

Desain Kontrol Tracking *Underactuated Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) dengan Pengaruh Gangguan Arus Laut

Tracking Control Design of Underactuated Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Under Ocean Current Disturbance Influence

Ilmi Rizki I¹, Trihastuti Agustinah²

^{1,2}Institut Teknologi Sepuluh Nopember; Kampus ITS Sukolilo, +62-82140266400
Jurusan Teknik Elektro, ITS, Surabaya
e-mail: ¹ilmirizkiimaduddin@gmail.com, ²trihastuti@ieee.org

Abstrak

Paper ini membahas masalah gerak AUV pada bidang horizontal yang dipengaruhi oleh arah sudut yaw. Arah sudut yaw merupakan ukuran utama dalam mengatur gerak horizontal pada AUV. Pengaturan gerak pada AUV berupa perubahan arah sudut yaw merupakan permasalahan kontrol tracking AUV. Kontrol tracking pada paper ini digunakan untuk kebutuhan heading control. Heading control tersebut digunakan untuk mengatur arah sudut yaw AUV agar sesuai dengan sinyal referensi yaw yang diberikan. Kompleksitas dalam mendesain heading control akibat karakteristik-karakteristik dari dinamika AUV yang high nonlinear dan uncertainty parameter yang ditentukan oleh hydrodynamic forces dan environmental forces berupa gangguan ocean current menjadi permasalahan yang tidak mudah dipecahkan. Oleh karena itu dibutuhkan sebuah metode untuk mengatasi permasalahan tersebut, yaitu penggunaan metode State Dependent Riccati Equations berdasarkan Linear Quadratic Tracking (SDRE-LQT). Algoritma ini menghitung perubahan permasalahan tracking pada sudut yaw dan dapat mengatasi gangguan ocean current melalui perhitungan perubahan parameter dari AUV secara online melalui algebraic Riccati equation. sehingga sinyal kontrol yang diberikan ke plant dapat mengikuti perubahan kondisi dari plant itu sendiri, termasuk perubahan parameter akibat gangguan berupa ocean current. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode kontrol yang digunakan mampu membawa sudut yaw pada nilai yang diharapkan dan gangguan arus dapat diatasi dengan memberikan nilai sinyal kontrol yang baru secara online, sehingga AUV dapat melakukan tracking secara otomatis pada kondisi ada atau tanpa gangguan ocean current dengan dengan nilai error steady state $e = -0.01282\%$.

Kata kunci — AUV, Tracking Control, SDRE-LQT, Ocean Current Disturbance

Abstract

This paper discusses about the problem of AUV motion in the horizontal plane that is influenced by the direction of the yaw angle. The direction of yaw angle is the main criterion to regulate horizontal motion on the AUV. The regulating motion on the AUV, which is the changing of yaw angle direction, is an issue for tracking AUV control. Tracking control in this paper is used for heading control requirement. That heading control is used to set the direction of the AUV's yaw angle in order to correspond with the given reference signal of yaw angle. The complexity to design the heading control is due to the characteristics of dynamical AUV that are highly nonlinear dynamics and uncertainty parameters which are determined by hydrodynamic forces and environmental forces such as ocean current disruption becoming a problem that is not easily solved. Hence, we need a method to overcome these problems that uses by using State Dependent Riccati method based on Linear Quadratic Equations Tracking (SDRE-LQT). This algorithm calculates the changed tracking problem on the yaw angle and can overcome the problems of ocean current by calculating the changed parameters of AUV in

online way through algebraic Riccati equation. Therefore the control signal which is given to the plant can follow the changed condition from the plant its self, including changes the changed parameters due to interference from ocean current. The simulation's result showed that the used control method is able to bring the yaw angle to the expected value and the current interference can be solved by giving new signal control value through online way, so that the AUV can track automatically in the conditions with or without ocean current interference with the error steady state value $e = -0.01282\%$.

Keywords— AUV, Tracking Control, SDRE-LQT, Ocean Current Disturbance

1. PENDAHULUAN

Perkembangan *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) sudah semakin luas fungsinya, terutama untuk tugas-tugas militer dibawah air yang berbahaya, seperti pengawasan, pencarian dan penyelamatan. Tidak hanya untuk tugas-tugas militer, AUV yang juga dapat digunakan untuk tugas-tugas ilmiah, yaitu memetakan kondisi bawah air, mendeteksi sumber daya minyak, pemeliharaan air dan inspeksi, dan *underwater surveys* [1]-[2]. Strategi kontrol *State Dependent Riccati Equation* (SDRE) telah banyak diketahui dan menjadi sangat populer dikalangan komunitas kontrol belakangan ini, penggunaan Algoritma ini sangat efektif untuk mensitesis permasalahan *nonlinear feedback control* dengan mempertimbangkan noninearitas *state* dari sistem tersebut.

Pada makalah ini, model AUV yang digunakan adalah model dengan bentuk torpedo. Model ini menggunakan lima aktuator, yaitu dua aktuator untuk *sterln*, dua aktuator untuk *rudder* dan satu aktuator berfungsi sebagai pemberi gaya dorong (*Thrust*). Meskipun AUV memiliki struktur yang sederhana, tetapi dalam mengontrol gerak dari AUV tidaklah mudah, hal itu dikarenakan AUV memiliki karakteristik nonlinear, MIMO, parameter *uncertainty* [3]-[8]. Parameter *uncertainty* pada AUV merupakan parameter pada dinamika AUV yang berubah terhadap waktu (*time varying*). Perubahan dinamika terhadap waktu tersebut dikarenakan karakteristik dari struktur desain AUV, dimana karakteristik tersebut ditentukan oleh *hydrodynamic forces* ketika AUV melewati suatu aliran *hydro* (air) dan ditambahkan dengan *environmental forces* [8]-[10]. *Environmental forces* sendiri meliputi *wind*, *wave* dan *ocean current* [8], [11]-[13]. Pada kasus *underwater vehicle*, *ocean current* yang dianggap paling berpengaruh terhadap AUV [8]-[9], [11].

Arah sudut *yaw* merupakan ukuran utama dalam mengatur gerak horizontal pada AUV, gerakan tersebut didefinisikan melalui persamaan *steering* [11]. Persamaan tersebut digunakan untuk mendefinisikan gerak horizontal 2D. Pendefinisian tersebut digunakan untuk memudahkan dalam menghitung variabel *state* apa saja yang diperlukan dalam menganalisa gerak horizontal dan diperlukan untuk kebutuhan penurunan hukum kontrol *steering* [9], [12]. Penurunan hukum kontrol *steering* tersebut digunakan untuk mendesain *heading control* pada AUV. *Heading control* tersebut digunakan untuk mengatur arah dari sudut *yaw* AUV agar sesuai dengan sinyal referensi *yaw* yang diberikan. Kompleksitas dalam mendesain *heading control* akibat karakteristik-karakteristik dari dinamika AUV menjadi permasalahan yang tidak mudah dipecahkan, sehingga menjadi tantangan para peneliti dalam mendesainnya.

