahan yang akan diselesaikan. Beberapa modifikasi dari Kalman Filter antara lain yaitu *Nonlinear filtering* dan *Reduced rank filter* [5]. Beberapa jenis metode *Nonlinear filtering* yaitu Extended Kalman Filter, Ensemble Kalman Filter, dan Unscented Kalman Filter. Selain itu, terdapat modifikasi lagi yaitu Fuzzy Kalman Filter. Pada penelitian ini, penulis mengembangkan estimasi posisi AUV pada trayektori 3 Dimensi (3D) menggunakan metode EnKF (Ensemble Kalman Filter). Hasil estimasi tersebut akan disimulasikan dengan bantuan program Octave-4.2.2. Tingkat keakuratan dari hasil estimasi dapat dilihat melalui error estimasi yang dihitung dengan menggunakan RMSE (*Root Mean Square Error*).

II. SIGNIFIKANSI STUDI

A. AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*)

Estimasi posisi AUV telah banyak dilakukan dengan beberapa metode dan lintasan. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk estimasi posisi AUV adalah metode Asimilasi Data. Beberapa metode telah banyak digunakan untuk melakukan estimasi posisi AUV antara lain yaitu Kalman Filter [3], Ensemble Kalman Filter pada model sistem non-linear [6], EnKF-SR pada AUV Segorogeni ITS [7], perbandingan Fuzzy Kalman Filter dan EnKF [4]. Metode estimasi tersebut mampu memberikan hasil estimasi posisi dari AUV. Metode Kalman Filter dan Fuzzy Kalman Filter pada penelitian Ermayanti, 2014 merupakan metode estimasi dengan state space berbentuk persamaan linear sedangkan persamaan gerak dari AUV berbentuk non-linear, sehingga diperlukan proses linearisasi dalam proses estimasi tersebut. Hal ini tentu akan memberikan hasil yang berbeda ketika estimasi dilakukan tanpa merubah bentuk persamaan sistem gerak dari AUV yaitu dengan menggunakan metode EnKF pada penelitian Ngatini, 2016. Pada penelitian kali ini penulis mengembangkan bentuk lintasan lain yang belum pernah diangkat pada penelitian sebelumnya yaitu lintasan 3 dimensi yang terdiri dari gerak surge, sway, heave dan yaw. Sebelum membahas mengenai estimasi AUV, berikut penjelasan tentang AUV secara umum.

AUV adalah perangkat yang dikendalikan di dalam air dengan menggunakan sistem penggerak, dikontrol dan dikemudikan (dikendalikan) oleh perangkat komputer, dan bermanuver pada tiga dimensi [2]. AUV dapat dimanfaatkan dalam beberapa bidang antara lain [3]:

a. Lingkungan

AUV dapat dimanfaatkan dalam perbaikan lingkungan yaitu memeriksa struktur lautan yang mencakup *pipelines*, *dams*, dan monitoring jangka panjang.

b. Sains

Pada bidang sains AUV berguna dalam pemetaan bawah laut, pemetaan geologi dan sebagai monitor keadaan bawah laut.

c. Industri Minyak dan Gas

Pada industri minyak dan gas AUV berguna dalam memantau keadaan laut dan penaksiran *resource*, serta mengkontruksi dan memelihara struktur bawah laut.

d. Militer

AUV mempunyai peran dalam bidang militer yaitu mampu memantau daerah yang dilindungi dari bahaya luar yang dapat membahayakan wilayah lautan.

Nilai parameter pada model AUV yang digunakan dalam penelitian ini adalah AUV Segorogeni ITS dengan spesifikasi sebagai berikut [7].

