

DESAIN SISTEM KENDALI GERAK SURGE, SWAY DAN YAW PADA AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE DENGAN METODE SLIDING MODE CONTROL (SMC)

Teguh Herlambang

Program Studi Sistem Informasi Universitas Nahdlatul Ulama Surabaya (UNUSA)

Jalan Raya Jemursari 51-57, Surabaya

teguh@unusa.ac.id

Abstrak

Kapal selam tanpa awak atau yang biasa disebut Autonomous Underwater Vehicle (AUV) merupakan salah satu jenis robot bawah air yang digunakan untuk eksplorasi bawah laut dan peralatan sistem pertahanan bawah laut. AUV dikendalikan oleh komputer di atas kapal permukaan untuk melaju dan bergerak dengan enam derajat kebebasan (6-DOF). Untuk mengendalikan AUV dibutuhkan sistem kendali gerak. Pada penelitian ini dikembangkan sistem kendali gerak menggunakan model nonlinier 3-DOF AUV yaitu gerak surge, sway dan yaw dengan metode Sliding Mode Control (SMC). Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode SMC dapat digunakan sebagai sistem kendali gerak 3-DOF dengan menghasilkan error 0.03% untuk gerak surge dan 0.04% untuk gerak sway serta 0.5% untuk gerak yaw.

Kata kunci: AUV, Sistem Kendali, SMC, 3-DOF, Model Nonlinear

1 Pendahuluan

Teknologi pada bidang wahana bawah air memiliki peranan yang sangat penting bagi negara Indonesia, karena 70% wilayahnya adalah lautan. Karena luas perairan di Indonesia lebih luas daripada daratan maka diperlukan teknologi bawah air untuk mengeksplorasi dan menjaga sumber daya alam negara Indonesia diperlukan suatu wahana bawah air [1]. Wahana bawah air yang banyak dikembangkan oleh banyak negara saat ini yaitu robot bawah air tanpa awak atau kapal selam tanpa awak. Robot ini dikenal dengan sebutan Autonomous Underwater Vehicle (AUV). AUV merupakan salah satu jenis

robot bawah air yang telah menarik minat banyak penelitian beberapa tahun terakhir [2]. AUV adalah kendaraan yang digerakkan melalui air dengan sistem propulsi, dikendalikan dan dikemudikan oleh komputer onboard dengan enam derajat kebebasan (DOF) manuver, sehingga dapat melaksanakan tugas yang telah ditentukan sepenuhnya dengan sendirinya. Manfaat AUV tidak hanya mengeksplorasi sumber daya laut, melainkan juga untuk pemetaan bawah laut dan sebagai peralatan sistem pertahanan bawah laut [3,4].

AUV pertama kali dibuat oleh *Applied Physics Laboratory (APL)* di University of Washington, USA, pada akhir 1950-an karena kebutuhan untuk mendapatkan data oseanografi. Penelitian yang dilakukan di laboratorium tersebut mengarah pada pengembangan dan pengoperasian *Self Propelled Underwater Vehicle Research (SPURV)*. Kemudian perkembangan AUV dapat dibagi menjadi beberapa tahap, yaitu pada tahap pertama tahun 1970an, dilakukan penyelidikan awal kegunaan sistem AUV, pada tahap kedua tahun 1970 – 1980 dibangun pengembangan teknologi dan eksperimen AUV, pada tahap ketiga tahun 1980 – 1990 dilakukan percobaan dengan menggunakan prototipe, pada tahap keempat tahun 1990 – 2000 pengembangan AUV berbasis TIK. Sejak tahun 2000, AUV telah berkembang menjadi produk komersil [5]. Hal ini mendorong untuk diadakan penelitian dalam rangka meningkatkan program inovasi teknologi khususnya pada sistem kendali pada kapal selam tanpa awak. Pengembangan sistem kendali ini bertujuan untuk mengatur aktuator sedemikian hingga kapal selam tanpa awak mengikuti jejak lintasan yang diharapkan oleh panduan. Beberapa metode sistem pengendalian yang pernah diterapkan pada model linier dari AUV adalah Fuzzy Sliding Mode Control [6] dan Proportional Integral Derivative [7]. Selain kedua metode tersebut terdapat metode sistem kendali yang dapat diterapkan pada model nonlinear yaitu metode Sliding Mode Control (SMC). SMC memiliki beberapa keunggulan, yaitu sifatnya yang sangat robust, mampu bekerja dengan baik pada sistem nonlinear yang memiliki ketidakpastian model ataupun parameter [8,9].

