

YAYASAN NURUL JADID PAITON  
**LEMBAGA PENERBITAN, PENELITIAN, &  
PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT  
UNIVERSITAS NURUL JADID  
PROBOLINGGO JAWA TIMUR**

PP. Nurul Jadid  
Karanganyar Paiton  
Probolinggo 67291  
☎ 0888-3077-077  
e: [lp3m@unuja.ac.id](mailto:lp3m@unuja.ac.id)  
w: <https://lp3m.unuja.ac.id>

**SURAT KETERANGAN**

Nomor : NJ-To6/0317/A.03/LP3M/02.2021

Lembaga Penerbitan, Penelitian, dan Pengabdian Masyarakat (LP3M) Universitas Nurul Jadid Probolinggo menerangkan bahwa artikel/karya tulis dengan identitas berikut ini:

Judul : *Desain Kontrol Tracking Sudut Yaw Pada Auv Menggunakan State Dependent Riccati Equations (SDRE)-Lqt*  
Penulis : MUHAMMAD HASAN BASRI, S.T., M.Si.  
Identitas : Jurnal Sains dan Informatika (JSI), Vol. V, No.2, Desember 2019,  
E-ISSN : 2598-6841, Politeknik Negeri Tanah Laut  
No. Pemeriksaan : 012025

Telah selesai dilakukan *similarity check* dengan menggunakan perangkat lunak **Turnitin** pada 25 September 2019 dengan hasil sebagai berikut: Tingkat kesamaan diseluruh artikel (*Similarity Index*) adalah 9 % dengan publikasi yang telah diterbitkan oleh penulis pada Jurnal Sains dan Informatika (JSI) (<https://jsi.politala.ac.id/index.php/JSI/article/view/179>)

Demikian Surat Keterangan ini dibuat untuk digunakan sebagaimana mestinya.

Probolinggo, 02 Februari 2021

Kepala LP3M,



**ACHMAD FAWAID, M.A., M.A.**

NIDN. 2123098702

# Desain Kontrol Tracking Sudut Yaw Pada AUV Menggunakan State Dependent Riccati Equations (SDRE)-LQT

*by* M. Hasan Baseri

---

**Submission date:** 25-Sep-2019 08:11PM (UTC-0700)

**Submission ID:** 1180250707

**File name:** AUV\_Menggunakan\_State\_Dependent\_Riccati\_Equations\_SDRE\_-LQT.docx (147.08K)

**Word count:** 1794

**Character count:** 13027

# Desain Kontrol Tracking Sudut Yaw Pada AUV Menggunakan *State Dependent Riccati Equations* (SDRE)-LQT

Muhammad Hasan Basri

## Abstrak

1 Dalam merealisasikan permasalahan control tracking sudut yaw pada AUV, penggunaan metode *State Dependent Riccati Equations* berdasarkan *Linear Quadratic Tracking* (SDRE-LQT) direalisasikan. Algoritma ini menghitung perubahan permasalahan tracking sudut yaw melalui perhitungan perubahan parameter dari AUV secara online dengan *Algebraic Riccati Equations*. Sehingga sinyal kontrol yang diberikan ke plant dapat mengikuti perubahan kondisi dari plant itu sendiri.

**Kata kunci:** AUV, Tracking Control, SDRE-LQT

## Abstract

1 In realizing yaw angle control tracking on AUV, the use of the *State Dependent Riccati Equations* method based on *Linear Quadratic Tracking* (SDRE-LQT) is realized. This algorithm calculates changes in yaw angle tracking problems through calculation of parameter changes from online AUV with *Algebraic Riccati Equations*. So that the control signal given to the plant can follow the changing conditions of the plant itself.

**Keywords:** AUV, Tracking Control, SDRE-LQT

## 1. PENDAHULUAN

Perkembangan *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) sudah semakin luas fungsinya, terutama untuk tugas-tugas militer di bawah 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 control *State Dependent Riccati Equation* (SDRE) telah banyak diketahui dan menjadi sangat populer dikalangan komunitas control belakangan ini, penggunaan Algoritma ini sangat efektif untuk mendeteksi permasalahan *non linear feed back control* dengan mempertimbangkan non linearitas state dari sistem tersebut.