TABEL I
SPESIFIKASI AUV SEGOROGENI ITS

Spesifikasi	Ukuran
Berat	15 Kg
Overall length	980 mm
Beam	188 mm
Controller	Ardupilot Mega 2.0
Communication	Wireless Xbee 2.4 GHz
Camera	TTL Camera
Battery	Li-Po 11.8 v
Propulsi Motor	12 V motor DC
Propeller	3 blades OD; 40 mm
Speed	1.94 knots (1 m/s)

B. Sistem Koordinat

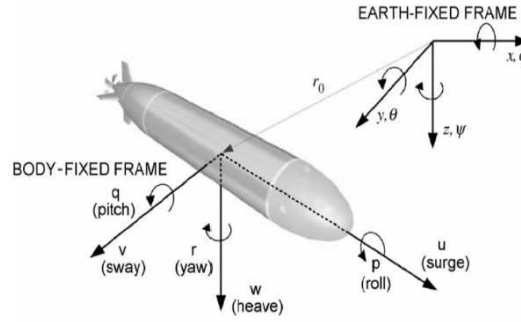
a. Dua Koordinat Sistem

Dua hal penting yang dibutuhkan untuk menganalisa gerak *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) yaitu *Earth Fixed (inertial) coordinates* dan *Body Fixed Coordinates*. *Earth Fixed Coordinates* digunakan untuk menjelaskan posisi dari AUV yaitu posisi sumbu x mengarah ke utara, sumbu y ke arah timur dan sumbu z mengarah ke pusat bumi. *Body Fixed Coordinates* digunakan untuk menjelaskan kecepatan dan percepatan dari AUV dengan titik mula berada pada pusat gravitasi bumi. Sumbu x mengarah ke haluan kapal, sumbu y positif mengarah ke sisi kanan kapal, dan sumbu z positif mengarah ke bawah [8].

Gerak dari AUV mempunyai 6 DOF, yang terdiri dari 3 gerak translasi dan 3 gerak rotasi sepanjang sumbu x, y, dan z. Persamaan umum dari gerak translasi yaitu *surge* (gerak maju mundur), *sway* (gerak kanan kiri), dan *heave* (gerak atas bawah). Sedangkan gerak rotasi yaitu *roll* (berguling), *pitch* (gerak angguk-angguk) dan *yaw* (gerak menghadap kanan-kiri). Berikut tabel notasi yang digunakan pada AUV [8].

TABEL II
NOTASI PADA AUV

DOF	Pergerakan AUV	Gaya/ Momen	Kecepatan	Posisi/ Sudut Anguler
1	Surge	X	U	X
2	Sway	Y	V	Y
3	Heave	Z	W	Z
4	Roll	K	P	ϕ
5	Pitch	M	Q	θ
6	Yaw	N	R	ψ



Gambar 1. Sistem Koordinat AUV

b. Transformasi Koordinat

Sistem koordinat gerak AUV yaitu *Earth Fixed (inertial) Coordinates* dan *Body Fixed Coordinates*. Ketika dua koordinat bekerja bersama dalam gerak AUV, hal penting yang harus dilakukan adalah memperjelas hubungan transformasi antara kedua koordinat tersebut. Berikut transformasi dari kecepatan linear dan angular dari AUV menjadi posisi dan orientasi [9].

$$\dot{x} = u \cos(\psi) - v \sin(\psi) \tag{1}$$

$$\dot{y} = u \sin(\psi) + v \cos(\psi) \tag{2}$$

$$\dot{z} = w \tag{3}$$

$$\dot{\psi} = r \tag{4}$$

C. Model Persamaan AUV

Persamaan gerak AUV merupakan model persamaan non linier. Berikut persamaan AUV 6 DOF dengan memperhatikan gaya dan momen yang mempengaruhi gerak AUV [8].

a. Surge

$$m \left[\begin{matrix} \dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) \\ +y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q}) \end{matrix} \right] = X_{res} + X_{u|u}|u|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{vr}vr + X_{rr}rr + X_{prop} \tag{5}$$

b. Sway

$$m \left[\begin{matrix} \dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) \\ +z_G(qr - \dot{p}) + x_G(pq + \dot{r}) \end{matrix} \right] = Y_{res} + Y_{v|v}|v|v| + Y_{r|r}|r|r| + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r \tag{6}$$

c. Heave

$$m \left[\begin{matrix} \dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) \\ +x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p}) \end{matrix} \right] = Z_{res} + Z_{w|w}|w|w| + Z_{q|q}|q|q| + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp + Z_{uw}uw + Z_{uu\delta_s} \tag{7}$$

d. Roll

$$I_x\dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] = K_{res} + K_{p|p}|p|p| + K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{prop} \tag{8}$$

