PERANCANGAN KONTROL TRACKINGMENGGUNAKAN STATE DEPENDENT LQR UNTUK KONTROL STEERINGPADA AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE

Rahma Nur Amalia¹, Moch.Rameli², Josaphat Pramudijanto³, Aries Sulisetyono⁴

^{1,2,3} Teknik Elektro, Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
⁴Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
¹ Rahma.fortunate@gmail.com

Abstrak

Kendaraan bawah laut menjadi hal yang yang sangat penting guna menunjang operasi di lingkungan bawah laut, misalnya yang berkaitan dengan *oceanography, cable lying*, dan *surveying*, tidak heran jika dalam beberapa tahun terakhir banyak dikembangkan teknologi robot bawah laut yang canggih, atau sering disebut dengan *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV). Objek penelitian AUV meliputi sistem kontrol manuver (*diving* dan *steering*), perencanaan jalur, dan *tracking trajectory*. Penelitian ini difokuskan pada perancangan kontroler manuver *steering*, dimana dalam model nya digunakan 6 *Degree Of Freedom*. AUV merupakan *plant* dengan sistem non linier dan mempunyai permasalahan dalam hal stabilitas, sehingga rentan terhadap gangguan eksternal.

Pada permasalahan *tracking control* pada AUV digunakanmetode *State Dependent* LQR.Penelitian ini dibagi menjadi dua bagian yaitu *setpoint regulation* dimana *State Dependent* LQR digunakan untuk stabilitas, danyang kedua untuk *tracking control.State Dependent* LQR adalah metode kontrol dengan solusi suboptimal dimana *plant* yang nonlinier dikarenakan *state* dan waktu yang berubah- ubah tergantung pada lingkungan sekitar, kemudian diumpan balik dengan solusi *aljabar riccati*, sehingga didapatkan nilai gain kontroler yang berubah- ubah sampai menuju target yang diinginkan.

Hasil dari penelitian ini adalah *plant* AUV dapat mengikuti sinyal *tracking berupa nilai referensi* yang diinginkan.Hasil menunjukkan bahwa nilai matrik pembobot yang terbaik adalah Q=1 dan R=1 baik untuk *setpoint regulation* maupun *tracking control*.

Kata kunci : Autonomous Underwater Vehicle , State Dependent, LQR, Steering

1.Pendahuluan

Beberapa tahun terakhir AUV menjadi bahan penelitian yang berkembang pesat di kalangan para ilmuwan dunia. Perkembangan tersebut diikuti pula dengan teknik pembangunan model fisik yang riil dan kontroler yang mumpuni. Saat ini tujuan dari penelitian-penelitian AUV meliputi *self contained*, *intelligent*, dandecision making.Banyak penelitian yang telah dilakukan guna mencapaitujuan tersebut, yaitunavigation, object detection, energy resources, dan *information systems*.

Dalam perkembangannya, AUV sekarang mempunyai misi yang berbahaya dansemakin kompleks, sehingga dibutuhkan *autonomous guidance* dan *control system* untuk mengatasi persoalan tersebut. AUV mempunyai kelebihan, yaitu tidak memerlukan operator manusia dalam menjalankannya. Seperti yang kita ketahui bahwa lingkungan bawah laut sendiri merupakan lingkungan yang sangat rawan akan bahaya, oleh karena itu dengan pengoperasian AUV secara otomatis, diharapkan resiko terhadap manusia dapat berkurang secara maksimal.

Penelitian ini difokuskan pada kontrol AUV untuk manuver *steering*, dimana digunakan

kontroler SDRE denganpendekatan suboptimal yang bertujuan untuk kontrol *tracking* AUV dengan *trajectory tracking* yang telah dibuat sebelumnya.Kecepatan linier (u, v, w, p, q, r) pada AUVdipilih sebagai *variable state*.Perubahan posisi dari perubahan sudut *yaw* tersebut diumpan balik ke *state vector* sistem, guna mendapatkan gain-gain kontroler yang sesuai. Model AUV pada simulasi penelitian ini diasumsikan memiliki kecepatan yang konstan pada propeler.

Berikut dijelaskan susunan dari penulisan penelitian ini, meliputi model matematikdari *plant* AUV akan dijelaskan di bab II, penguraian mengenai kontroler state dependent LQR di bab III, hasil dan pembahasan diuraikan pada bab IV, dan kesimpulan dan saran di bab V.