Pada paper ini diawali dengan penyusunan model persaaan gerak 3-DOF yaitu gerak *surge*, *sway* dan *yaw*. Gerak *surge* dan *sway* merupakan gerak translasi pada sumbu-*x* dan sumbu-*y*, sedangkan gerak *yaw* ialah gerak rotasi pada sumbu-*z*. Selanjutnya diterapkan untuk mengendalikan gerak *surge*, *sway* dan *yaw* untuk stabil pada setpoint yang diinginkan dengan asumsi tidak ada *disturbance* pada saat AUV bergerak dan AUV tidak menggunakan sistem ballast. Hasil simulasi model 3-DOF dengan sistem kendali SMC menunjukkan bahwa respon gerak *surge* memiliki error 0.03%. Untuk Respon gerak *sway* memiliki error 0.04% dan respon gerak *yaw* menghasilkan error 0.5%.

2 Autonomous Underwater Vehicle

Untuk menganalisa sistem AUV terdapat dua hal penting yang diperlukan, yaitu sistem sumbu yang terdiri dari *Earth Fixed Frame (EFF)* dan *Body Fixed Frame (BFF)* yang telah direpresentasikan pada Gambar 1 [5]. EFF digunakan

untuk menjelaskan posisi dan orientasi dari AUV, dimana posisi sumbu- x mengarah ke arah utara, sumbu- y ke arah timur dan sumbu- z ke arah pusat bumi. Sedangkan BFF mendefinisikan sumbu- x positif mengarah ke haluan wahana, sumbu- y positif mengarah ke sisi kanan wahana, dan sumbu- z positif mengarah ke bawah [10]. Sistem BFF digunakan untuk menjelaskan kecepatan dan percepatan dari AUV dengan titik mula berada pada pusat gravitasi. Pada paper ini menggunakan persamaan gerak dalam 3-DOF yaitu *surge*, *sway* dan *yaw* dengan mengabaikan gerak *heave*, *roll* dan *pitch*. Berikut adalah persamaan gerak dalam 3-DOF:

Surge:

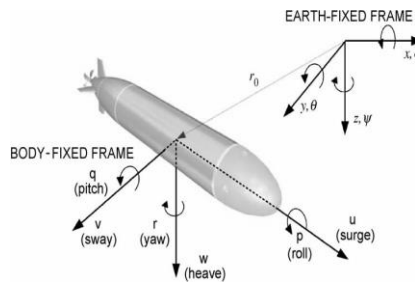
$$\dot{u}(m - X_{\dot{u}}) = X_{res} + X_{|u|u}|u| + X_{vr}vr + X_{rr}rr + X_{prop} - m[-vr - x_G(r^2) + y_G(-\dot{r})] \quad (1)$$

Sway:

$$\dot{v}(m - Y_{\dot{v}}) = Y_{res} + Y_{|v|v}|v| + Y_{r|r}|r| + Y_{ur}ur + Y_{uv}uv + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_{r_1} - m[ur - y_G(r^2)] \quad (2)$$

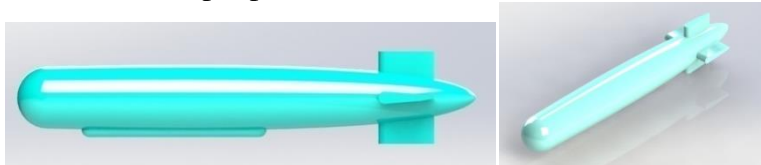
Yaw:

$$\dot{r}(I_z - N_r) = N_{res} + N_{|v|v}|v| + N_{r|r}|r| + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{ur}ur + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_{r_2} - (m[x_G(\dot{v} + ur) - y_G(\dot{u} - vr)]) \quad (3)$$



Gambar 1. Enam derajat kebebasan gerak AUV [5]

Dimana X_{res} merupakan gaya hidrostatis pada arah sumbu- x , X_{prop} sebagai gaya dorong. Pada paper ini menggunakan spesifikasi AUV dari UNUSAITS AUV, dimana UNUSAITS AUV ini dengan panjang 1.5 meter, diameter 0.2 meter yang dilengkapi dengan sistem ballast. Profil dan spesifikasi UNUSAITS AUV terdapat pada Gambar 2 dan Tabel 1.