e. Pitch

$$I_y\dot{q} + (I_x - I_z)rp + m \left[\begin{matrix} z_G(\dot{u} - vr + wq) \\ -x_G(\dot{w} - uq + vp) \end{matrix} \right] = M_{res} + M_{w|w}|w|w| + M_{q|q}|q|q| + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{uu\delta_s}u^2\delta_s \tag{9}$$

f. Yaw

$$I_z\dot{r} + (I_y - I_x)pq + m \left[\begin{matrix} x_G(\dot{v} - wp + ur) \\ -y_G(\dot{u} - vr + wq) \end{matrix} \right] = N_{res} + N_{v|v}|v|v| + N_{r|r}|r|r| + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + M_{uu\delta_r}u^2\delta_r \tag{10}$$

D. Ensemble Kalman Filter

Asimilasi data merupakan sebuah metode estimasi yang menggabungkan antara model matematika dan data pengukuran [5]. Asimilasi data tersebut dapat mengestimasi sebuah parameter atau variabel keadaan dengan jumlah data pengukuran yang jauh lebih sedikit dibandingkan dengan cara estimasi secara statistik murni. Selain itu, asimilasi data memberikan hasil estimasi yang lebih baik dibandingkan model matematika saja, karena metode asimilasi data mampu beradaptasi untuk sistem yang memiliki pengaruh luar yang fluktuatif [10]. Salah satu metode asimilasi data adalah Kalman Filter. Kalman Filter merupakan metode estimasi yang dapat diterapkan pada permasalahan stokastik untuk sistem linear [11]. Kalman Filter banyak diterapkan dalam kehidupan sehari-hari, pertama kali Kalman Filter diterapkan pada navigasi pesawat oleh R.E. Kalman, 1960 yang merupakan pencetus pertama dari Kalman Filter [12]. Mengutip dari Apriliani, 2014 menyebutkan bahwa dalam perkembangannya Kalman Filter banyak diterapkan dalam bidang hidrologi, seperti estimasi ketinggian gelombang laut [13], pasang surut air laut [14], ketinggian air sungai [15], masalah meteorologi seperti kerusakan ozon, masalah lingkungan seperti estimasi penyebaran limbah cair dalam air tanah [16], hingga estimasi penyebaran polutan di udara [17]. Selain beberapa penerapan di atas terdapat pula estimasi AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) dengan menggunakan Kalman Filter [3].

Salah satu modifikasi dari Kalman Filter adalah Ensemble Kalman Filter (EnKF). Metode Ensemble Kalman Filter (EnKF) pertama kali diperkenalkan oleh Evensen (1994) dengan membangkitkan atau menggunakan sejumlah ensemble untuk mengestimasi kovariansi error pada tahap prediksi [18]. Metode Ensemble Kalman Filter (EnKF) merupakan salah satu metode asimilasi data yang telah banyak digunakan untuk mengestimasi berbagai persoalan berbentuk model sistem non linier.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penyelesaian dan hasil dari estimasi posisi AUV terdiri dari beberapa tahapan sebagai berikut.

A. Diskritisasi Model

Diskritisasi model dilakukan pada model sistem gerak non-linear dari AUV untuk mendapatkan *state space*. Proses diskritisasi dilakukan untuk mendapatkan bentuk diskrit dari sistem gerak AUV yang nanti dapat diimplementasikan pada algoritma EnKF karena Program Octave mampu membaca data dalam bentuk diskrit. Pembentukan *state space* dilakukan terhadap model sistem gerak AUV pada persamaan (5)-(10). *State space* ini yang digunakan pada proses diskritisasi. Berikut merupakan langkah-langkah pembentukan *state space* dari model sistem gerak AUV.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{mz_G}{m-X_{\dot{u}}} & -\frac{my_G}{m-X_{\dot{u}}} \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{mz_G}{m-Y_{\dot{v}}} & 0 & \frac{(mx_G-Y_{\dot{r}})}{m-Y_{\dot{v}}} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{my_G}{m-Z_{\dot{w}}} & -\frac{mz_G}{m-Z_{\dot{w}}} & 0 \\ \frac{mz_G}{I_x-K_{\dot{p}}} & -\frac{my_G}{I_x-K_{\dot{p}}} & \frac{my_G}{I_x-K_{\dot{p}}} & 1 & 0 & 0 \\ \frac{I_y-M_{\dot{q}}}{I_z-N_{\dot{r}}} & 0 & -\frac{(M_{\dot{w}}+x_G)}{I_y-M_{\dot{q}}} & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{my_G(mx_G-N_{\dot{v}})}{I_z-N_{\dot{r}}} & \frac{my_G}{I_z-N_{\dot{r}}} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B1 \\ B2 \\ B3 \\ B4 \\ B5 \\ B6 \end{pmatrix} \tag{11}$$