Pada penelitian sebelumnya yang membahas tentang kontrol *tracking* pada bidang horizontal banyak diteliti, khususnya pada *heading control*. Penelitian yang sebelumnya membahas kontrol *tracking* pada bidang 2D adalah *backstepping control* [13], *invers*

dynamic control [14], Kontrol PID dan LQR [15] dan *State Dependent Riccati Equations* (SDRE) [16].

[13] meneliti tentang perencanaan sebuah *trajectory* dan kontrol *tracking* pada gerak AUV di bidang horizontal. Penelitian ini secara umum menitikberatkan pada bagaimana membangkitkan sinyal referensi yang layak yang akan digunakan sebagai masukan sistem kontrol gerak AUV agar dapat mengikuti *trejctory* yang diberikan. Akan tetapi, sistem kontrol yang didesain belum melibatkan bagaimana jika *environmental forces* ditambahkan pada dinamika AUV [13].

Strategi kontrol *tracking* pada bidang horizontal 2D juga diterapkan oleh [14]. Algoritma yang digunakan adalah dengan menggunakan dinamika AUV untuk membangkitkan sinyal referensi orientasi dan kecepatan dari kendaraan. Strategi kontrol *tracking* pada penelitian ini berdasarkan *inverse dynamics* dari model dinamika AUV. Namun penurunan hukum kontrol *tracking* pada penelitian ini menggunakan model linear, akan sulit jika penurunannya dilakukan dengan model nonlinear dan strategi kontrol pada penelitian ini juga tidak memperhitungkan *environmental forces* yang mempengaruhi gerak AUV.

[15] meneliti sebuah *modular modeling method* untuk sepasang *modular structured AUVs*. Metode ini membangun model dinamik AUV dari data komponen dasar atau modul. Sepanjang *basic data* masing-masing modul diketahui, model ini dapat dibangun model secara lengkap dengan menghitung koefisien berdasarkan data ini. Ketika satu modul AUV dirubah dan data modul baru telah diketahui, modul ini dapat dikombinasikan dengan modul baru dan komponen sisanya untuk membangun model dinamika baru secara cepat. Chen menguji kontrol gerak dari AUV dari 6 DOF menggunakan metode kontrol PID, *state feedback control* menggunakan metode LQR dan *feedback Linearization Control* untuk menguji *speed control*, *depth control* dan *steering control*. Hasil yang dihasilkan adalah bahwa respon dari masing-masing metode adalah *feedback Linearization Control* paling bagus dari dua metode lain yang digunakan pada pengujian *speed control*, *depth control* dan *steering control*, tetapi masih belum bisa mengatasi gaya eksternal yang berubah-ubah.

Penelitian masalah kontrol *tracking* menggunakan *state dependent riccati equations* dalam mengatasi dinamika nonlinear diterapkan dalam [16]. Penelitian ini menitik beratkan pada kasus *tracking* suatu *trajectory* pada bidang horizontal dimana permasalahan yang terjadi adalah gaya *thrust* pada dinamika AUV ini dibuat nonlinear dengan batasan tertentu. Kontrol SDRE diuji dengan *path* lingkaran. Akan tetapi pada penelitian ini tidak dimasukkan faktor *disturbance* untuk menguji kontrol SDRE [16].

Dari permasalahan yang dijelaskan sebelumnya, maka dibutuhkan sebuah metode untuk mengatasi permasalahan nonlinearitas dan *uncertainty parameter* menggunakan kontrol SDRE, namun untuk dapat diaplikasikan pada *task* berupa *geometry path*, AUV membutuhkan kontrol *tracking* agar bisa meminimalkan *cross track error*, maka kontrol *tracking* yang digunakan adalah LQT dengan struktur sistem servo 1. Dengan demikian, pada penelitian ini akan diusulkan kontrol SDRE-LQT AUV.

2. METODE PENELITIAN

Pada bab ini akan dibahas bagaimana cara perancangan dinamika AUV dalam bentuk matrik agar dapat disimulasikan menggunakan *software* matlab, perancangan dinamika AUV dengan memasukkan *ocean current* dan perancangan keseluruhan

sistem kontrol dari model nonlinear dalam bentuk matrik tersebut dan penambahan *ocean current*, dan berikut adalah persamaan umum gerak AUV 6 DOF:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) \\ + \mathbf{g}_0 \\ = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_{wind} \\ + \boldsymbol{\tau}_{wave} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Hasil dari penjabaran persamaan umum gerak 6 derajat kebebasan diatas, maka didapatkan tiga persamaan untuk gerak translasi yaitu *surge*, *sway*, *heave* dan 3 persamaan untuk gerak rotasi yaitu *roll*, *pitch*, *yaw*. Persamaan (2.3) sampai (2.8) merupakan sisi sebelah kiri persamaan (2.2).

Gerak Surge

$$\begin{aligned} X = m[\dot{u} - vr + wq \\ - x_G(q^2 + r^2) \\ + y_G(pq - \dot{r}) \\ + z_G(pr + \dot{q})] \end{aligned} \quad (2.3)$$

Gerak Sway

$$\begin{aligned} Y = m[\dot{v} - wp + ur \\ - y_G(r^2 + p^2) \\ + z_G(qr - \dot{p}) \\ + x_G(pq + \dot{r})] \end{aligned} \quad (2.4)$$

Gerak Heave

$$\begin{aligned} Z = m[\dot{w} - uq + vp \\ - z_G(p^2 + q^2) \\ + x_G(rp - \dot{q}) \\ + y_G(rp + \dot{p})] \end{aligned} \quad (2.5)$$

Gerak Roll

$$\begin{aligned} K = I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr \\ - (\dot{r} + pq)I_{xz} \\ + (r^2 - q^2)I_{yz} \\ + (pr - \dot{q})I_{xy} \\ + m[y_G(\dot{w} \\ - uq + vp) \\ - z_G(\dot{v} - wp \\ + ur)] \end{aligned} \quad (2.6)$$

Gerak Pitch

$$\begin{aligned}
 M = & I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp \quad (2.7) \\
 & - (\dot{p} + qr)I_{xy} \\
 & + (p^2 - r^2)I_{zx} \\
 & + (qp - \dot{r})I_{yz} \\
 & + m[z_G(\dot{u} - vr \\
 & + wq) - x_G(\dot{w} \\
 & - uq + vp)]
 \end{aligned}$$

Gerak Yaw

$$\begin{aligned}
 N = & I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq \quad (2.8) \\
 & - (\dot{q} + rp)I_{yz} \\
 & + (q^2 - p^2)I_{xy} \\
 & + (rq - \dot{p})I_{zx} \\
 & + m[x_G(\dot{v} \\
 & - wp + ur) \\
 & - y_G(\dot{u} - vr \\
 & + wq)]
 \end{aligned}$$