Gambar 2. Profil UNUSAITS AUV [6]

Tabel 1. Spesifikasi dari UNUSAITS AUV [6]

Berat	16 Kg
Panjang	1500 mm
Diameter	200 mm
Controller	Ardupilot Mega 2.0
Komunikasi	Wireless Xbee 2.4 GHz

Camera	TTL Camera
Battery	Li-Pro 11,8 V
Propulsion	12V motor DC
Propeller	3 Blades OD : 50 mm
Speed	3.1 knots (1.5m/s)
Kedalaman Maksimum	8 m

3 Sliding Mode Control

Algoritma sistem kendali SMC dapat diuraikan sebagai berikut [8,11]

1. Menentukan fungsi *Switching* $S(x,t)$ seperti pada persamaan $S(x,t) = \dot{e} + \lambda e = 0$ dari *tracking error* sistem dinamik.
2. Menentukan permukaan *Sliding*, yaitu $S(x,t) = 0$ dari fungsi *Switching* yang telah diperoleh.
3. Menentukan nilai estimasi pengendali \hat{u} . Dinamika saat dalam kondisi *sliding* dapat dituliskan sebagai: $\dot{S} = 0$ dengan menyelesaikan fungsi switching diperoleh ekspresi untuk nilai estimasi pengendali \hat{u} sebagai kontrol ekuivalen. Pada waktu menggunakan SMC dinamis pada saat $\dot{S} = 0$ ditemukan \dot{u}
4. Mendefinisikan aturan SMC, yaitu penggunaan *control law*,

$$u = \hat{u} - K \operatorname{sgn}(S)$$

di mana fungsi signum, sgn didefinisikan sebagai:

$$\operatorname{sgn}(x) \begin{cases} -1 & , x < 1 \\ 1 & , x \geq 1 \end{cases}$$

5. Substitusi nilai \hat{u} pada *control law* sehingga diperoleh *control input* baru sebagai pengganti *control input* sebelumnya.
6. Menentukan nilai K yang sesuai dengan kondisi *sliding* pada persamaan tahap 4.

Selanjutnya adalah merancang sistem kendali SMC pada persamaan gerak model nonlinier 3-DOF.

4 Perancangan Sistem Kendali SMC pada model nonlinier 3-DOF

Untuk Perancangan sistem kendali pada model nonlinear 3-DOF (*surge*, *sway* dan *yaw*) sehingga untuk *heave*, *roll* dan *pitch* dianggap tidak ada atau nol. Sehingga dari persamaan (1)-(3) dapat dibentuk dalam persamaan (4)-(6) sebagai berikut :

Surge:

$$\dot{u}(m - X_{\dot{u}}) = X_{res} + X_{|u|u}u|u| + X_{vr}vr + X_{rr}rr + X_{prop} - m[-vr - x_G(r^2) + y_G(-\dot{r})]$$

$$\dot{u}(m - X_{\dot{u}}) + (my_G)\dot{r} = X_{res} + X_{|u|u}u|u| + X_{vr}vr + X_{rr}rr + X_{prop} - m[-vr - x_G(r^2)]$$

(4)

Sway:

$$\dot{v}(m - Y_{\dot{v}}) = Y_{res} + Y_{|v|v}v|v| + Y_{r|r}r|r| + Y_{ur}ur + Y_{uv}uv + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_{r_1} - m[ur - y_G(r^2)]$$

$$\dot{v}(m - Y_{\dot{v}}) - (Y_{\dot{r}})\dot{r} = Y_{res} + Y_{|v|v}v|v| + Y_{r|r}r|r| + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{uv}uv + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_{r_1} - m[ur - y_G(r^2)] \quad (5)$$