Dengan,

$$B1 = \frac{1}{m-X_{\dot{u}}} (X_{res} + X_{u|u}|u|u| + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{vr}vr + X_{rr}rr + X_{prop}-m(-vr + wq-x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq) + z_G(pr))) \tag{12}$$

$$B2 = \frac{1}{m \cdot X_{\dot{v}}} (Y_{res} + Y_{v|v}|v|v| + Y_{r|r}|r|r| + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + Y_{uu}\delta_r u^2 \delta_r - m(-wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr) + x_G(pq))) \quad (13)$$

$$B3 = \frac{1}{m \cdot X_{\dot{w}}} (Z_{res} + Z_{w|w}|w|w| + Z_{q|q}|q|q| + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp + Z_{uw}uw + Z_{uu}\delta_s u^2 \delta_s - m(-uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp) + y_G(rq))) \quad (14)$$

$$B4 = \frac{1}{I_x \cdot K_{\dot{p}}} (K_{res} + K_{p|p}|p|p| + K_{prop} - (I_z - I_y)qr - m(y_G(-uq + vp) - z_G(-wp + ur))) \quad (15)$$

$$B5 = \frac{1}{I_y \cdot M_{\dot{q}}} (M_{res} + M_{w|w}|w|w| + M_{q|q}|q|q| + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{uu}\delta_s u^2 \delta_s - (I_x - I_z)rp - m(z_G(-vr + wq) - x_G(-uq + vp))) \quad (16)$$

$$B6 = \frac{1}{I_z \cdot N_{\dot{r}}} (N_{res} + N_{v|v}|v|v| + N_{r|r}|r|r| + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + M_{uu}\delta_r u^2 \delta_r - (I_y - I_x)pq + m(x_G(-wp + ur) - y_G(-vr + wq))) \quad (17)$$

Secara umum bentuk matriks tersebut dapat ditulis sebagai

$$A\dot{x} = B \quad (18)$$

Sehingga model sistem persamaan gerak AUV dapat dituliskan sebagai berikut

$$\dot{x} = A^{-1}B \quad (19)$$

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.162 & -0.0024 & 0.8989 & 0.0011 & 0.0980 & 0.0001 \\ -0.0012 & -0.8175 & -0.0206 & -0.0431 & -0.0024 & 0.0969 \\ 1.8855 & -0.0418 & -1.0230 & -0.0036 & -0.2205 & 0.0024 \\ -0.0518 & 0.8865 & 0.0511 & 1.0468 & 0.0088 & -0.1050 \\ 15.9131 & -0.3634 & -17.0743 & -0.0425 & -1.8611 & 0.0213 \\ -0.0128 & 15.7327 & 0.1966 & 0.8288 & 0.0240 & -0.8641 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B1 \\ B2 \\ B3 \\ B4 \\ B5 \\ B6 \end{pmatrix}$$

Diskritisasi terhadap waktu dilakukan pada persamaan (19) dengan menggunakan metode Beda Hingga Maju. Berikut merupakan diskritisasi secara umum dari persamaan tersebut.

$$\dot{x} = \frac{x_{k+1} - x_k}{\Delta t} \quad (20)$$

Sehingga *state space* dari model gerak AUV yaitu

$$x_{k+1} = f(x_k, k) \quad (21)$$

State space yang diperoleh akan diimplementasikan pada algoritma EnKF. Pada model sistem dari AUV dibangun sebuah lintasan 3D yang merupakan nilai real atau lintasan yang harus ditempuh oleh AUV. Estimasi posisi dari AUV akan menyesuaikan dengan lintasan yang diberikan.