Sedangkan untuk sisi sebelah kanan persamaan (2.2) dapat dilihat pada persamaan (2.9)-(2.14):

$$\begin{aligned}
 X = & X_{HS} + X_{u|u}|u|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} \quad (2.9) \\
 & + X_{uv}uv \\
 & + X_{uw}uw \\
 & + X_{q|q}|q|q| \\
 & + X_{vr}vr \\
 & + X_{w|w}|w|w| \\
 & + X_{wq}wq \\
 & + X_{qq}qq \\
 & + X_{rr}rr \\
 & + X_{prop}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y = & Y_{HS} + Y_{v|v}|v|v| + Y_{\dot{v}}\dot{v} \quad (2.10) \\
 & + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur \\
 & + Y_{wp}wp \\
 & + Y_{pq}pq \\
 & + Y_{uv}uv \\
 & + Y_{uu}\delta_r u^2 (\delta_{r_{top}} \\
 & + \delta_{r_{bottom}})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z = & Z_{HS} + Z_{w|w}|w|w| + Z_{\dot{w}}\dot{w} \quad (2.11) \\
 & + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp \\
 & + Z_{rp}rp + Z_{uw}uw \\
 & + Z_{uu}\delta_s u^2 (\delta_{s_{right}} + \delta_{s_{left}})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
K &= K_{HS} + K_p \dot{p} + K_{uu\delta_r} (\delta_{r_{top}} \\
&+ \delta_{r_{bottom}}) + K_{uu\delta_s} (\delta_{s_{right}} \\
&+ \delta_{s_{left}}) + K_{prop}
\end{aligned} \tag{2.12}$$

$$\begin{aligned}
M &= M_{HS} + M_{\dot{w}} \dot{w} \\
&+ M_{\dot{q}} \dot{q} \\
&+ M_{uq} uq \\
&+ M_{vp} vp \\
&+ M_{uw} uw \\
&+ M_{rp} rp \\
&+ M_{uu\delta_s} u^2 \delta_s
\end{aligned} \tag{2.13}$$

$$\begin{aligned}
N &= N_{HS} + N_{uu\delta_r} u^2 \delta_r \\
&+ N_{ur} ur \\
&+ N_{uv} uv + N_{\dot{v}} \dot{v} \\
&+ N_{wp} wp \\
&+ N_{pq} pq + N_{\dot{r}} \dot{r}
\end{aligned} \tag{2.14}$$

2.1 Perancangan Dinamika AUV

Pada tahap perancangan dinamika AUV dilakukan dengan cara memodelkan persamaan (2.1) dan (2.2) dalam bentuk matrik. Pemodelan ini bertujuan untuk mengetahui dinamika AUV, sehingga dapat mempermudah dalam perancangan kontroler. Langkah pertama adalah dengan mensubstitusikan persamaan gerak pada Persamaan (2.3) sampai (2.8) dengan persamaan gaya dan momen eksternal pada Persamaan (2.9)-(2.14). selanjutnya, komponen percepatan linear dan angular serta kecepatan linear dan angular pada kerangka sumbu bumi yang dinotasikan dengan $(\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, p, \dot{q}, \dot{r}, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$ pada persamaan (2.3) sampai (2.8) dan (2.9)-(2.14), sehingga kalau dijadikan kedalam bentuk matrik dapat dilihat pada persamaan (2.15):

$$[\dot{u} \ \dot{x} \ \dot{v} \ \dot{y} \ \dot{w} \ \dot{z} \ \dot{p} \ \dot{\phi} \ \dot{q} \ \dot{\theta} \ \dot{r} \ \dot{\psi}]^T = Q_Q^{-1} P Q_{st} + Q_Q^{-1} R_b u_c \tag{2.15}$$

Dengan,

$$Q_Q = \begin{bmatrix}
a_{ud} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{qd} & 0 & a_{rd} & 0 \\
0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & c_{vd} & 0 & 0 & 0 & c_{pd} & 0 & 0 & 0 & c_{rd} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & d_{wd} & 0 & d_{pd} & 0 & d_{qd} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & f_{vd} & 0 & f_{wd} & 0 & f_{pd} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
h_{ud} & 0 & 0 & 0 & h_{wd} & 0 & 0 & 0 & h_{qd} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
j_{ud} & 0 & j_{vd} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & j_{rd} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
\end{bmatrix}$$

$$a_{ud} = m - X_{\dot{u}}, a_{qd} = mZ_G, a_{rd} = -my_G, c_{vd} = m - Y_{\dot{v}}, c_{pd} = -mZ_G$$

$$c_{rd} = mx_G - Y_{\dot{r}}, e_{wd} = m - Z_{\dot{w}}, e_{pd} = my_G, e_{qd} = -mx_G - Z_{\dot{q}},$$

$$g_{vd} = -mZ_G$$

$$g_{wd} = my_G, g_{pd} = I_{xx} - K_{\dot{p}}, i_{ud} = mZ_G, i_{wd} = -mx_G - M_{\dot{w}},$$

$$i_{qd} = I_{yy} - M_{\dot{q}}$$

$$k_{ud} = -my_G, k_{vd} = mx_G - N_{\dot{v}}, k_{rd} = I_{zz} - N_{\dot{r}}$$

Dan

$$P = \begin{bmatrix} a_u & 0 & a_v & 0 & a_w & 0 & 0 & 0 & a_q & 0 & a_r & 0 \\ b_u & 0 & b_v & 0 & b_w & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_v & 0 & 0 & 0 & c_p & 0 & c_q & 0 & c_r & 0 \\ d_u & 0 & d_v & 0 & d_w & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_w & 0 & e_p & 0 & e_q & 0 & 0 & 0 \\ f_u & 0 & f_v & 0 & f_w & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_p & 0 & g_q & 0 & g_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_p & 0 & h_q & 0 & h_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & i_w & 0 & i_p & 0 & i_q & 0 & i_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & j_q & 0 & j_r & 0 \\ 0 & 0 & k_v & 0 & 0 & 0 & k_p & 0 & k_q & 0 & k_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_q & 0 & l_r & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_b = \begin{bmatrix} X_{prop} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2Y_{uu\delta_r}u^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2Z_{uu\delta_s}u^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(K_{uu\delta_r} + K_{uu\delta_s}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{uu\delta_s}u^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_{uu\delta_r}u^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} u_c$$

$$\begin{aligned}
f_u &= -s\theta, f_v = c\theta s\phi, \\
f_w &= c\theta c\phi, g_p = \\
&-my_Gv - mz_Gw + \\
&\frac{K_{HS}}{p} + \frac{K_{prop}}{p}, g_q = \\
my_Gu, g_r &= \\
&-(I_{zz} - I_{yy})q + \\
mz_Gu, h_p &= 1, h_q = \\
s\phi t\theta, h_r &= c\phi t\theta \\
i_w &= M_{uw}uw, \\
i_p &= -(I_{xx} - I_{zz})r + \\
mx_Gv + \frac{M_{HS}}{p}M_{vp}v + \\
M_{rp}r, i_q &= -mz_Gw - \\
mx_Gu + M_{uq}u, \\
i_r &= mz_Gv, j_q = c\phi, \\
j_r &= -s\phi, k_v = N_{uv}u, \\
k_p &= mx_Gw + \\
\frac{N_{HS}}{p}N_{wp}w, k_q &= \\
-(I_{yy} - I_{xx})p + \\
my_Gw + M_{pq}p \\
k_r &= mx_Gu - \\
my_Gv + N_{ur}u, \\
l_q &= \frac{s\phi}{c\theta}, l_r = \frac{c\phi}{c\theta}
\end{aligned}$$

$$Q_{st} = \begin{bmatrix} u \\ x \\ v \\ y \\ w \\ z \\ p \\ \phi \\ q \\ \theta \\ r \\ \psi \end{bmatrix}, \quad u_c =$$

$$\begin{bmatrix} Thrust \\ \delta_r \\ \delta_s \\ D\delta_s \end{bmatrix}$$

Selanjutnya pada Persamaan (2.15) dimasukan nilai parameter dari *plant* yang di tunjukkan dalam Tabel 2.1.