Pada penulisan 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 *non linear*, MIMO, parameter *uncertainty* [3], [4], [5], [6], [7], [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) [8], [9], [10].

Arah sudut yaw merupakan ukuran utama dalam mengatur gerak horizontal pada AUV, gerakan tersebut didefinisikan melalui persamaan *steering* [9]. 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], [10], [11]. Penurunan hukum kontrol *steering* tersebut digunakan untuk mendesain *tracking control* sudut yaw pada AUV. *tracking control* pada sudut yaw tersebut digunakan untuk mengatur arah

dari sudut *yaw* AUV agar sesuai dengan sinyal referensi *yaw* yang diberikan. Kompleksitas dalam mendesain *tracking control* sudut *yaw* akibat karakteristik-karakteristik dari dinamika AUV menjadi permasalahan yang tidak mudah dipecahkan, sehingga menjadi tantangan para peneliti dalam mendesainnya.

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 pada subsistem GNC pada AUV.

## 2. METODE PENELITIAN

Perancangan dinamika AUV di transformasikan dalam bentuk matrik agar dapat di simulasikan menggunakan *software* matlab, perancangan dinamika AUV dan perancangan keseluruhan sistem control dari model *nonlinear* dalam bentuk matrik, yaitu:

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

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) + g_0 = \tau + \tau_{win} + \tau_{wave} \quad (2.2)$$

Ha<sup>5</sup> dari penjabaran persamaan umum gerak 6 derajat kebebasan diatas, maka didapatkan 3 persamaan untuk gerak horizontal yaitu *surge*, *sway* dan *yaw*.

### Gerak Surge

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

### Gerak Sway

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

### Gerak Yaw

$$Z = m[\dot{r} - rp + uq - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(pq + \dot{r})] \quad (2.5)$$

Sedangkan untuk sisi sebelah kanan persamaan (2.2) dapat dilihat pada persamaan (2.6) – (2.8):

### Gerak Surge

$$X = X_{HS} + X_{u|u}|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{uv}u\dot{v} + X_{uw}u\dot{w} + X_{q|q}|q| + X_{vr}vr + X_{w|w}|w| + X_{wq}w\dot{q} + X_{qq}q\dot{q} + X_{rr}r\dot{r} + X_{prop} \quad (2.6)$$

### Gerak Sway

$$Y = Y_{HS} + Y_{v|v}|v| + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_r\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + Y_{uu}\delta_r u^2 (\delta_{r_{top}} + \delta_{r_{bottom}}) \quad (2.7)$$

### Gerak Yaw

$$Z = N_{HS} + N_{uu}\delta_s u^2 \delta_s + N_{ur}ur + N_{uv}uv + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{\dot{r}}\dot{r} \quad (2.8)$$

## 2.1 Perancangan Dinamika AUV

Pada tahap perancangan dinamika AUV dilakukan dengan cara memodelkan persamaan (2.1) dan (2.2) dalam bentuk matrik. Permodelan ini bertujuan untuk mengetahui dinamika

AUV, sehingga dapat mempermudah dalam perancangan kontroler. Langkah pertama adalah dengan mensubstitusikan persamaan gerak pada persamaan (2.3) sampai (2.5) dengan persamaan gaya dan momen eksternal pada persamaan (2.6) sampai (2.8). Selanjutnya, komponen percepatan linear dan angular serta kecepatan linear dan angular pada kerangka sumbu bumi yang dinotasikan dengan  $(\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$  pada persamaan (2.3) sampai (2.5) dan (2.6) sampai (2.8), sehingga jika disubstitusi dapat dilihat pada persamaan (2.9) – (2.11), yaitu :

$$(m - X_{\dot{u}})\dot{u} - m y_G \dot{r} + m z_G \dot{q} = -m[-vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G pq + z_G pr] + X_{HS} + X_{u|u}|u| + X_{uv}uv + X_{uw}uw + X_{v|v}|v| + X_{vr}vr + X_{w|w}|w| + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{rr}rr + X_{prop} \quad (2.9)$$