B. Implementasi Ensemble Kalman Filter

Model sistem gerak AUV tidak tepat sama dengan kondisi pada sistem *real*, maka model tersebut ditambahkan dengan noise sistem yang tidak dituliskan pada model. Sehingga model sistem dituliskan dalam bentuk sebagai berikut.

$$x_{k+1} = f(x_k, k) + w_k \quad (22)$$

Dengan x_{k+1} merupakan variabel keadaan pada waktu $k + 1$, pada kasus ini merupakan kecepatan gerak AUV. w_k merupakan noise sistem yang berdistribusi normal dengan mean = 0 dan kovarian Q .

Model pengukuran dibuat untuk menunjukkan korelasi antara *state* yang diestimasi dengan data pengukuran. Berikut merupakan model pengukuran.

$$z_k = Hx_k + v_k \tag{23}$$

Dengan z_k merupakan data pengukuran. H merupakan matriks pengukuran dan v_k merupakan noise pengukuran yang berdistribusi normal dengan mean = 0 dan kovarian R .

Setelah model sistem pada persamaan (22) dan model pengukuran pada persamaan (23) diperoleh, estimasi terhadap persamaan (5)-(10) dilakukan dengan menggunakan metode Ensemble Kalman Filter dengan data pengukuran. Ensemble Kalman Filter merupakan salah satu modifikasi dari metode Kalman Filter. Kalman Filter sendiri merupakan metode estimasi untuk sistem stokastik dinamik yang linier, sedangkan Ensemble Kalman Filter merupakan metode estimasi untuk sistem stokastik dinamik yang non-linier dengan menggunakan data pengukuran.

Berikut implementasi algoritma Ensemble Kalman Filter pada Persamaan (21).

a. *Inisialisasi*

Bangkitkan n-ensemble dari nilai awal *state* yang akan diestimasi

$$x_{0,i} = [x_{0,1} x_{0,2} x_{0,3} \dots x_{0,n}]$$

dengan $x_{0,i} \sim N(\bar{x}_0, P_0)$.

Kemudian rata-rata nilai awal yaitu $\hat{x}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \hat{x}_{0,i}$

b. *Tahap Prediksi*

$$\hat{x}_{k,i}^- = f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}) + w_{k,i} \tag{24}$$

dengan $w_{k,i} \sim N(0, Q_k)$ yang merupakan ensemble dari noise sistem.

Rata-rata estimasi pada tahap prediksi : $\hat{x}_k^- = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \hat{x}_{k,i}^-$

Kovariansi error estimasi pada tahap prediksi : $P_k^- = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N (\hat{x}_{k,i}^- - \hat{x}_k^-) (\hat{x}_{k,i}^- - \hat{x}_k^-)^T$

c. *Tahap Koreksi*

Bangkitkan ensemble dari data pengukuran yaitu

$$z_{k,i} = z_k + v_{k,i} \tag{25}$$

dengan $v_{k,i} \sim N(0, R_k)$ merupakan sebuah ensemble dari noise pengukuran.

Kalman gain didefinisikan sebagai berikut

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- + R_k)^{-1}$$

Estimasi dari tahap koreksi yaitu

$$x_{k,i} = \hat{x}_{k,i}^- + K_k (z_{k,i} - H\hat{x}_{k,i}^-) \tag{26}$$

dan rata-rata estimasinya yaitu $\hat{x}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \hat{x}_{k,i}$ dengan kovariansi error yaitu $P_k = [1 - K_k H] P_k^-$.