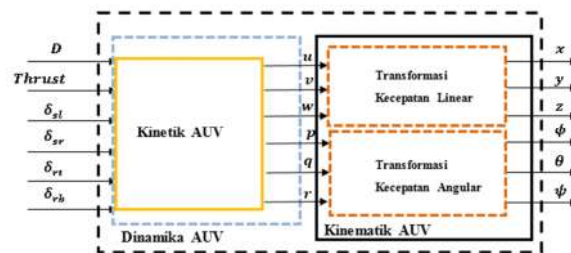
$$\begin{aligned}
a_u &= X_{u|u}|u|u| + \frac{X_{HS}}{u}, a_v = \\
X_{uv}u + X_{v|v}|v|v|, a_w &= X_{uw}u + \\
X_{w|w}|w|, a_q &= -mw + mx_Gr - \\
my_Gp + X_{wq}w + X_{qq}q \\
a_r &= mv + mx_Gr - \\
z_Gp + X_{vr}v + X_{rr}r, b_u &= c\psi c\theta, \\
b_v &= -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi, \\
b_w &= s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\
c_v &= \frac{Y_{HS}}{v} + Y_{uv}u + Y_{v|v}|v|, \\
c_p &= mw + my_Gp + mx_Gq + \\
y_{wp}w, c_q &= y_{pq}p, c_r = -mu + \\
my_Gr - mz_Gq + y_{ur}u \\
d_u &= s\psi c\theta, d_v = c\psi c\theta + \\
s\phi s\theta s\psi, d_w &= -c\psi s\phi + \\
s\theta s\psi c\phi, e_w &= \frac{Z_{HS}}{w} + Z_{uw}u + \\
Z_{w|w}|w|, e_p &= -mv + mz_Gp - \\
mx_Gr + Z_{vp}v + Z_{rp}r, e_q &= \\
mu - mz_Gq - my_Gr + Z_{uq}u
\end{aligned}$$

Tabel 2.1 Parameter *Plant* AUV.

Parameter	Simbol	Nilai	Unit
Massa	m	18.826	kg
Momen Massa	I_{xx}	0.0727	kgm^2
	$I_{yy} = I_{zz}$	1.77	kgm^2
Panjang	L	1.391	m
Radius Lambung	R	0.076	m
Jarak fin dari C_b	x_{fin}	0.537	m
Lokasi Pusat Massa	$[x_c, y_c, z_c]$	$[-0.012, 0, 0.0048]$	m

Persamaan (2.15) menghasilkan percepatan *linier* dan *angular* dari AUV ($\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$), oleh karena itu, data percepatan tersebut Selanjutnya dapat digunakan untuk mendapatkan kecepatan dari AUV (u, v, w, p, q, r). Data kecepatan AUV dapat diperoleh dengan cara mengintegrasikan Persamaan (2.15) tersebut (jika pada *real plant* data tersebut diambil dari proses estimasi nilai sensor IMU) dan data Posisi dari AUV relatif terhadap sumbu bumi ($x, y, z, \phi, \theta, \psi$) dapat diperoleh dengan cara mengintegrasikannya.

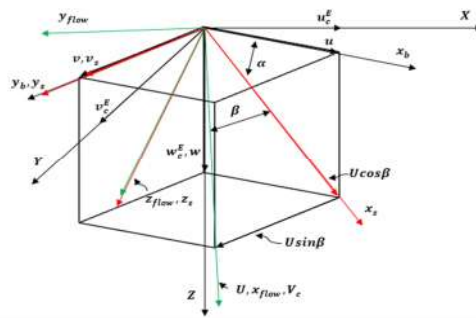
AUV yang digunakan dalam penelitian ini memiliki aktuator yang terdiri dari *propeller*, *rudder* (*top* dan *bottom*) dan *stern* (*right* dan *left*). AUV memiliki kecepatan yang tetap, sehingga nilai dari parameter *propeller thrust* (X_{prop}) dan *torque* (K_{prop}) juga bernilai tetap. Setiap pergerakan dari AUV akan menghasilkan perubahan posisi sudut *roll*, *pitch* dan *yaw*. Perubahan sudut tersebut bergantung terhadap perubahan defleksi *rudder top* (δ_{rt}), *rudder bottom* (δ_{rb}), *stern right* (δ_{sr}) dan *stern left* (δ_{sl}). Deskripsi model dinamika AUV dapat ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Dinamika Model AUV.

2.2 Perancangan Dinamika AUV dengan *Ocean Current*

Perancangan dinamika AUV dengan memasukkan *ocean current* dibutuhkan dalam merancang sistem kontrol karena mempengaruhi *state* kecepatan dari AUV. *Ocean current* sendiri merupakan gaya eksternal yang mempengaruhi AUV. Deskripsi *ocean current* pada penelitian ini digambarkan dengan pendekatan sistem koordinat *body* dari *ocean current* yang bergerak relatif terhadap sumbu bumi seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Deskripsi sumbu body AUV, stability, aliran air dan ocean current.

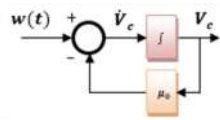
Dalam mendeskripsikan orientasi gerak sumbu *ocean current* pada gambar 2.2 dapat dihitung dengan menggunakan perhitungan transformasi sumbu *flow* air. Vektor kecepatan V_c merupakan vektor resultan *ocean current* yang terjadi di bumi akibat dari lingkungan. Pada penelitian ini, gerak vektor V_c didekati dengan persamaan differensial:

$$\dot{V}_c(t) + \mu_0 V_c(t) = w(t) \tag{2.17}$$

Sehingga persamaan (2.17) diatas menjadi :

$$\dot{V}_c(t) + \mu_0 V_c(t) = w(t) \tag{2.19}$$

persamaan differential (2.19) jika digambarkan dalam bentuk diagram blok maka seperti pada gambar (2.3):



Gambar 2.3 Diagram blok deskripsi *ocean current* melalui persamaan *differential*.

Gaya $w(t)$ yang menggerakkan vektor V_c didekati melalui *generate zero mean Gaussian white noise* dengan varian 0.5 dan konstanta μ_0 diberi nilai 0.1, serta melalui matrik transformasi *flow*, maka vektor komponen kecepatan *ocean current* u_c^E , v_c^E dan w_c^E pada gambar 2.2 dapat dihitung.

$$\begin{bmatrix} u_c^E \\ v_c^E \\ w_c^E \end{bmatrix} = R_{y,\alpha}^T R_{z,-\beta}^T \begin{bmatrix} V_c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.21}$$

Karena pada penelitian ini *ocean current* yang dimodelkan hanya 2 dimensi, maka *angle of attack* (α) dan vektor komponen w_c^E diabaikan, sehingga persamaan(2.21) menjadi:

$$u_c^E = V_c \cos(\beta_c) \tag{2.22}$$

$$v_c^E = V_c \sin(\beta_c) \tag{2.23}$$

Vektor komponen kecepatan *ocean current* u_c^E dan v_c^E pada persamaan (2.23) dan (2.24) merupakan vektor komponen kecepatan *ocean current* jika dipandang dalam sumbu bumi. Sudut beta *ocean current* (β_c) harus dinisialisasi dalam perancangan *ocean current disturbance*.