Yaw:

$$\dot{r}(I_z - N_{\dot{r}}) = N_{res} + N_{v|v}v|v| + N_{r|r}r|r| + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{ur}ur + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_{r_2} - (m[x_G(\dot{v} + ur) - y_G(\dot{u} - vr)])$$

$$\dot{r} + (mx_G - N_{\dot{v}})\dot{v} - (my_G)\dot{u} = N_{res} + N_{v|v}v|v| + N_{r|r}r|r| + N_{ur}ur + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_{r_2} - (m[x_G(ur) - y_G(-vr)]) \quad (6)$$

Sehingga persamaa (4) – (6) bisa dijadikan matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & my_G \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{r}} \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{res} + X_{|u|u}u|u| + X_{vr}vr + X_{rr}rr + X_{prop} - m[-vr - x_G(r^2)] \\ Y_{res} + Y_{|v|v}v|v| + Y_{r|r}r|r| + Y_{ur}ur + Y_{uv}uv + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_{r_1} - m[ur - y_G(r^2)] \\ N_{res} + N_{v|v}v|v| + N_{r|r}r|r| + N_{ur}ur + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_{r_2} - (m[x_G(ur) - y_G(-vr)]) \end{bmatrix}$$

Misalkan $E = m - X_{\dot{u}}$, $F = my_G$, $G = m - Y_{\dot{v}}$, $H = -Y_{\dot{r}}$, $I = mx_G - N_{\dot{v}}$ dan $J = I_z - N_{\dot{r}}$

Sehingga

$$\begin{bmatrix} E & 0 & F \\ 0 & G & H \\ -F & I & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{res} + X_{|u|u}u|u| + X_{vr}vr + X_{rr}rr + X_{prop} - m[-vr - x_G(r^2)] \\ Y_{res} + Y_{|v|v}v|v| + Y_{r|r}r|r| + Y_{ur}ur + Y_{uv}uv + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_{r_1} - m[ur - y_G(r^2)] \\ N_{res} + N_{v|v}v|v| + N_{r|r}r|r| + N_{ur}ur + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_{r_2} - (m[x_G(ur) - y_G(-vr)]) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Dari persamaan (7) didapatkan state space bentuk model nonlinear 3-DOF sebagi berikut

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{GJ - HI}{GF^2 - EGJ - EHI} & \frac{FI}{GF^2 - EGJ - EHI} & \frac{-FG}{GF^2 - EGJ - EHI} \\ \frac{-FH}{GF^2 - EGJ - EHI} & \frac{F^2 + EJ}{GF^2 - EGJ - EHI} & \frac{-EH}{GF^2 - EGJ - EHI} \\ \frac{FG}{GF^2 - EGJ - EHI} & \frac{-EI}{GF^2 - EGJ - EHI} & \frac{EG}{GF^2 - EGJ - EHI} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{res} + X_{|u|u}u|u| + X_{vr}vr + X_{rr}rr + X_{prop} - m[-vr - x_G(r^2)] \\ Y_{res} + Y_{|v|v}v|v| + Y_{r|r}r|r| + Y_{ur}ur + Y_{uv}uv + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_{r_1} - m[ur - y_G(r^2)] \\ N_{res} + N_{v|v}v|v| + N_{r|r}r|r| + N_{ur}ur + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_{r_2} - (m[x_G(ur) - y_G(-vr)]) \end{bmatrix}$$

Misalkan $T = GF^2 - EGJ - EHI$

$$T_1 = \frac{GJ - HI}{T}, T_2 = \frac{FI}{T}, T_3 = \frac{-FG}{T}, T_4 = \frac{-FH}{T}, T_5 = \frac{F^2 + EJ}{T}, T_6 = \frac{-EH}{T}, T_7 = \frac{FG}{T}, T_8 = \frac{-EI}{T},$$

$$T_9 = \frac{EG}{T}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 & T_2 & T_3 \\ T_4 & T_5 & T_6 \\ T_7 & T_8 & T_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{res} + X_{|u|u}u|u| + X_{vr}vr + X_{rr}rr + X_{prop} - m[-vr - x_G(r^2)] \\ Y_{res} + Y_{|v|v}v|v| + Y_{r|r}r|r| + Y_{ur}ur + Y_{uv}uv + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_{r_1} - m[ur - y_G(r^2)] \\ N_{res} + N_{v|v}v|v| + N_{r|r}r|r| + N_{ur}ur + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_{r_2} - (m[x_G(ur) - y_G(-vr)]) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Sehingga didapatkan