d. *Subtitusikan persamaan (26) pada persamaan (24) tahap prediksi*

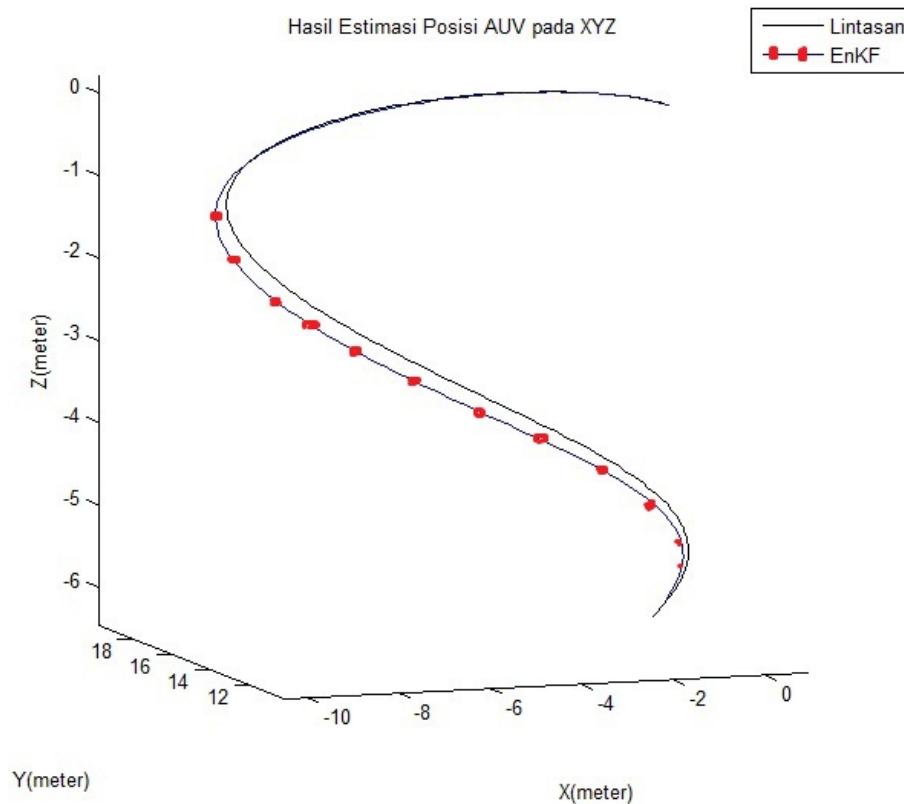
e. *Ulangi hingga diperoleh estimasi tahap koreksi pada persamaan (26).*

C. *Transformasi Linear dan Koordinat*

Sistem koordinat gerak AUV yaitu *Earth Fixed (inertial) Coordinates* dan *Body Fixed Coordinates*. Ketika dua koordinat bekerja bersama dalam gerak AUV, hal penting yang harus dilakukan adalah memperjelas hubungan transformasi antara kedua koordinat tersebut. Transformasi dari kecepatan linear dan angular dari hasil estimasi menjadi posisi dan orientasi menggunakan persamaan 1-4.

D. Hasil Simulasi

Simulasi pada penelitian ini disajikan dalam grafik 3 dimensi yang menggambarkan posisi AUV pada koordinat x,y dan z dengan model gerak AUV 6 DOF (*Degree of Freedom*). Nilai *real* dari estmasi merupakan lintasan AUV yang telah ditentukan pada 3 dimensi. Sistem pengukuran pada tiap kasus yaitu pada gerak *surge*, *sway*, *heave*, dan *yaw* dengan sudut awal yaitu $\delta_r = 5^\circ$ dan nilai perubahan waktu yaitu $\Delta t = 0.001$. Titik awal yang diberikan pada lintasan yaitu $x(0) = 0$ m, $y(0) = 0$ m dan $z(0) = 0$ m dengan kecepatan awal yaitu $u(0) = 0$ m/s, $v(0) = 0$ m/s, $w(0) = 0$ m/s, $\phi(0) = 0$ rad/s, $\theta(0) = 0$ rad/s, dan $\psi(0) = 0$ rad/s. Estimasi diambil dari rata-rata 10 kali running untuk setiap kasus pada tiap simulasi. Berikut merupakan hasil estimasi dan simulasi dengan 50, 100, 200 dan 300 ensemble.



Gambar 2 Hasil Estimasi Posisi AUV

Error dari hasil simulasi ditunjukkan melalui nilai RMSE (*Root Mean Square Error*) yang disajikan pada Tabel III. Pada tabel tersebut juga diberikan waktu komputasi dari lamanya simulasi untuk masing-masing jumlah Ensemble (En).