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - m z_G \dot{p} + (m x_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} = -m[-vp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G qr + x_G qp] + Y_{HS} + Y_{uu}\delta_r u^2 (\delta_{r_{top}} + \delta_{r_{bottom}}) + Y_{ur}ur + Y_{uv}uv + Y_{v|v}|v| + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq \quad (2.10)$$

$$(I_{zz} - N_{\dot{r}})\dot{r} - m y_G \dot{u} + (m x_G - N_{\dot{v}})\dot{v} = -(I_{yy} - I_{xx})pq + m[x_G(-wp + ur) - y_G(-vr + wq)] + N_{HS} + N_{uu}\delta_s u^2 \delta_s + N_{ur}ur + N_{uv}uv + N_{wp}wp + N_{pq}pq \quad (2.11)$$

Persamaan kinematik gerak AUV dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\dot{x} = c\psi c\theta u - s\psi c\phi v + c\psi s\theta s\phi v + s\psi s\phi w + c\psi c\phi s\theta w \quad (2.12)$$

$$\dot{y} = s\psi c\theta u + s\psi c\phi v + s\phi s\theta s\psi v - c\psi s\phi w + s\theta c\psi s\phi w \quad (2.13)$$

$$\dot{\psi} = c\phi q - s\phi r \quad (2.14)$$

Sehingga *surge*, *sway*, dan *yaw* dapat dinyatakan dalam persamaan (2.15).

$$\begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & m x_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -m x_G - N_{\dot{v}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + [B][\delta_r] \quad (2.15)$$

Selanjutnya pada persamaan (2.15) dimasukkan nilai parameter dari *plant* yang ditunjukkan dalam table 2.1.

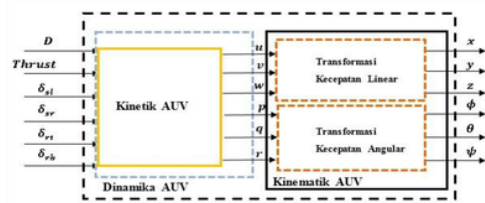
Parameter	Simbol	Nil	
Mass	M	18.826	kg
Momen Massa	I	0.0727	kg m <sup>2</sup>
	I <sub>yy</sub>	1.	kg m <sup>2</sup>
Panjang	L	1.3	M
Radius	R	0.0	M
Jarak fin dari	x <sub>fin</sub>	0.5	M
Lokasi Pusat Massa	[x <sub>G</sub> , y <sub>G</sub> , z <sub>G</sub> ]	[-0.012, 0, 0.0048]	m

Table 2.1 Parameter *Plant* AUV

Persamaan (2.15) menghasilkan percepatan linear dan angular dari AUV  $(\dot{u}, \dot{v}, \dot{r})$ , oleh karena itu, data percepatan tersebut. Selanjutnya dapat digunakan untuk mendapatkan kecepatan dari AUV  $(u, v, r)$ . 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 relative terhadap sumbu bumi  $(x, y, \psi)$  dapat diperoleh dengan cara mengintegrasikannya.

AUV yang digunakan dalam penelitian ini memiliki actuator yang terdiri dari *propeller*, *rudder (top dan botton)* 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* ( $\delta_{rt}$ ), *rudder bottom* ( $\delta_{rb}$ ), *steright* ( $\delta_{sr}$ ), dan *sternleft* ( $\delta_{st}$ ). Deskripsi model dinamika AUV dapat ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Dinamika Model AUV

## 2.2 Perancangan Sistem Kontrol

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*.

Kontroler yang digunakan untuk pengendalian gerak *steering* dalam penelitian ini adalah *State Dependent-Linear Quadratic Tracking* (SD-LQT). Perancangan kontroler SDRE dapat dilihat pada Gambar (2.2). Pada perhitungan model matematis, didapatkan persamaan *state space* seperti pada Persamaan (2.16), kemudian untuk mendapatkan persamaan ( $\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}$ ), didapatkan dengan cara membagi persamaan *state* dengan koefisien dari percepatan tersebut yang mengacu pada Tabel (2.1), maka didapatkan Persamaan (2.36) sampai dengan Persamaan(2.41) berikut:

$$\dot{u} = \frac{b_{11} \cdot u + b_{12} \cdot v + b_{13} \cdot w + b_{14} \cdot p + b_{15} \cdot q + b_{16} \cdot c + c_1}{a_{11} + a_{15} + a_{16}} \quad (2.18)$$

