

Perancangan Sistem Pengaturan Kestabilan *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) untuk Gerak Lateral Menggunakan *Sliding Mode Control* (SMC)

Septian Ainur Rofiq¹, Rusdhianto Effendie. AK², dan Aries Sulisetyono³.

^{1,2}Jurusan Teknik Elektro, ³Jurusan Teknik Perkapalan, ^{1,2}Fakultas Teknologi Industri, ³Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

e-mail: ²ditto@ee.its.ac.id, ³sulisea@na.its.ac.id

Abstrak—*Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) merupakan kendaraan bawah air yang dapat bergerak tanpa kendali manusia dan bermanuver sesuai dengan perintah yang diberikan. AUV memiliki kemampuan manuver yang dinamis untuk melacak lintasan. Kemampuan AUV mencakup untuk beroperasi di daerah yang memiliki dinamika *nonlinear* dan belum dapat diprediksi. Sehingga dibutuhkan model kontrol berbasis *nonlinear* untuk meningkatkan kemampuan dan misi AUV. Gerak lateral merupakan salah satu bentuk pergerakan AUV di dalam air. AUV dijaga agar tetap stabil pada lintasan dan kedalaman yang dikehendaki. Pengaturan kestabilan AUV di dalam air pada gerak lateral menggunakan metode *Sliding Mode Control* (SMC) diharapkan agar respon yang diperoleh menyerupai input referensi sistem *linear* orde satu dan tetap stabil pada koordinat lintasan yang telah ditentukan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa SMC dapat mempertahankan kestabilan AUV tetap pada lintasan yang telah ditentukan pada 0 radian dengan osilasi maksimal pada lintasan persegi, segitiga dan jajaran genjang sebesar 0,19 radian atau sekitar 10,89°.

Kata Kunci— AUV, Kestabilan, Gerak Lateral, SMC.

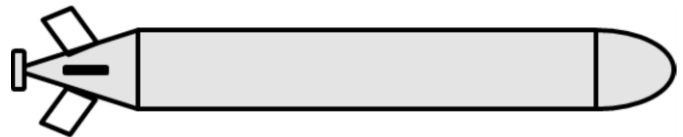
I. PENDAHULUAN

AUV pertama kali dibuat pada tahun 1950 di laboratorium fisika terapan Universitas Washington. AUV tersebut digunakan untuk mendapatkan data oseanografi di bawah air es [1].

Pada tahun 1984, sebuah lembaga penelitian yaitu Martin Marietta Aero and Naval System memulai program penelitian dan pengembangan yang diarahkan untuk pengembangan teknologi AUV. Program tersebut fokus pada kontrol dinamis AUV. Tujuan utamanya adalah pengembangan *flight control system* yang dapat meningkatkan kemampuan misi AUV[2].

AUV memerlukan kestabilan yang kuat untuk berbagai lingkungan dan dinamika *nonlinear* di dalam air, sehingga dibutuhkan algoritma untuk mengatur kestabilan AUV. AUV memiliki karakteristik mudah terganggu dengan kondisi lingkungan.

Melalui tugas akhir yang berjudul “Pengaturan Kestabilan *Autonomous Underwater Vehicle* untuk Gerak Lateral Menggunakan *Sliding Mode Control*” diharapkan dapat menangani masalah pengaturan kestabilan gerak AUV di dalam air yang *nonlinear*.



Gambar. 1 AUV Berbentuk Torpedo Dilihat Dari Samping

II. TOERI DASAR

A. Pergerakan AUV

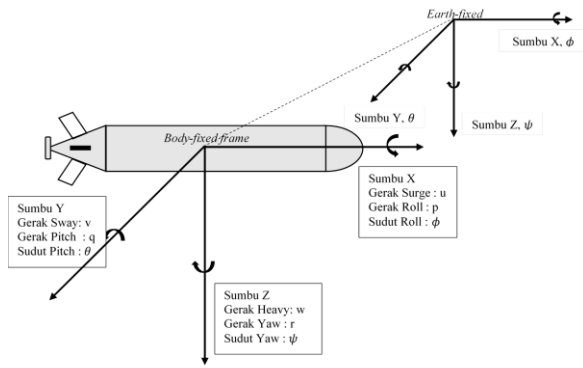
AUV yang digunakan memiliki bentuk seperti torpedo dengan sebuah *propeller* yang terpasang di belakang, satu pasang sirip kiri dan kanan pada bagian belakang untuk bergerak naik turun di dalam air, dan satu pasang *rudder* atas bawah pada bagian belakang sebagai kemudi untuk bergerak ke kanan dan kiri, seperti ditunjukkan pada gambar 1.

AUV dapat bergerak maju dan mengerem dengan memutar *propeller* belakang, searah atau berlawanan dengan arah putaran jarum jam, sedangkan bergerak ke kanan dan ke kiri pada saat berjalan digunakan *rudder* belakang. Untuk bergerak naik ke atas dari dalam air atau turun ke bawah dari permukaan air pada saat berjalan digunakan sirip belakang. AUV dapat berguling dengan menggerakkan kedua sirip secara berlawanan, gerak berguling ini biasa disebut dengan istilah gerak *roll*.

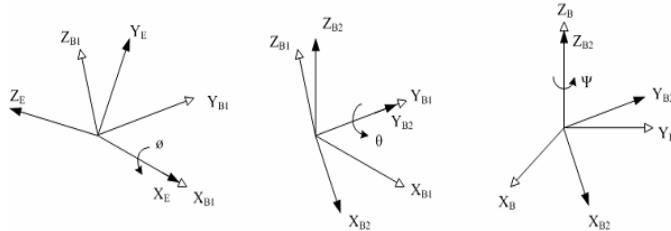
B. Pemodelan AUV[3]

AUV memiliki 2 kerangka sistem koordinat, yaitu kerangka bumi dan kerangka badan atau sering disebut dengan istilah *Earth-Fixed Frame* (EFF) dan *Body-Fixed Frame* (BFF). Dua kerangka tersebut digunakan sebagai acuan untuk menentukan persamaan umum dan menggambarkan pergerakan AUV.