TABEL III
ERROR ESTIMASI POSISI AUV

No	En	Posisi x (m)	Posisi y (m)	Posisi z (m)	Sudut (rad)	Waktu (t)
1	50	0.4702	0.4674	0.0823	0.1003	2.819
2	100	0.4636	0.4666	0.0819	0.1003	5.692
3	200	0.4648	0.4657	0.0814	0.1003	11.56
4	300	0.4632	0.4644	0.082	0.1003	18.15

Error estimasi pada Tabel III dihitung berdasarkan rata-rata 10 kali running estimasi. Minimum RMSE estimasi posisi x diperoleh pada saat ensemble 300 yaitu 0,4632. Pada posisi y, minimum error estimasi juga diperoleh pada ensemble 300. Sedangkan error minimum posisi z diperoleh pada ensemble 200. Waktu komptasi paling cepat dibutuhkan pada jumlah ensemble 50, sedangkan waktu komputasi paling lama pada jumlah ensemble 300. Pada kasus ini dapat ditarik kesimpulan bahwa hasil estimasi EnKF terbaik diperoleh dengan jumlah ensemble 300 untuk posisi x dan y, ensemble 200 untuk posisi z. Dengan waktu komputasi yang dibutuhkan yaitu 18,15 s untuk ensemble 300 dan 11,57 s untuk ensemble 200. Hasil simulasi menunjukkan rata-rata error estimasi yaitu 0.4 m posisi-x, 0.46 m posisi-y, 0.08 m posisi-z dan 0.1 m error sudut. Error tersebut masih dapat ditoleransi dengan tingkat akurasi diatas 55%.

Kita tinjau grafik hasil simulasi berdasarkan hasil estimasi posisi AUV dengan bantuan program Octave. Gambar 2 merupakan hasil simulasi estimasi posisi AUV yang terdiri dari 2 perbandingan grafik yaitu nilai real (lintasan 3D) dan hasil estimasi EnKF. Lintasan 3D yang dibentuk merupakan gerak menyelam dari AUV pada kedalaman 6 m (posisi pada sumbu-z), dengan lintasan membelok pada sumbu-y sejauh 18 m dan lintasan membelok pada sumbu-x sepanjang 10 m dengan sudut awal yaitu $\delta_r = 5^\circ$. Posisi awal dari AUV terletak pada $(x, y, z) = (0,0,0)$ m. Hasil estimasi menunjukkan bahwa EnKF mampu mengestimasi posisi AUV sesuai dengan lintasan yang diberikan. Hasil estimasi di awal posisi berdasarkan Gambar. 2 menunjukkan posisi estimasi hampir berhimpitan dengan lintasan yang diberikan. Pada kedalaman 1 m, hasil estimasi dengan lintasan yang diinginkan terlihat hampir mendekati. Pada kedalaman 2 m, mulai terlihat perbedaan posisi hingga kedalaman 5 m. Di posisi akhir pada kedalaman 6 m terlihat posisi AUV antara estimasi dan lintasan hampir berhimpitan dengan selisih jarak posisi akhir yaitu 0.02 m pada posisi-x, 0.9 m posisi y dan 0.2 m pada posisi z. Semakin menuju lintasan akhir (posisi tujuan) dari AUV, estimasi posisi sedikit demi sedikit semakin mendekati lintasan tujuan. Hal ini menunjukkan bahwa EnKF mampu mengestimasi posisi AUV pada lintasan 3 dimensi dan hasil estimasi tersebut menunjukkan pula bahwa estimasi posisi AUV hampir berhimpitan dengan lintasan pada posisi awal dan posisi akhir (tujuan).

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan penjelasan dan simulasi yang dihasilkan dapat ditarik kesimpulan bahwa:

1. Ensemble Kalman Filter dapat digunakan untuk mengestimasi posisi AUV pada lintasan 3 dimensi (3D) dengan rata-rata error estimasi yaitu 0.4 m posisi-x, 0.46 m posisi-y, 0.08 m posisi-z dan 0.1 m error sudut.
2. Hasil estimasi EnKF terbaik diperoleh dengan jumlah ensemble 300 untuk posisi x dan y, ensemble 200 untuk posisi z dengan waktu komputasi yang dibutuhkan yaitu 18,15 s untuk ensemble 300 dan 11,57 s untuk ensemble 200.
3. Estimasi posisi AUV mampu menuju posisi tujuan pada kedalaman 6 m, hal ini ditunjukkan dari posisi akhir estimasi AUV yang hampir berhimpitan dengan lintasan pada posisi tujuan.
4. Semakin tinggi jumlah ensemble membutuhkan waktu komputasi yang semakin tinggi pula.