Beberapa initial pemberian sudut (β_c) yang diberikan pada penelitian ini yaitu $\beta_c = 0.78$ rad, $\beta_c = 0.26$ rad.

Agar vektor komponen *body* dari *ocean current* dapat dihitung, maka persamaan (2.23) dan (2.24) harus ditransformasi menjadi:

$$\begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ w_c \end{bmatrix} = J_1^T(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} u_c^E \\ v_c^E \\ w_c^E \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Sehingga didapatkan vektor komponen kecepatan *body* dari *ocean current* u_c , v_c dan w_c . Pada penelitian ini vektor komponen w_c diabaikan karena model *ocean current* yang digunakan hanya 2 dimensi sehingga persamaan (2.25) dapat disederhanakan menjadi:

$$\begin{bmatrix} u_c \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi & s\psi \\ -s\psi & c\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c^E \\ v_c^E \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Komponen vektor kecepatan *ocean current* pada persamaan (2.26) ini mempengaruhi *state* kecepatan dari AUV, sehingga vektor kecepatan $[u \ v]^T$ sesungguhnya adalah

$$u = u_c + u_r \ ; \ v = v_c + v_r \quad (2.26)$$

Sehingga sudut beta (β) yang terbentuk pada gambar 2.2 juga dapat dituliskan menjadi:

$$\beta = \beta_c + \beta_r \quad (2.27)$$

Sudut beta yang dideskripsikan pada gambar 2.2 adalah merupakan sudut beta yang sudah terpengaruh oleh *ocean current*. Oleh karena itu, vektor komponen kecepatan relatif dapat dihitung melalui persamaan (2.28).

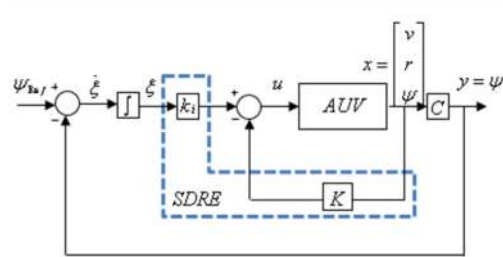
$$u_r = u - u_c \ ; \ v_r = v - v_c \quad (2.28)$$

Vektor kecepatan relatif ini, merupakan ukuran kecepatan *body* sesungguhnya yang tidak terpengaruh oleh gaya dari *ocean current*. Komponen vektor relatif ini yang digunakan dalam memodelkan dinamika AUV, sehingga model dinamika AUV yang dijelaskan pada persamaan (2.3) sampai (2.15) komponen vektor kecepatan yang mengandung u dan v diganti dengan vektor komponen kecepatan relatif u_r dan v_r .

2.3 Perancangan Kontrol SDRE

Kontroler yang digunakan dalam penelitian ini adalah *State Dependent-Linear Quadratic Tracking (SD-LQT)* yang diterapkan untuk mengendalikan sudut *yaw* dalam melaksanakan gerak *steering*. Ketika AUV melakukan gerakan *steering*, maka tidak hanya sumbu tersebut yang mengalami perubahan, namun juga menyebabkan perubahan pada sudut lainnya (*pitch* dan *roll*), dikarenakan pada *plant* ini digunakan model dengan *full state*, yaitu 12 *state* .

Kontrol yang digunakan untuk pengendalian gerak *steering* dalam penelitian ini adalah *State Dependent-Linear Quadratic Tracking (SD-LQT)*. Perancangan kontroler SDRE dapat dilihat pada Gambar (2.4). Pada perhitungan model matematis, didapatkan persamaan *state space* seperti pada Persamaan (2.15), kemudian untuk mendapatkan persamaan ($\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$), didapatkan dengan cara membagi persamaan *state* dengan koefisien dari percepatan tersebut yang mengacu pada Tabel 2.1,



Gambar 2.4 Perancangan *steering* AUV menggunakan metode SDRE.

Ketika AUV bergerak di bidang horizontal, perubahan sudut *rudder* akan menghasilkan *moment yaw* dan menghasilkan perubahan arah hadap untuk AUV. Pada kontrol *steering* dalam aplikasinya dibutuhkan tiga *state* yaitu *sway velocity* ($v(t)$), *yaw angle rate* ($r(t)$), dan *yaw angle* ($\psi(t)$). Persamaan gerak *steering* secara matematis adalah:

$$\dot{\psi} = \frac{\sin\phi}{\cos\theta} q + \frac{\cos\phi}{\cos\theta} r \quad (2.29)$$

$$m\dot{v} - mz_G\dot{p} + mx_G\dot{r} - Y_{\dot{v}}\dot{v} - Y_{\dot{r}}\dot{r} \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} &= mwp - mur + my_G r^2 \\ &+ my_G p^2 - mz_G qr - mx_G qp \\ &+ Y_{HS} + Y_{v|v}|v|v| + Y_{ur}ur \\ &+ Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv \\ &+ Y_{uu}\delta_r u^2 \delta_r \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} I_{zz}\dot{r} - mx_G\dot{v} + my_G\dot{u} - N_{\dot{v}}\dot{v} - N_{\dot{r}}\dot{r} \\ &= -I_{yy}pq \\ &+ I_{xx}pq \\ &- mx_G wp \\ &+ mx_G ur \\ &+ my_G vr \\ &- my_G wq \\ &+ N_{HS} + N_{ur}ur \\ &+ N_{wp}wp \\ &+ N_{pq}pq \\ &+ N_{uv}uv \\ &+ N_{uu}\delta_r u^2 \delta_r \end{aligned}$$

Dari persamaan gerak pada bidang horizontal diatas, maka dalam mendesain kontrol SDRE-LQT, persamaan (2.29)-(2.31) harus dirubah kedalam bentuk matrik dan dicari parametrisasi koefisien terhadap masing-masing *state* yang berhubungan, sehingga dapat diturunkan huklum kontrol SDRE-LQT berdasarkan keadaan *plant* pada persamaan (2.33) secara *online*.