2.Model Matematik dari AUV

Model matematik dari AUV beserta parameter-parameter dan notasi nya yang digunakan dalam penelitian ini mengikuti model (Peter Ridley,2003), berikut model fisik dari AUV seperti pada gambar 1 di bawah.



Gambar 1. Model fisik AUV

Persamaan gerak dari AUV didapatkan dari pendekatan metode Newton-Euler dari *rigid body* AUV. Persamaan dinamik 6 DOF AUV dituliskan seperti di bawah ini (Thor.I.Fossen,2011):

$$\begin{cases} J(\eta)v = \dot{\eta} \end{cases}$$
(1)

 $\{M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + G(\eta) = \tau$ (1) Dimana M ϵR^{6x6} adalah matrik *inertia*, $C(v)\epsilon R^{6x6}$ adalah matrik *coriolis* dan *centripetal*, $D(v)\epsilon R^{6x6}$ adalah matrik *damping*, $G(\eta)\epsilon R^{6x1}$ adalah vektor gravitasi atau *buoyancy forece and moments*, $\tau\epsilon R^{6x1}$ adalah vektor *external force and moments*.

Pada pemodelan AUV digunakan 2(dua) sistem koordinat yaitu referensi terhadap sumbu bumi(*earth-fixed reference*) dan referensi terhadap *rigid body*(*body-fixed reference*). Sistem koordinat ini secara umum meliputi 6 DOF (*degree of freedom*), antara lain *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, *yaw*, yang geraknya mengacu pada sumbu bumi(x,y,z). Posisi dan orientasi pada AUV yang mengacu koordinat sumbu bumi dirumuskan dalam vektor $\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]$. Gambar 2 di bawah ini menjelaskan sistem koordinat yang telah dijabarkan sebelumnya.



Gambar 2. Koordinat referensi bidang AUV

Pergerakan AUV akan menimbulkan hubungan antara 2 referensi koordinat, yaitu koordinat sumbu bumi dan koordinat *rigid body*, yang secara umum dituliskan seperti pada persamaan (1), dimana dari persamaan $J(\eta)v = \dot{\eta}$, diketahui bahwa J adalah matrik transformasi yang berhubungan dengan sudut euler (*roll*, *pitch*, *yaw*). Matrik transformasi tersebut menghasilkan matrik transformasi pada vektor kecepatan linier dan anguler, seperti persaman (2).

$$\begin{bmatrix} c\psi c\theta & s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta + s\phi sin\theta s\psi & -c\psi s\phi + s\theta s\psi c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix}$$

$$J_{2}(\eta_{2}) = \begin{bmatrix} 1 & s\phi ta\theta & cos\phi ta\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix}$$
(2)

Dimana c = cos, s = sin dan ta = tan.

Berdasarkan pada hukum 2 Newton yang menyatakan bahwa jumlah total gaya yang bekerja pada suatu benda yang bergerak sama dengan jumlah total masa dengan percepatan yang bekerja dalam benda tersebut, sehinggadinamika pada AUV dapat dirumuskan dalam persamaan translasi (*surge X, sway Y, heave Z*) dan rotasi(*roll K, pitch M, yaw N*) seperti di bawah ini (Peter Ridley,2003):

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

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

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

$$K = I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{w} - wp + ur)]$$

$$M = I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wp) - x_G(\dot{w} - uq + vp)]$$

$$N = I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur)]$$
(3)

Persamaan (3) di atas merupakan persamaan singkat, seperti pada persamaan (1) yang meliputi :

$$M\dot{v} + C(v)v = \tau$$
(4)

Kita telah ketahui bahwa τ adalah vektor *external force and moments*, yang terdiri dari 5 komponen yang dituliskan dalam persamaan (5), (Chen,2007) yaitu:

$$\tau = \tau_{hydrostatic} + \tau_{drag} + \tau_{added\ mass} + \tau_{lift} + \tau_{control} \tag{5}$$