REFERENSI

- [1] Yuh, J. (1994), "Learning Control for Underwater Robotic Vehicles", IEEE Control Systems Magazine, Vol. 14 No. 2, hal. 39-46.
- [2] Von Alt, C. (2003). "Autonomous Underwater Vehicles", The Autonomous Underwater Lagrangian Platforms and Sensors Workshop, Woods Hole Oceanographic Institution, United States.

- [3] Ermayanti, Z., Apriliani, E., and Nurhadi, H. (2014) Estimate and Control Positon on The Autonomous UnderwaterVehicle Based on Determined Trajectory. Thesis of Department of Mathematics, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.
- [4] Ngatini. 2017. Ensemble and Fuzzy Kalman Filter for Position Estimation of an Autonomous Underwater Vehicle Based on Dynamical System of AUV Motion. J. Expert Systems with Applications. Vol. 68. Issue 7, pp. 29-35.
- [5] Lewis, J. M., Laksmivarahan, S. and Dhall, S. (2006), Dynamic Data Assimilation, A Least Square Approach, Cambridge University Press, New York.
- [6] Ngatini, Apriliani, E., & Nurhadi, H. (2016). The Position Estimation of AUV Based on Non-Linear Ensemble Kalman Filter. Proceeding Basic 2016, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam: 6 (hal. 382-386). Indonesia: Universitas Brawijaya. 2338-0128.
- [7] Herlambang, T., Djatmiko, E. B. And Nurhadi, H. 2015. Ensemble Kalman Filter with a Square Root Scheme (EnKF-SR) for Trajectory Estimation of AUV SEGOROGENI ITS, International Review of Mechanical Engineering (I.RE.M.E), Vol. 9, No. 6 ISSN 1970-8734.
- [8] Yang, C. (2007), Modular Modelling and Control for Autonomous Underwater Vehicle (AUV). Thesis of Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore.
- [9] Ataei, M., Koma, A. Y., 2014. Three-Dimensional Optimal Path Planning for Waypoint Guidance of an Autonomous Underwater Vehicle. J. Robotics and Autonomous Systems.
- [10] Apriliani, 2014. Metode Asimilasi Data: Salah Satu Penerapan Matematika dalam Bidang Lingkungan Hidup. Surabaya: Matematika ITS.
- [11] Apriliani, E., Arif, D. K., & Sanjoyo, B. A. (2010). The square root ensemble Kalman Filter to estimate the concentration of air pollution. Proceedings of the 2010 IEEE, international conference on mathematical application in engineering (ICMAE'10), kuala lumpur, Malaysia.
- [12] Lewis, L. F., 1986, "Optimal Estimation, with an introduction to stochastic control theory", John Wiley and Sons, New York.
- [13] Heemink, A.W., 1986, "Storm surge prediction using Kalman filtering", Thesis, Twente University, The Netherlands.
- [14] Verlaan, M., Heemink, A.W. 1997, "Tidal Flow Forecasting Using Reduced Rank Square Root Filters", Stochastic Hydrologi and Hydraulics, No.11: pp. 349-368
- [15] Apriliani, E., 2001, "The Estimation of The Water Level by The Reduced Rank Square Root Information Filter", Proceedings of the Asia – Pasific Vibration Conference, vol II, Jilin Science and Technology Press, China
- [16] Apriliani, E., Sanjoyo, B.A., Adzkiya, D., 2011a, "The Groundwater Pollution Estimation by the Ensemble Kalman Filter", Canadian Journal on Science and Engineering Mathematics, Juni, 2011
- [17] Apriliani, E. Hanafi, L., Wahyuningsih, N.,2011b, "Metode Estimasi Penyebaran Polutan", Jurnal Purifikasi, Vol 12. No 2, Desember 2011
- [18] Evensen, G. 2003. The Ensemble Kalman Filter: Theoretical Formulation and Practical Implementation. J. Ocean Dynamics. Vol.53. No.4, 343-367.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada LPPM Universitas Internasional Semen Indonesia (UISI) yang telah memberikan hibah dana penelitian pada skema HRP (Hibah Riset Pemula) tahun 2018.