Desain kontrol SDRE-LQT berdasarkan struktur sistem servo 1, dari persamaan dinamika AUV diatas, maka harus dilakukan proses linearisasi menggunakan matriks Jacobi. Dalam desain kontrol SDRE-LQT menggunakan sistem servo 1, maka harus dibuat *state augmented*, sehingga gambar 2.4 dalam bentuk *closed loop* dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan *state augmented* adalah

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{x}_{st}(\infty) \\ \dot{\xi}(\infty) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} & (2.32) \\
 &+ \begin{bmatrix} x_{st}(\infty) \\ \xi(\infty) \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} u_{cc}(\infty) \\
 &+ \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(\infty) \\
 \begin{bmatrix} \dot{x}_{st}(\infty) \\ \dot{\xi}(\infty) \end{bmatrix} &= \tilde{x}_{st}, \quad \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} = \\
 \tilde{\mathbf{A}} \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} &= \tilde{\mathbf{B}} \\
 \begin{bmatrix} \dot{x}_{st}(\infty) \\ \dot{\xi}(\infty) \end{bmatrix} &= \tilde{x}_{st}, \quad \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} = \\
 \tilde{\mathbf{A}} \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} &= \tilde{\mathbf{B}}
 \end{aligned}$$

Sehingga persamaan (2.32) menjadi:

$$\tilde{x}_{st} = \tilde{\mathbf{A}}(\tilde{x}_{st})\tilde{x}_{st} + \tilde{\mathbf{B}}(\tilde{x}_{st})u_{cc} \quad (2.33)$$

Setelah kita mendapatkan nilai matrik $\tilde{\mathbf{A}}(\tilde{x}_{st})$ dan $\tilde{\mathbf{B}}(\tilde{x}_{st})$, maka langkah selanjutnya yaitu menentukan matrik pembobot \mathbf{Q} dan \mathbf{R} yang tepat guna mendapatkan *gain feedback* dan sinyal kontrol yang tepat. Pemilihan Matrik \mathbf{Q} dan \mathbf{R} berfungsi untuk meminimumkan Indeks Performansi, seperti pada Persamaan (2.34).

$$\begin{aligned}
 J & & (2.34) \\
 &= \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (\tilde{x}_{st}^T \mathbf{Q}(\tilde{x}_{st})\tilde{x}_{st} \\
 &+ u_{cc}^T \mathbf{R}(\tilde{x}_{st})u_{cc}) dt
 \end{aligned}$$

Kemudian dengan matrik \mathbf{Q} dan \mathbf{R} , langkah berikutnya yaitu menyelesaikan persamaan SDRE yang ditunjukkan pada Persamaan(2.35).

$$\begin{aligned}
 &\tilde{\mathbf{A}}^T(\tilde{x}_{st}) \mathbf{P}(\tilde{x}_{st}) & (2.35) \\
 &+ \mathbf{P}(\tilde{x}_{st}) \tilde{\mathbf{A}}(\tilde{x}_{st}) \\
 &- \mathbf{P}(\tilde{x}_{st}) \tilde{\mathbf{B}}(\tilde{x}_{st}) \mathbf{R}^{-1}(\tilde{x}_{st}) \tilde{\mathbf{B}}^T(\tilde{x}_{st}) \\
 &+ \mathbf{Q}^T(\tilde{x}_{st}) \mathbf{Q}(\tilde{x}_{st}) = 0
 \end{aligned}$$

Penyelesaian ini digunakan untuk memperoleh matriks *Riccati* $\mathbf{P}(x_{st})$ dengan bantuan matriks $\tilde{\mathbf{A}}(\tilde{x}_{st})$, $\tilde{\mathbf{B}}(\tilde{x}_{st})$, dan matriks pembobot \mathbf{Q} dan \mathbf{R} , sehingga penghitungan *gain feedback* dan sinyal kontrol pada Persamaan (2.36) dan (2.37) dapat dilakukan.

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1}(\tilde{x}_{st})\tilde{\mathbf{B}}^T(x)\mathbf{P}(\tilde{x}_{st}) \quad (2.36)$$

$$u_{cc} = -k_s x_{st} + k_i \xi \quad (2.37)$$

Dalam penelitian ini, untuk pemilihan matriks pembobot, dilakukan melalui proses *trial and error* dengan mempertimbangkan pedoman yang ada dan dipilih nilai matriks Q dan R sebesar:

$$Q = \begin{bmatrix} 27 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 27 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 29.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 28 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

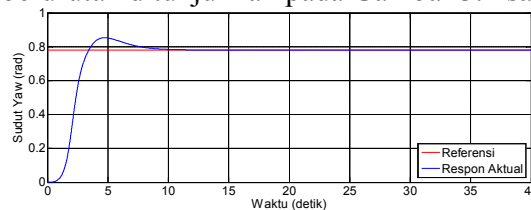
$$R = 29.5 \quad (2.39)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini akan dibahas tentang hasil yang didapatkan dengan pengujian respon *step* sistem. Tujuan pengujian respon *step* adalah untuk mengetahui ukuran kualitas sistem. Pengujian dilakukan dengan memberikan sinyal referensi berupa sinyal *step*. Pemberian sinyal referensi *step* pada penelitian ini menggunakan nilai dari defleksi rudder maksimal yaitu 0.78 rad. Dilakukan tiga pengujian respon *step* sistem, yang pertama respon *step* sistem dengan SDRE-LQT tanpa gangguan eksternal, yang kedua respon *step* sistem dengan SDRE-LQT saat terdapat gangguan eksternal dengan nilai $\beta_c = 0.78$ dan ketiga pengujian dengan respon *step* saat terdapat gangguan eksternal dengan nilai $\beta_c = 0.26$.

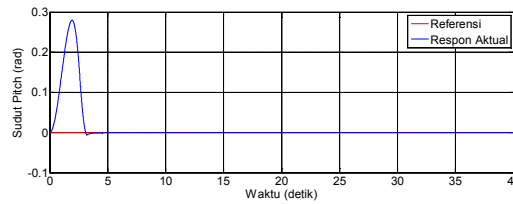
3.1 Respon Step Sistem dengan Kontrol SDRE-LQT Tanpa Gangguan Eksternal

Perilaku sudut *yaw* dengan referensi 0.78 rad, *pitch* dan *roll* untuk respon *step* tanpa gangguan eksternal secara berurutan ditunjukkan pada Gambar 3.1 sampai Gambar 3.3.



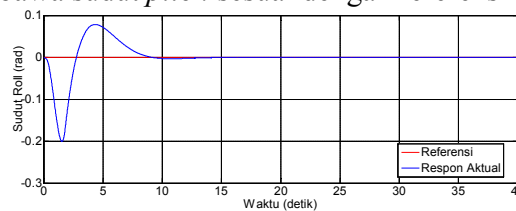
Gambar 3.1 Reson *step* sudut *yaw* tanpa gangguan eksternal.

Respon *step* sudut *yaw* tanpa gangguan eksternal ditunjukkan pada Gambar 3.1. Hal ini ditunjukkan dengan nilai *time constant* sebesar $\tau = 1.9904$ detik. Respon sistem juga tidak terlalu terlambat terhadap masukannya, hanya ada *delay* sekitar $t_d = 1.3793$ detik. Respon sistem telah muncul secara utuh dalam selang waktu sekitar $t_r = 5.860$ detik. Cukup butuh waktu yang tidak terlalu lama agar respon berada di sekitar nilai *steady state*, yaitu $t_s = 5.9703$ detik. Akan tetapi terdapat *overshoot* pada kondisi transien, dengan nilai maksimum *overshoot* sebesar $M_p = 9.35\%$. Selain itu, sistem kontrol yang didesain juga mampu membawa keluaran sistem sesuai dengan referensinya, yaitu 0.78 rad dengan nilai *error steady state* $e = -0.01282\%$.