Persamaan *external force and moments*di atas untuk lebih jelasnya direpresentasikan sebagai berikut:

$$\begin{split} X &= X_{HS} + X_{u|u|} u|u| + X_{\dot{u}} \dot{u} + X_{uv} uv + \\ X_{uw} uw + X_{q|q|} q|q| + X_{vr} vr + \\ X_{w|w|} w|w| + X_{wq} wq + X_{qq} qq + \\ X_{rr} rr + X_{prop} \\ Y &= Y_{HS} + Y_{v|v|} v|v| + Y_{\dot{v}} \dot{v} \\ &+ Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{ur} ur \\ &+ Y_{wp} wp + Y_{pq} pq \\ &+ Y_{uv} uv \\ &+ Y_{uu\delta_r} u^2 (\delta_{rtop} \\ &+ \delta_{r_{bottom}}) \\ Z &= Z_{HS} + Z_{w|w|} w|w| + Z_{\dot{w}} \dot{w} \\ &+ Z_{\dot{q}} \dot{q} + Z_{uq} uq \\ &+ Z_{vp} vp + Z_{rp} rp \\ &+ Z_{uu\delta_s} u^2 (\delta_{s_{right}} \\ &+ \delta_{s_{left}}) \end{split}$$

$$K = K_{HS} + K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{uu\delta_r}(\delta_{r_{top}} + \delta_{r_{bottom}}) + K_{uu\delta_s}(\delta_{s_{right}} + \delta_{s_{left}}) + K_{prop}$$

$$M = M_{HS} + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{uw}uw + M_{rp}rp + M_{uu\delta_s}u^2\delta_s$$

$$N = N_{HS} + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r$$
(6)

Selanjutnya akan didapatkan persamaan model AUV secara keseluruhan dengan menggabungkan persamaan (3) dan persamaan (6) sebagai berikut: *Translation along X direction*:

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_{G}(q^{2} + r^{2}) + y_{G}(pq - \dot{r}) + z_{G}(pr + \dot{q})] = X_{HS} + X_{u|u|}u|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{uv}uv + X_{uw}uw + X_{q|q|}q|q| + X_{vr}vr + X_{w|w|}w|w| + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{rr}rr + X_{prop}$$

$$Translation along Y direction:$$

$$m[\dot{v} - wp + ur - y_{G}(r^{2} + p^{2}) + z_{G}(qr - \dot{n})$$

$$\begin{array}{l} m_{l}v \quad wp + ur \quad y_{G}(r + p) \\ + z_{G}(qr - \dot{p}) \\ + x_{G}(pq + \dot{r})] \\ = Y_{HS} + Y_{v|v|}v|v| + Y_{\dot{v}}\dot{v} \\ + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp \\ + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv \\ + Y_{uu\delta_{r}}u^{2}(\delta_{r_{top}}) \\ + \delta_{r_{bottom}}) \end{array}$$

(8)
Translation along Z direction:

$$m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rp + \dot{p})] = Z_{HS} + Z_{w|w|}w|w| + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp + Z_{uw}uw + Z_{uu\delta_s}u^2(\delta_{sright} + \delta_{sleft})$$
Rotation along X direction:

$$I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{w} - wp + ur)] = K_{HS} + J = \frac{1}{2}\int_0^\infty x^T Q(x)x + u^T R(x)u \, dt \, K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{uu\delta_r}(\delta_{rtop} + \delta_{rbottom}) + K_{uu\delta_s}(\delta_{sright} + \delta_{sleft}) + K_{prop}$$
Rotation along Y direction:

$$I_{xx}\dot{p} + (I_{xy} - u_{yy})qr + m[q_{xy}(\dot{w} - uq + vp) - z_{yy}(w - wp + ur)] = K_{HS} + J = \frac{1}{2}\int_0^\infty x^T Q(x)x + u^T R(x)u \, dt \, K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{uu\delta_r}(\delta_{rtop} + \delta_{rbottom}) + K_{uu\delta_s}(\delta_{sright} + \delta_{sleft}) + K_{prop}$$
Rotation along Y direction:

$$I_{xy}\dot{p} + (I_{xy} - I_{yy})m + m[q_{yy}(\dot{w} - wp + vp)] = K_{yy} + M_{yy}(x) + M_{y$$

Rotation along Z direction: $I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{w} - vr + wp)] = N_{HS} + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r$ (12)

Ketika AUV bergerak di bidang horizontal, perubahan sudut rudder akan menghasilkan *moment*

yaw dan menghasilkan perubahan arah hadap untuk AUV. Pada kontrol steering dalam aplikasi nya dibutuhkan tiga state yaitu sway velocity(v(t)), yaw angle rate(r(t)), dan yaw angle $(\psi(t))$, sedangkan varibel kontrolnya adalah defleksi dari rudder angle $\delta_r(t)$. Persamaan dinamika dari steering secara matematis adalah:

$$\dot{\psi} = \frac{\sin\phi}{\cos\theta}q + \frac{\cos\phi}{\cos\theta}r \tag{13}$$