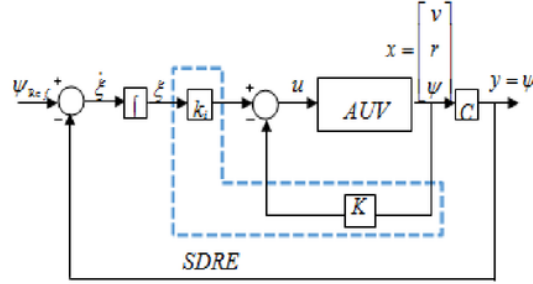
$$\dot{v} = \frac{b_{21} \cdot u + b_{22} \cdot v + b_{23} \cdot w + b_{24} \cdot p + b_{25} \cdot q + b_{26} \cdot c + c_2}{a_{22} + a_{24} + a_{26}} \quad (2.19)$$

$$\dot{w} = \frac{b_{31} \cdot u + b_{32} \cdot v + b_{33} \cdot w + b_{34} \cdot p + b_{35} \cdot q + c_3}{a_{33} + a_{34} + a_{35}} \quad (2.20)$$

$$\dot{p} = \frac{b_{41} \cdot u + b_{42} \cdot v + b_{43} \cdot w + b_{45} \cdot q + c_4}{a_{42} + a_{43} + a_{44}} \quad (2.21)$$

$$\dot{q} = \frac{b_{51} \cdot u + b_{52} \cdot v + b_{53} \cdot w + b_{54} \cdot q + c_5}{a_{51} + a_{53} + a_{55}} \quad (2.22)$$

$$\dot{r} = \frac{b_{61} \cdot u + b_{62} \cdot v + b_{63} \cdot w + b_{64} \cdot q + c_6}{a_{61} + a_{62} + a_{66}} \quad (2.23)$$



Gambar 2.2 Perancangan steering AUV (Inner Loop Control) 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 :

$$\dot{\psi} = \frac{\sin \phi}{\cos \theta} q + \frac{\cos \phi}{\cos \theta} r \quad (2.24)$$

$$m\dot{v} - mz_G\dot{p} + mx_G\dot{r} - Y_{\dot{v}}\dot{v} - Y_{\dot{r}}\dot{r} = mwp - mur + my_Gr^2 + my_Gp^2 - mz_Gqr - mx_Gqp + Y_{HS} + Y_{v|v}|v| + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + Y_{uu}\delta_r u^2 \quad (2.25)$$

$$I_{zz}\dot{r} - mx_G\dot{v} + my_G\dot{u} - N_{\dot{v}}\dot{v} - N_{\dot{r}}\dot{r} = I_{yy}pq + I_{xx}pq - mx_Gwp + mx_Gur + my_Gvr - my_Gwq + N_{HS} + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{uu}\delta_r u^2 \delta_r \quad (2.26)$$

Jika dituliskan dalam bentuk matrik, maka persamaan (2.24) - (2.26) adalah :

$$\begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -mx_G - N_{\dot{v}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + [B][\delta_r] \quad (2.27)$$

$$A = \begin{bmatrix} Y_{uv}u + Y_{v|v}|v| & -mu + my_Gr - mz_Gq + Y_{ur}u & 0 \\ my_Gr + N_{uv}u & mx_Gu + N_{ur}u & 0 \\ 0 & \frac{\cos \phi}{\cos \theta} & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} Y_{uu}\delta_r u^2 \\ N_{uu}\delta_r u^2 \delta_r \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dari persamaan (2.24) - (2.26) dapat dicari parameterisasi *state dependent coefficient* dengan cara menurunkan semua persamaan terhadap masing-masing argument sehingga didapatkan parameterisasi seperti pada persamaan (2.27).