$$\dot{u} = T_1(U_{surge} + X_{prop}) + T_2(V_{sway} + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_{r_1}) + T_3(R_{yaw} + N_{uu\delta_r}u^2\delta_{r_2}) \quad (9)$$

$$\dot{v} = T_4(U_{surge} + X_{prop}) + T_5(V_{sway} + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_{r_1}) + T_6(R_{yaw} + N_{uu\delta_r}u^2\delta_{r_2}) \quad (10)$$

$$\dot{r} = T_7(U_{surge} + X_{prop}) + T_8(V_{sway} + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_{r_1}) + T_9(R_{yaw} + N_{uu\delta_r}u^2\delta_{r_2}) \quad (11)$$

$$\text{dengan } U_{surge} = X_{res} + X_{|u|u}|u| + X_{vr}vr + X_{rr}rr - m[-vr - x_G(r^2)]$$

$$V_{sway} = Y_{res} + Y_{|v|v}|v| + Y_{r|r}|r| + Y_{ur}ur + Y_{uv}uv - m[ur - y_G(r^2)]$$

$$R_{yaw} = N_{res} + N_{|v|v}|v| + N_{r|r}|r| + N_{ur}ur + N_{uv}uv - (m[x_G(ur) - y_G(-vr)])$$

4.1 Perancangan Sistem Kendali Surge

Dalam merancang kontrol input dari gerak *surge* terlebih dahulu ditentukan *tracking error* dari surge sebagai berikut:

$$\tilde{u} = u - u_d \quad u_d = \text{konstan}$$

Karena sistem berorde 1 maka dibentuk fungsi *switching* sebagai berikut :

$$S_1(u, t) = \left(\frac{d}{dt}\right)^{n-1} \tilde{u} \quad \text{dengan } n=1$$

$$S_1(u, t) = \tilde{u} = u - u_d$$

Sedangkan turunan dari S_1 adalah :

$$\dot{S}_1(u, t) = \dot{u} - \dot{u}_d \quad (12)$$

Karena $u_d = \text{konstan}$ maka $\dot{u}_d = 0$

Dengan mensubstitusikan persamaan (9) ke (12), menjadi :

$$\dot{S}_1(u, t) = T_1(U_{surge} + X_{prop}) + T_2(V_{sway} + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r) + T_3(R_{yaw} + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r) \quad (13)$$

Selanjutnya ditentukan nilai \hat{X}_{prop} dari persamaan (4.232) dengan nilai $\dot{S} = 0$

$$T_1(U_{surge} + X_{prop}) + T_2(V_{sway} + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r) + T_3(R_{yaw} + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r) = 0 \quad (14)$$

Sehingga didapat \hat{X}_{prop} adalah

$$\hat{X}_{prop} = -\frac{T_1(U_{surge}) + T_2(V_{sway} + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r) + T_3(R_{yaw} + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r)}{T_1} \quad (15)$$

Berdasarkan *control law* yang memenuhi kondisi *sliding* adalah:

$$X_{prop} = \hat{X}_{prop} - K \operatorname{sgn}(S_1) \quad (16)$$

Maka dari persamaan (15) dan (16) diperoleh :

$$X_{prop} = -\frac{T_1(U_{surge}) + T_2(V_{sway} + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r) + T_3(R_{yaw} + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r)}{T_1} - K \operatorname{sgn}(S_1) \quad (17)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (17) ke (13), diperoleh :

$$\dot{S}_1(u, t) = -T_1 K_1 \operatorname{sgn}(S_1) \quad (18)$$

Kemudian akan dirancang nilai K dengan cara mensubstitusikan persamaan (18) ke dalam persamaan (19) agar memenuhi kondisi *sliding* yaitu :