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

(14)

$$\begin{split} I_{zz}\dot{r} &- mx_G\dot{v} + my_G\dot{u} - N_{\dot{v}}\dot{v} - N_{\dot{r}}\dot{r} = \\ -I_{yy}pq + I_{xx}pq - mx_Gwp + mx_Gur + \\ my_Gvr - my_Gwq + N_{HS} + N_{ur}ur + \\ N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r \end{split}$$

(15)

Dapat dituliskan dalam bentuk matrik sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0\\ -mx_G - N_{\dot{v}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}\\ \dot{r}\\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v\\ r\\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_r \end{bmatrix}$$
(16)

Dimana:

 $\Lambda -$

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

5. Kontroler SDRE

SDRE merupakan pengembangan dari metode kontrol optimal LQR. Metode ini menghasilkan kontroler non - linier sub - optimal, yang mana menyediakan desain nonlinier secara efektif dan sistematis (James, 1997). Efektif dan sistematis karena untuk mendapatkan parametersistem yang nonlinier didapatkan parameter pendekatan dengan menggunakan solusi persamaan aljabar riccati, dibanding dengan persamaan Hamiltonian-Jacob menggunakan (Sergey,2006)dengan persamaan input nonlinier seperti pada persamaan:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} \tag{17}$$

Dimana state vector adalah $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$ adalah input vector, $f(x) \in \mathbb{R}^n$, $g(x) u \in \mathbb{R}^n$.

Dalam kontroler SDRE, sama halnya seperti LQR yang juga menggunakan *state feedback*, yang mana bergantung pada solusi SDRE (Sergey,2006), maka persamaan (17)dapat dirumuskan menjadi:

 $\dot{x} = A(x)x + B(x)u$ (18) Dimana f(x) = A(x)x dan B(x) = g(x). Formula ini dapat disebut sebagai *State Dependent Coefficient* (SDC). Perlu dicatat bahwa matrik A dan B yang awalnya merupakan persamaan *state* dari *plant* kemudian berubah menjadi koefisien dalam persamaan *riccati*.

Metode SDRE mempunyai tujuan untuk meminimalkan indeks perfomansi (Anisa, 2014). Persamaan indeks perfomansi:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty x^T Q(x) x + u^T R(x) u \, dt \qquad (19)$$

Matrik pembobot untuk state adalah $Q \in R^{nxn}$ dan input adalah $R \in R^{mxm}$. Matrik Qharus simetris dan *positive semi definite*, sedangkan matrik Rharus simestris dan *positive definite*. Perumusan SDRE *control law* sebagai berikut:

 $u = -R^{-1}B(x, u)^T k(x, u)x$ (20) Dengan ketentuan k(x, u) positive definite. Langkah selanjutnya yaitu menyelesaikan persamaan SDRE:

$$k(x,u)A(x) + A(x)^{T}k(x,u) - k(x,u)B(x,u)R^{-1}B^{T}(x,u)k(x,u) + Q = 0$$
(21)

4. Hasil dan Pembahasan

Untuk membuktikan bahwa skema SDRE dapat diimplementasikan pada kontrol manuver *steering* AUV, maka hasil pemodelan AUV dan kontroler disimulasikan dengan menggunakan matlab. Simulasi initerbagi menjadi dua bagian yaitu *set point regulation* dan *tracking control*.

A. Set-point regulation

Dalam penelitian ini, kecepatan dari AUV dianggap konstan sebesar 6,76m/s. Matrik pembobot Q dan R diset dengan nilai R=1 dan 0,1 sedangkan Q=1 dan 0,1.Waktu simulasi juga diatur selama 30 detik. Simulasi dalam *set-point regulation* ini juga berfungsi sebagai kontrol kestabilan. Nilai dari *initial condition*untuk yaw juga dibuat bervariasi dengan nilai 0,4 radian dan 0,5 radian. Hasil yang diharapkan dari kontrol kestabilan adalah mencapai titik *equilibrium*, yaitu nol. Pada gambar (4) grafik di bawah, diberikan *initial condition*=0,4 radian dengan matrik pembobot Q=0,1 dan R=0,1. Gambar (5) diberikan *initial condition* yang sama, namun dengan matrik pembobot Q=1 dan R=1.