Gambar 3.2 Respon *step* sudut *pitch* tanpa gangguan eksternal.

Gambar 3.2 menunjukkan respon *step* sudut *pitch* tanpa gangguan eksternal, respon ini muncul dengan melakukan pengujian gerakan maju dari AUV dan sudut *yaw* diarahkan 0.78 rad. Dapat dilihat bahwa $t_p = 1.914$ detik dan $M_p = 27.97\%$. Selain itu, sistem kontrol yang didesain juga mampu membawa sudut *pitch* sesuai dengan referensinya, yaitu 0 radian.

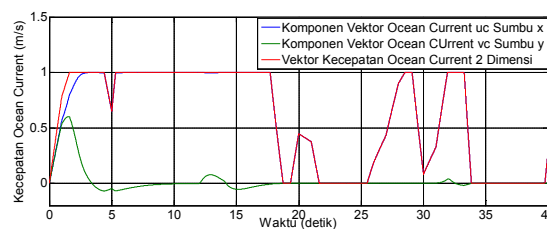


Gambar 3.3 Respon *step* sudut *roll* tanpa gangguan eksternal.

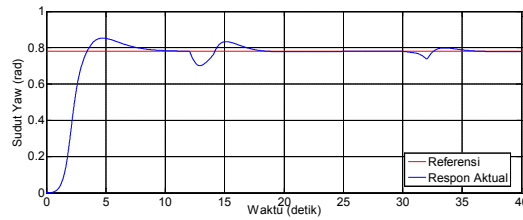
Sedangkan respon *step* untuk sudut *roll* tanpa gangguan eksternal ditunjukkan pada Gambar 3.3. Terlihat dengan jelas bahwa sistem kontrol yang didesain mampu menstabilkan sudut *roll*, yaitu dengan ditunjukkannya respon sudut *roll* berada disekitar nilai 0 radian. Deviasi sudut *roll* yang terjadi diawal, dikarenakan efek perubahan sudut *yaw* dan *pitch* pada saat AUV mulai bergerak maju.

3.2 Respon *Step* Sistem dengan Kontrol SDRE-LQT dengan Gangguan Eksternal $\beta_c = 0.78$

Pengujian Respon *step* terhadap sudut *yaw* saat terdapat gangguan eksternal *ocean current* $\beta_c = 0.78$. *Ocean current* yang diberikan pada gambar 3.4 merupakan komponen vektor kecepatan arus laut sumbu *x* dan *y* yaitu u_c, v_c masing-masing dan vektor kecepataannya $-1 < V_c < 1$ m/s. Pada pengujian ini diberikan gangguan *ocean current* pada $12 < t < 14$ dan $30 < t < 32$.

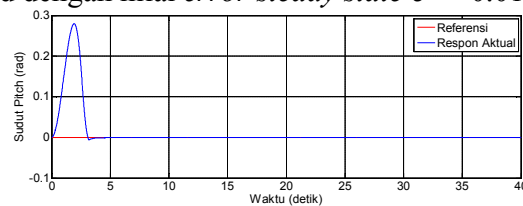


Gambar 3.4 *Ocean Current* 2 Dimensi dengan $\beta_c = 0.78$.



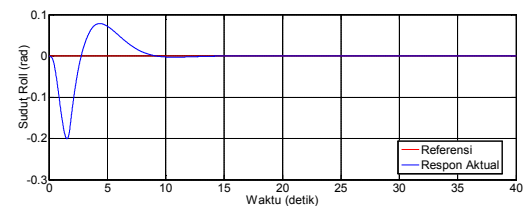
Gambar 3.5 Reson *step* sudut *yaw* dengan gangguan eksternal.

Respon *step* sudut *yaw* dengan gangguan eksternal ditunjukkan pada Gambar 3.5. Hal ini ditunjukkan dengan nilai *time constant* sebesar $\tau = 1.9904$ detik. Respon sistem juga tidak terlalu terlambat terhadap masukannya, hanya ada *delay* sekitar $t_d = 1.3793$ detik. Respon sistem telah muncul secara utuh dalam selang waktu sekitar $t_r = 5.860$ detik. Cukup butuh waktu yang tidak terlalu lama agar respon berada di sekitar nilai *steady state*, yaitu $t_s = 5.9703$ detik. Akan tetapi terdapat *overshoot* pada kondisi transien, dengan nilai maksimum *overshoot* sebesar $M_p = 9.35\%$. Selain itu, sistem kontrol yang didesain juga mampu membawa keluaran sistem sesuai dengan referensinya walaupun terkena gangguan pada interval waktu $12 < t < 14$ dan $30 < t < 32$, yaitu 0.78 rad dengan nilai *error steady state* $e = -0.01282\%$.



Gambar 3.6 Respon *step* sudut *pitch* dengan gangguan eksternal.

Gambar 3.6 menunjukkan respon *step* sudut *pitch* tanpa gangguan eksternal. Dapat dilihat bahwa $t_p = 1.914$ detik dan $M_p = 27.97\%$. Selain itu, sistem kontrol yang didesain juga mampu membawa sudut *pitch* sesuai dengan referensinya, yaitu 0 radian.

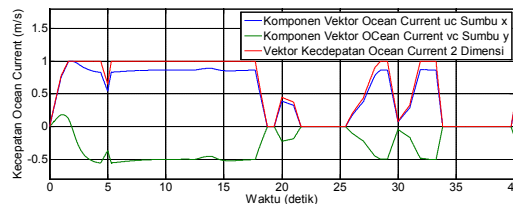


Gambar 3.7 Respon *step* sudut *roll* dengan gangguan eksternal.

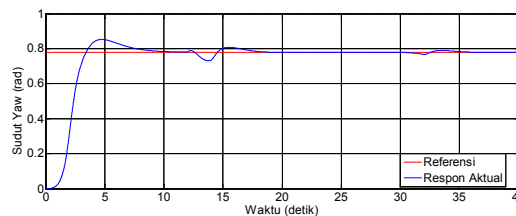
Sedangkan respon *step* untuk sudut *roll* dengan gangguan eksternal ditunjukkan pada Gambar 3.7. Terlihat dengan jelas bahwa sistem kontrol yang didesain mampu menstabilkan sudut *roll*, yaitu dengan ditunjukkannya respon sudut *roll* berada disekitar nilai 0 radian. Deviasi sudut *roll* yang terjadi diawal, dikarenakan efek perubahan sudut *yaw* dan *pitch* pada saat AUV mulai bergerak maju.

3.3 Respon *Step* Sistem dengan Kontrol SDRE-LQT dengan Gangguan Eksternal $\beta_c = 0.36$

Pengujian Respon *step* terhadap sudut *yaw* saat terdapat gangguan eksternal *ocean current* $\beta_c = 0.26$. *Ocean current* yang diberikan pada gambar 4.12 merupakan komponen vektor kecepatan arus laut sumbu *x* dan *y* yaitu u_c, v_c masing-masing dan vektor kecepataannya $-1 < V_c < 1 \text{ m/s}$. Pada pengujian ini diberikan gangguan *ocean current* pada $12 < t < 14$ dan $30 < t < 32$.