$$S_1 \dot{S}_1 \leq -\eta |S_1| \quad (19)$$

Sehingga didapatkan

$$K_1 \geq \frac{\eta}{T_1 \operatorname{sgn}(S_1)} \quad (20)$$

Dari persamaan (20) diperoleh bahwa nilai K_1 adalah :

$$K_1 = \left| \max \frac{\eta}{T_1} \right| \quad (21)$$

Kemudian digunakan suatu *boundary layer* untuk meminimalkan *chattering* dengan mengubah fungsi *signum* (sgn) menjadi fungsi *saturasi* (sat) sebagai berikut:

$$X_{prop} = \hat{X}_{prop} - K_1 \text{sat} \left(\frac{S_1}{\phi} \right) \quad (22)$$

Dengan demikian rancangan pengendali yang diperoleh dari mensubstitusikan persamaan (15) dan (21) ke persamaan (22) adalah sebagai berikut:

$$X_{prop} = - \frac{T_1(U_{surge}) + T_2(V_{sway} + Y_{uu\delta_r} u^2 \delta_r) + T_3(R_{yaw} + N_{uu\delta_r} u^2 \delta_r)}{T_1} - \left| \max \frac{\eta}{T_1} \right| \text{sat} \left(\frac{S_1}{\phi} \right) \quad (23)$$

4.2 Perancangan Sistem Kendali Gerak Sway dan Yaw

Prosedur dalam merancang kontrol input gerak *sway* dan *yaw* memiliki kesamaan dengan kontrol input surge, dimana fungsi *switching* dari Gerak Sway dan Yaw pada persamaan (24) dan (25) adalah sebagai berikut:

$$S_2(v, t) = \tilde{v} = v - v_d \quad (24)$$

$$S_3(r, t) = \tilde{r} = r - r_d \quad (25)$$

Rancangan sistem pengendali untuk gerak sway adalah sebagai berikut:

$$\delta_{r_1} = - \left(\frac{-(T_4(U_{surge} + X_{prop}) + T_5(V_{sway}) + T_6(R_{yaw}))}{(T_5 Y_{uu\delta_r} + T_6 N_{uu\delta_r}) u^2} \right) - K_2 \text{sat} \left(\frac{S_2}{\phi} \right) \quad (26)$$

Dengan

$$K_2 = \left| \max \frac{\eta}{u^2 (T_5 Y_{uu\delta_r} + T_6 N_{uu\delta_r})} \right|$$

Sedangkan rancangan sistem pengendali untuk gerak yaw adalah sebagai berikut

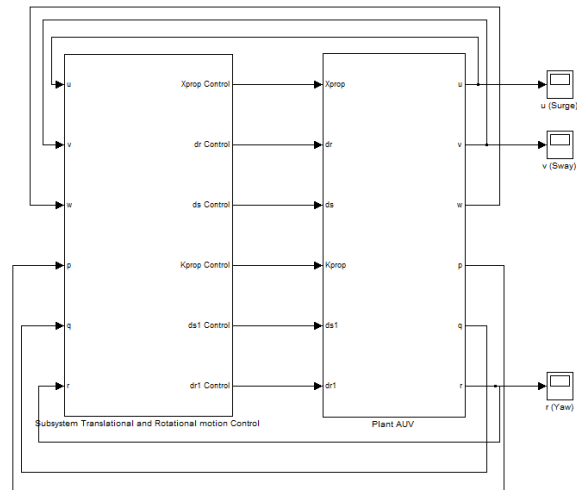
$$\delta_{r_2} = - \left(\frac{(T_7(U_{surge} + X_{prop}) + T_8(V_{sway}) + T_9(R_{yaw}))}{(T_8 Y_{uu\delta_r} + T_9 N_{uu\delta_r}) u^2} \right) - K_3 \text{sat} \left(\frac{S_3}{\phi} \right) \quad (27)$$