$$\begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -mx_G - N_{\dot{v}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{v}}{\partial v} & \frac{\partial \dot{v}}{\partial r} & \frac{\partial \dot{v}}{\partial \psi} \\ \frac{\partial \dot{r}}{\partial v} & \frac{\partial \dot{r}}{\partial r} & \frac{\partial \dot{r}}{\partial \psi} \\ \frac{\partial \dot{\psi}}{\partial v} & \frac{\partial \dot{\psi}}{\partial r} & \frac{\partial \dot{\psi}}{\partial \psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{v}}{\partial \delta_r} \\ \frac{\partial \dot{r}}{\partial \delta_r} \\ \frac{\partial \dot{\psi}}{\partial \delta_r} \end{bmatrix} \delta_r \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -mx_G - N_{\dot{v}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} Y_{uv}u + 2Y_{v|v}|v| & -mu + 2my_Gr - mz_Gq + Y_{ur}u & 0 \\ my_Gr + N_{uv}u & mx_Gu + my_Gv + N_{ur} & 0 \\ 0 & \frac{\cos \phi}{\cos \theta} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{uu}\delta_r u^2 \\ N_{uu}\delta_r u^2 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (2.27)$$

Desain kontrol SDRE-LQT berdasarkan struktur system servo 1, dari persamaan dinamika AUV (2.30) diatas maka harus dilakukan proses linearisasi menggunakan matriks Jacobi pada

persamaan (2.27) dalam desain control SDRE-LQT menggunakan system servo 1, maka harus dibuat *state augmented*, sehingga gambar 2.5 dalam bentuk *closed loop* dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan *state augmented* adalah

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{st} \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} (\infty) = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{st} \\ \xi \end{bmatrix} (\infty) + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} u_{cc}(\infty) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(\infty) \quad (2.28)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{st} \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} (\infty) = \tilde{x}_{st} \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} = \tilde{\mathbf{A}} \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} = \tilde{\mathbf{B}} \quad (2.29)$$

Sehingga persamaan (2.28) dapat dituliskan dalam persamaan parameterisasi *state dependent coefficient* (SDC) seperti pada persamaan (2.29).

$$\dot{\tilde{x}}_{st} = \tilde{\mathbf{A}}(\tilde{x}_{st})\tilde{x}_{st} + \tilde{\mathbf{B}}(\tilde{x}_{st})u_{cc} \quad (2.29)$$

Dimana :

$$\mathbf{A}(x_{st}) = \begin{bmatrix} Y_{uv}u + 2Y_{v|v}v & -mu + 2my_Gr - mz_Gq + Y_{ur}u & 0 \\ my_Gr + N_{uv}u & mx_Gu + my_Gv + N_{ur} & 0 \\ 0 & \frac{\cos\phi}{\cos\theta} & 0 \end{bmatrix} invr^{-1} \quad (2.30)$$

$$nvr = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -mx_G - N_{\dot{v}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}(x_{st}) = \begin{bmatrix} Y_{uu}\delta_r u^2 \\ N_{uu}\delta_r u^2 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -mx_G - N_{\dot{v}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} = \tilde{\mathbf{A}}(\tilde{x}_{st})$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} = \tilde{\mathbf{B}}(\tilde{x}_{st})$$

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 (2.31).

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (\tilde{x}_{st}^T \mathbf{Q}(\tilde{x}_{st})\tilde{x}_{st} + u_{cc}^T \mathbf{R}(\tilde{x}_{st})u_{cc}) dt \quad (2.31)$$

Kemudian dengan matrik  $\mathbf{Q}$  dan  $\mathbf{R}$ , langkah berikutnya yaitu menyelesaikan persamaan SDRE yang ditunjukkan pada Persamaan(2.32).

$$\tilde{\mathbf{A}}^T(\tilde{x}_{st})\mathbf{P}(\tilde{x}_{st}) + \mathbf{P}(\tilde{x}_{st})\tilde{\mathbf{A}}(\tilde{x}_{st}) - \mathbf{P}(\tilde{x}_{st})\tilde{\mathbf{B}}(\tilde{x}_{st})\mathbf{R}^{-1}(\tilde{x}_{st})\tilde{\mathbf{B}}^T(\tilde{x}_{st})\mathbf{P}(\tilde{x}_{st}) + \mathbf{Q}_{(\tilde{x}_{st})}^T \mathbf{Q}(\tilde{x}_{st}) = 0 \quad (2.32)$$

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 (2.33) dan (2.34) dapat dilakukan.