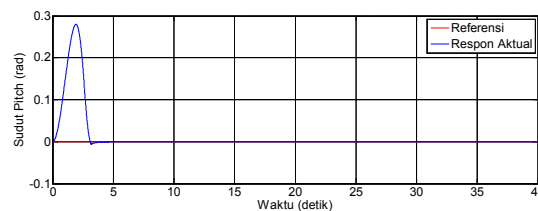


Gambar 3.8 *Ocean Current* 2 Dimensi dengan $\beta_c = 0.26$.



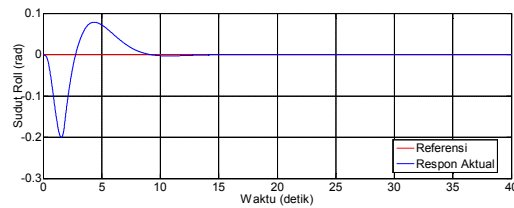
Gambar 3.9 Reson *step* sudut *yaw* dengan gangguan eksternal.

Respon *step* sudut *yaw* dengan gangguan eksternal ditunjukkan pada Gambar 3.9. Hal ini ditunjukkan dengan nilai *time constant* sebesar $\tau = 1.9904$ detik. Respon sistem juga tidak terlalu terlambat terhadap masukannya, hanya ada *delay* sekitar $t_d = 1.3793$ detik. Respon sistem telah muncul secara utuh dalam selang waktu sekitar $t_r = 5.860$ detik. Cukup butuh waktu yang tidak terlalu lama agar respon berada di sekitar nilai *steady state*, yaitu $t_s = 5.9703$ detik. Akan tetapi terdapat *overshoot* pada kondisi transien, dengan nilai maksimum *overshoot* sebesar $M_p = 9.35\%$. Selain itu, sistem kontrol yang didesain juga mampu membawa keluaran sistem sesuai dengan referensinya walaupun terkena gangguan pada interval waktu $12 < t < 14$ dan $30 < t < 32$, yaitu 0.78 rad dengan nilai *error steady state* $e = -0.012\%$.



Gambar 3.10 Respon *step* sudut *pitch* dengan gangguan eksternal.

Gambar 3.10 menunjukkan respon *step* sudut *pitch* tanpa gangguan eksternal. Dapat dilihat bahwa $t_p = 1.914$ detik dan $M_p = 27.97\%$. Selain itu, sistem kontrol yang didesain juga mampu membawa sudut *pitch* sesuai dengan referensinya, yaitu 0 radian.



Gambar 3.11 Respon step sudut roll dengan gangguan eksternal.

Sedangkan respon step untuk sudut *roll* dengan gangguan eksternal ditunjukkan pada Gambar 3.11. Terlihat dengan jelas bahwa sistem kontrol yang didesain mampu menstabilkan sudut *roll*, yaitu dengan ditunjukkannya respon sudut *roll* berada disekitar nilai 0 radian. Deviasi sudut *roll* yang terjadi diawal, dikarenakan efek perubahan sudut *yaw* dan *pitch* pada saat AUV mulai bergerak maju.

4. KESIMPULAN

Metode kontrol SDRE-LQT bekerja dengan cukup baik ketika ada maupun tidak ada gangguan eksternal berupa *ocean current* (β_c) yang menyebabkan timbulnya *overshoot* dan *undershoot*, dimana kontroler SDRE-LQT mampu mengendalikan sudut *yaw* AUV sesuai dengan perubahan sinyal referensi yang diberikan dengan *error steady state* kecil, yaitu $e = -0.01282\%$.

5. SARAN

Saran untuk penelitian selanjutnya dapat membahas kontrol orientasi sudut *yaw* dengan mempertimbangkan orientasi sudut *roll* dalam membantu gerak AUV dalam melakukan *steering*, kontrol kecepatan dalam melakukan *maneuver*, dan penambahan desain *observer* untuk mengestimasi seluruh *state* agar mendekati dengan kondisi *real* serta desain *observer* untuk mengatasi *ocean current* 3 dimensi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bjarni Helgason. (2012), *Low Speed Modeling and Simulation of Gavia AUV*, Research thesis, University of Reykjavik, Iceland.
- [2] Jon Erling G. R. (2007), *Nonlinear Model-Based Control of Slender Body AUVs*, Thesis for the degree of philosophiae doctor, Norwegian University of Science and Technology Faculty of Engineering Science and Technology, Department of Marine Technology, Norway.
- [3] O. YILDIZ, Gokalp, dan A. E., Yilmaz dkk. (2009), " State of the Art System Solutions for Unmanned Underwater Vehicles ", *Radio Engineering*, Vol. 18, No. 4.

-
- [4] J. Yuh. (2000), " Design and Control of Autonomous Underwater Robots : A Survey ", *Autonomous Robots*, Vol.8, hsl. 7-24 .
- [5] Fossen, T. I. (2011), *Handbook of Marine Craft Hydrodynamic and Motion Control* , 1st, John Wiley and Sons Ltd., Trondheim, Norway.
- [6] J. Yuh (1994), " Learning Control for Underwater Robotic Vehicles ", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, University of Hawaii, Honolulu.
- [7] Xinqian B, Ying Qu, Zheping Yan, Wei Zhang. (2010), " Nonlinear Feedback Control for Trajectory Tracking of an Unmanned Underwater Vehicle ", *Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Information and Automation*, University of Harbin, Harbin.
- [8] Sutarto, H., Y., Budiyo, A. (2011), " Development of Linear Parameter Varying Control System for Autonomous Underwater Vehicle ", *Geo Marine Sciences*, Vol. 40, No. 2, hal. 275-286.
- [9] Fossen, T. I. (2011), *Handbook of Marine Craft Hydrodynamic and Motion Control* , 1st, John Wiley and Sons Ltd., Trondheim, Norway.
- [10] Yang Chen. (2007), *Modular Modeling and Control for Autonomous Underwater Vehicle (AUV)*, A Thesis Submitted for The Degree of Master of Engineering, National University of Singapore.
- [11] Fossen, T. I. (1994), *Guidance and Control of Ocean Vehicles* , John Wiley and Sons Ltd., Chichester.
- [12] Fossen, T. I. (2002), *Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Trondheim, Norway.
- [13] Filoktimon R., Evangelos P. (2007), " Planar Trajectory Planning and Tracking Control Design for Underactuated AUVs ", *Ocean Engineering*, Vol.34, hal. 1650-1667.
- [14] Subudhi, B., Atta, D. (2009), " Design of Path Following Controller for an Underactuated AUV ", dalam *Archives of Control Sciences*, Vol. 19, No. 3, hal. 245-259.
- [15] Yang Chen. (2007), *Modular Modeling and Control for Autonomous Underwater Vehicle (AUV)*, A Thesis Submitted for The Degree of Master of Engineering, National University of Singapore.
- [16] Geranmehr, B., Nekko, S., R. (2014), " State Dependent Set Point Regulation and Tracking Control of Horizontal Motion of AUV ", dalam *International Conference on Robotics and Mechatronics*, Tehran, Iran.