Dengan

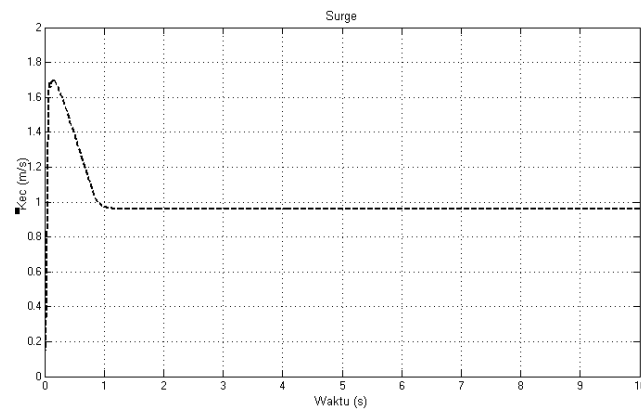
$$K_3 = \left| \max \frac{\eta}{(T_8 Y_{uu\delta_r} + T_9 N_{uu\delta_r}) u^2} \right|$$

5 Hasil Simulasi dan Analisa

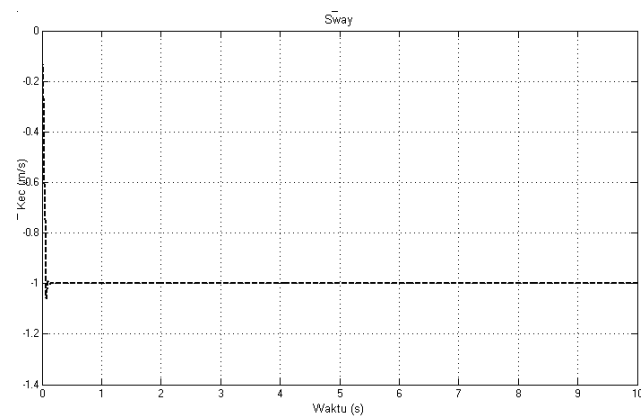
Setelah rancangan sistem kendali SMC pada model nonlinear 3-DOF diperoleh, selanjutnya disimulasikan pada simulink Matlab. Sistem pengendali ini dirangkai pada blok diagram dengan AUV berupa lup tertutup yang tampak pada Gambar 3. Setelah sistem kendali SMC dan AUV disimulasikan maka menghasilkan respon untuk gerak surge, sway dan yaw yang tampak pada Gambar 4, Gambar 5 dan Gambar 6.



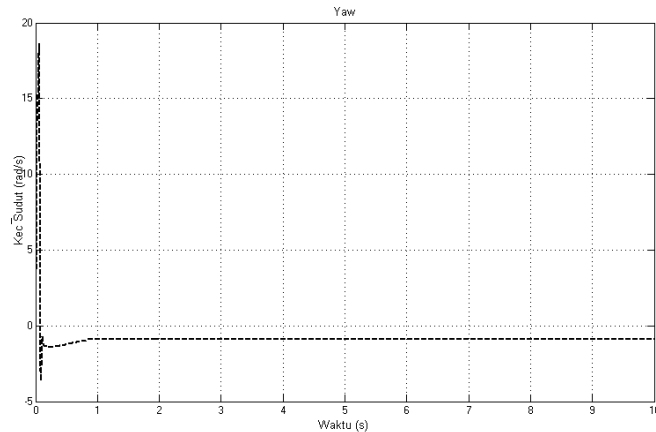
Gambar 3. Blok Diagram AUV model nonlinear 3-DOF dengan Sistem Kendali SMC



Gambar 4. Respon Gerak Surge dengan Sistem Kendali SMC



Gambar 5. Respon Gerak Sway dengan Sistem Kendali SMC



Gambar 6. Respon Gerak Yaw dengan Sistem Kendali SMC

Pada Gambar 4 merupakan hasil respon SMC untuk gerak surge, dimana respon gerak surge stabil pada setpoint 1 m/s dan dapat mencapai kestabilan pertama kalinya (*settling time*) pada waktu 0.9 sekon dan memiliki error kecepatan 0.03%, dimana merepresentasikan kesalahan antara setpoint dengan posisi stabil. Sedangkan grafik pada Gambar 5 merepresentasikan hasil respon SMC untuk gerak sway. Tampak bahwa respon gerak roll pada setpoint -1 m/s dan dapat mencapai *settling time* 0.1 sekon dan memiliki error kecepatan 0.04% serta mencapai maksimum *overshoot* -1,1 m/s. Grafik pada Gambar 6 menunjukkan hasil respon SMC untuk gerak yaw. Tampak bahwa respon gerak yaw pada setpoint -1 rad/s yang mencapai *settling time* 0.2 sekon dan memiliki error kecepatan 0.5% serta mencapai maksimum *overshoot* -4 rad/s.