Gambar 3. Digram Blok Setpoint Regulation



Gambar 4. *Grafik Set-point regulation Initial Condition*=0,4 rad,Q dan R=0,1



Gambar 5.*Grafik Set-point regulation Initial Condition*=0,4 rad,Q dan R=1

Kondisi yang sama juga diberikan pada *plant* seperti pada gambar (6) dan (7) dengan *initial condition*=0,5.



Gambar 6.*Grafik Set-point regulationInitial Condition*=0,5 rad,Q dan R=1



Gambar 7.*Grafik Set-point regulation Initial Condition*=0,5 rad,Q dan R=0,1

B. Tracking Control

Pada simulasi *tracking control* ini, kecepatan yang digunakan pada AUV sama dengan kecepatan pada *set-point regulation* yatu 6,76 m/s. Matrik pembobot Q dan R kali iniyang digunakan beragam, yaitu Q dan R=0,5;0,8;1. Waktu yang digunakan pada simulasi ini adalah 20 detik. Pada gambar (9) nilai referensi nya adalah 0,3 dengan *initial condition* 0, matrik Q dan R adalah 1. Gambar (10) nilai referensinya adalah 0,7 dengan Q dan R adalah 1.



Gambar 8. Digram Blok Tracking Control



Gambar 9. *Grafik Tracking Control Initial Condition*=0 rad,referensi=0,3 rad,Q=1,R=1



Gambar 10. *Grafik Tracking Control Initial Condition*=0 rad,referensi=0,7 rad,Q=1 dan R=1



Gambar 11.*GrafikTracking Control* Initial Condition=0, referensi=0,3 rad,Q=0,5 dan R=0,5



Gambar 12.*GrafikTracking Control* Initial Condition=0, referensi=0,3 rad,Q=0,8 dan R=0,8



Gambar 13.*Grafik Tracking Control* Initial Condition=0, referensi=0,3 rad,Q=1,5 dan R=1,5

5.Kesimpulan dan saran

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilaksanakan menunjukan, bahwa kontrol steering menggunakan kontroler pada AUV State Dependent LQR sebagai setpoint regulation dan tracking control dapat menghasilkan respon yang baik. Kemampuan dari kontroler tersebut sangat dipengaruhi dalam pemilihan parameternya berupa matrik pembobot yaitu Q dan R.Untuk kasus Setpoint regulation ketika diberikan initial condition sebesar 0,4 dan 0,5 plant dapat stabil menuju ke titik equilibrium dengan bobot Q dan R sama dengan 1, namun ketika diberi bobot Q dan R sama dengan 0,1 terdapat error steady state walaupun nilainya sangat kecil.

Selanjutnya pada kasus *Tracking Control*, dapat dilihat pada grafik di atas bahwa*plant* dapat menuju ke nilai referensi yang diinginkan yaitu sebesar 0,3 dan 0,7 kecuali gambar (11). Pemberian nilai bobot Q dan R sangat berpengaruh terhadap respon sistem, semakin besar nilai matrik pembobot maka semakin cepat menuju nilai referensi yang diinginkan. Seperti pada gambar (9) dimana bobot Q dan R adalah paling kecil yaitu 0,5 dimana sinyal keluaran berosilasi.

Saran yang dapat dijadikan penelitian ke depan adalah dapat kita buat *trajectory tracking* guna mengimplementasikan secara lebih riil pada kasus *tracking control* pada plant AUV

Daftar Pustaka:

Anisa Endarwati.(2009):Perancangan Sistem Pengaturan Kecepatan Pada Simulator Paralel Hybrid Electric Vehicle (PHEV) Menggunakan Metode State Dependent*Linear Quadratic* Regulator, Tugas Akhir,2014.

- Chen Yang. (2007):*Modular Modeling And Control* For Autonomous Underwater Vehicle (AUV), Tesis, Department Of Mechanical Engineering, University Of Singapore.
- James R.Cloutier.(1997):State-Dependent Riccati Equation Techniques: An Overview, Proceedings of the American Control Conference Albuquerque, New Mexico, U. S. Government,June.
- Peter Ridley, dkk. (2003):Submarine Dynamic Modeling, Proceedings of the 2003 Australasian Conference on Robotics & Automation,Australian Robotics & Automation Association, Brisbane.
- Sergey Katsev.(2006):Streamlining of the State-Dependent Riccati Equation Controller Algorithm for an Embedded Implementation,Thesis,Rochester Institut of Technology,New York.
- Thor.I.Fossen.(1994):*Guidance and Control of Ocean Vehicles*, University of Trondhei, Norwey