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1}(\tilde{x}_{st})\tilde{\mathbf{B}}^T(x)\mathbf{P}(\tilde{x}_{st}) \quad (2.33)$$

$$u_{cc} = -k_s x_{st} + k_t \xi \quad (2.34)$$



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:

$$Q = \begin{bmatrix} 27 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 27 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 29.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 28 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

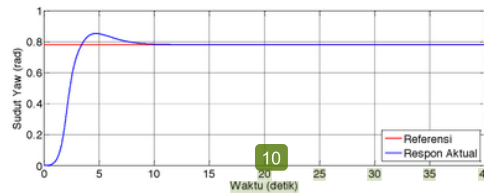
$$R = 29.5 \quad (2.36)$$

### 3. PEMBAHASAN

Dalam bab ini dibahas tentang hasil yang didapatkan dari beberapa pengujian yang berbeda diantaranya 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* 0.78 rad.

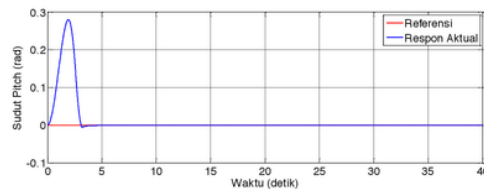
#### 3.1 Respon Step sistem Dengan Kontrol SDRE-LQT.

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.



Gambar 3.1 Respon *step* sudut yaw.

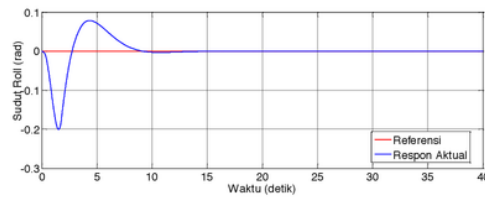
Respon *step* sudut yaw ditunjukkan pada Gambar 3.1. Hal ini ditunjukkan dengan nilai *time constant* sebesar  $\tau = 1.9904$  detik. Respon sistem juga tidak terlalu terlambat terhadap masukannya, hanya ada *delay* sekitar  $t_d = 1.3793$  detik. Respon sistem telah muncul secara utuh dalam selang 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* =  $-0.01282\%$ .



Gambar 3.2 Respon *step* sudut pitch.

Gambar 3.2 menunjukkan respon *step* sudut pitch. 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 referensinya, yaitu 0 radian.



Gambar 3.3 Respon *step* sudut *Roll*.

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

#### 4. KESIMPULAN

Metode control SDRE-LQT bekerja dengan cukup baik ketika ada faktor non linearitas dari sistem, yaitu pengaruh dari sudut *roll* dan sudut *pitch* yang mempengaruhi *state* sudut *yaw*, 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  $e = -0.01282 \%$ .

# Desain Kontrol Tracking Sudut Yaw Pada AUV Menggunakan State Dependent Riccati Equations (SDRE)-LQT

## ORIGINALITY REPORT

9%

SIMILARITY INDEX

6%

INTERNET SOURCES

3%

PUBLICATIONS

3%

STUDENT PAPERS

## PRIMARY SOURCES

1	<a href="http://doaj.org">doaj.org</a> Internet Source	4%
2	<a href="http://www.sqlteam.com">www.sqlteam.com</a> Internet Source	1%
3	PHILIPP STRAUCH. "PALMA CONTEMPLATIONIS.", Beiträge zur Geschichte der deutschen Sprache und Literatur (PBB), 1924 Publication	1%
4	Elijah Polak. "Optimization", Springer Nature, 1997 Publication	1%
5	Submitted to Padjadjaran University Student Paper	1%
6	D. B. Talange, S. D. Joshi, Santosh Gaikwad. "Control of autonomous underwater vehicle using fractional order $PI^\lambda$ controller", 2013 IEEE International Conference on Control Applications	<1%

# (CCA), 2013

Publication

---

7	<a href="http://www.cakecook.co.kr">www.cakecook.co.kr</a> Internet Source	<1%
8	<a href="http://www.tokuyama-ch.ed.jp">www.tokuyama-ch.ed.jp</a> Internet Source	<1%
9	<a href="http://id.scribd.com">id.scribd.com</a> Internet Source	<1%
10	Submitted to Universitas Islam Indonesia Student Paper	<1%
11	<a href="http://repository.its.ac.id">repository.its.ac.id</a> Internet Source	<1%
12	Submitted to Universitas Negeri Makassar Student Paper	<1%

---

Exclude quotes Off

Exclude matches Off

Exclude bibliography On