6 Kesimpulan

Untuk Berdasarkan hasil dan pembahasan terkait perancangan sistem kendali Sliding Mode Control (SMC) untuk gerak *surge*, *sway* dan *yaw* kajian yang merupakan model nonlinear 3-DOF dapat disimpulkan bahwa metode SMC dapat digunakan sebagai sistem kendali gerak dalam tiga derajat kebebasan (3-DOF) yang menghasilkan akurasi yang baik dengan error 0.03% untuk gerak *surge* dan 0.04% untuk gerak *sway* serta 0.5% untuk gerak *yaw*.

7 Daftar Pustaka

- [1] Herlambang, T., Nurhadi H and Subchan., 2014, "Preliminary Numerical Study on Designing Navigation and Stability Control Systems for ITS AUV", *Applied Mechanics and Materials* Vol. 493 (2014) pp 420-425 Trans Tech Publications, Switzerland.
- [2] 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 IREME Journal*, Vol. 9, No. 6. Pp. 553-560, ISSN 1970 – 8734. Nov.

- [3] Ermayanti, E., Aprilini, E., Nurhadi H, and Herlambang T, 2015, “Estimate and Control Position Autonomous Underwater Vehicle Based on Determined Trajectory using Fuzzy Kalman Filter Method”, *International Conference on Advance Mechatronics, Intelligent Manufactre, and Industrial Automation (ICAMIMIA)-IEEE Surabaya Indonesia*, 15 – 16 Oktober 2015.
- [4] Herlambang, T., Djatmiko E.B and Nurhadi H., 2015, “Navigation and Guidance Control System of AUV with Trajectory Estimation of Linear Modelling”, *Proc. of International Conference on Advance Mechatronics, Intelligent Manufactre, and Industrial Automation, IEEE, ICAMIMIA 2015, Surabaya, Indonesia*, pp. 184-187, Oct 15 – 17.
- [5] Yang, C. 2007. *Modular Modelling and Control for Autonomous Vehicle (AUV)*. Department of Mechanical Engineering National University of Singapore.
- [6] Oktafianto, K., Herlambang T., Mardlijah, Nurhadi H., 2015, “Design of Autonomous Underwater Vehcle Motion Control Using Sliding Mode Control Method”, *International Conference on Advance Mechatronics, Intelligent Manufactre, and Industrial Automation (ICAMIMIA)-IEEE Surabaya Indonesia*, 15 – 16 Oktober 2015.
- [7] Herlambang, T., Nurhadi H, and Djatmiko E.B., 2016, “Optimasi Model Linier 6-DOF pada Sistem Autonomous Underwater Vehicle”, *Seminar Nasional Maritim, Sain dan Teknologi Terapan (MASTER) PPNS Surabaya Indonesia*, 21 November 2016.
- [8] Herlambang, Teguh. 2010, “Desain Pengendalian Ketinggiam Air dan Temperatur Uap pada Sistem Steam Drum Boiler dengan Metode Sliding Mode Control”, *Tugas Akhir, Jurusan Matematika FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya*.
- [9] Herlambang, T., Apriliani E, Cordova H, Mardlijah., 2011, “Desain Pengendalian Ketinggian Air dan Temperatur Uap pada Sistem *Steam Drum Boiler* dengan menggunakan Sliding Mode Control (SMC)”, *Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan, dan Penerapan MIPA Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta*, 14 Mei 2011.
- [10] Fossen, T. I. 2005, “A Nonlinear Unified State-space Model for Ship Maneuvering and Control in A Seaway”. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 5, pp. 2717-2746, Aug
- [11] Herlambang, T., Apriliani E, Cordova H, Mardlijah., 2011, “Dynamic Sliding Mode Control (DSMC) Untuk Sistem Kendali Water Level Pada Steam Drum Boiler”, *Technology Science and Engineering Journal*, Vol 1 No 1 February 2017. E-ISSN: 2549-1601X.