η merupakan vektor posisi dan orientasi pada koordinat *earth-fixed*, v merupakan vektor kecepatan *linear* dan angular pada koordinat *body-fixed*, dan τ merupakan gaya dan momen yang bekerja pada kerangka *body-fixed*, ditunjukkan dalam Persamaan 1 dan 2.



Gambar. 2 Kerangka Sistem Koordinat AUV



Gambar. 3 Sumbu Koordinat x, y, z diputar terhadap kerangka *earth-fixed*

$$\begin{aligned} \eta &= [\eta_1 \quad \eta_2]^T \\ v &= [v_1 \quad v_2]^T \\ \tau &= [\tau_1 \quad \tau_2]^T \end{aligned} \tag{1}$$

Entri Persamaan 1 ditunjukkan pada Persamaan 2

$$\begin{aligned} \eta_1 &= [x \quad y \quad z]^T & \eta_2 &= [\phi \quad \theta \quad \psi]^T \\ v_1 &= [u \quad v \quad w]^T & v_2 &= [p \quad q \quad r]^T \\ \tau_1 &= [X \quad Y \quad Z]^T & \tau_2 &= [K \quad M \quad N]^T \end{aligned} \tag{2}$$

1. Kinematika AUV

Persamaan kinematika AUV dengan acuan koordinat *earth-fixed* ditunjukkan dalam Persamaan 3

$$\dot{\eta} = J_1(\eta_2)v_1 \tag{3}$$

di mana

$$\dot{\eta}_1 = [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z}] \tag{4}$$

$J_1(\eta_2)$ adalah matriks transformasi sudut Euler. Sumbu koordinat x, y, z diputar terhadap kerangka *earth-fixed* seperti pada gambar 3, maka akan menghasilkan matriks pada Persamaan 5.

$$C_{x\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & s\phi \\ 0 & -s\phi & c\phi \end{bmatrix} \quad C_{y\theta} = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & -s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \quad C_{z\psi} = \begin{bmatrix} c\psi & s\psi & 0 \\ -s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

Kombinasi 3 putaran pada sumbu koordinat, diperoleh matriks $J_1(\eta_2)$ seperti pada Persamaan 6.

$$\begin{bmatrix} c\psi s\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta + s\phi s\theta s\psi & -c\psi s\theta + s\theta s\psi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \tag{6}$$

di mana

$$s = \sin$$

$$c = \cos$$

2. Dinamika AUV

Berdasarkan hukum Newton 2, diperoleh persamaan gerak AUV yang diasumsikan sebagai benda tegar, jumlah gaya yang bekerja samadengan *massa* dikali dengan percepatan benda, dituliskan dalam persamaan matematika ditunjukkan pada Persamaan 8.

$$\begin{aligned} \sum \tau &= m \cdot a \\ \sum \tau_1 &= m(\dot{v}_1 + v_2 \times v_1 + \dot{v}_2 \times r_G + v_2 \times (v_2 \times r_G)) \end{aligned} \tag{8}$$

$$\sum \tau_2 = I_o \dot{v}_2 + v_2 \times (I_o v_2) + m r_G \times (\dot{v}_1 + v_2 \times v_1)$$

di mana

m = massa total dari AUV (kg)

a = percepatan (m/s^2)

I_o = inersia tensor AUV yaitu berupa matrik simetri yang definit positif ($kg.m^2$)

Hasil dari penjabaran persamaan umum gerak 6 *degree of freedom* (DOF) diperoleh 3 persamaan untuk gerak translasi yaitu *surge, sway, heave* dan 3 persamaan untuk gerak rotasi yaitu *roll, pitch, yaw* ditunjukkan Persamaan 9.

$$\begin{aligned} X &= m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] \\ Y &= m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(pq + \dot{r})] \\ Z &= m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rp + \dot{p})] \\ K &= I_{xx} \dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] \\ M &= I_{yy} \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wp) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] \\ N &= I_{zz} \dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{w} - vr + wp)] \end{aligned} \tag{9}$$

3. Gaya Hidrodinamika

Dalam proses pemodelan dinamika AUV gaya hidrodinamika merupakan gaya yang paling sulit untuk dicari. Gaya hidrodinamika berhubungan dengan kecepatan dan percepatan. Gaya hidrodinamika ditentukan berdasarkan koefisien yang relevan dari gaya-gaya tersebut.

Koefisien gaya hidrodinamika dihitung melalui pendekatan empiris jika sudah diketahui kecepatan dan percepatan selama bergerak. Gaya hidrodinamika pada AUV dapat dibagi menjadi 3, yaitu gaya hambat (*drag force*), gaya angkat (*lift force*), dan gaya *added mass* (*added mass force*).

a) Gaya Hambat (*Drag Force*)

Gaya *drag* merupakan gaya yang menolak gerakan benda pada saat melalui cairan. Gaya *drag* terdiri dari gaya gesek dan gaya tekan. Gaya *drag* dibagi menjadi 4 bagian, yaitu radiasi induksi, gesekan kulit, gaya tarik gelombang, dan gaya tarik akibat *vortex medding*.

Gaya yang akan dihitung merupakan gaya *drag* yang sejajar dengan sumbu x yang merupakan hambatan aksial, dan gaya *drag* yang tegak lurus dengan sumbu x yang merupakan hambatan *crossflow*. Ketika AUV bergerak 6 DOF, gaya

hidrodinamik sangat tidak *linear*. Gaya *drag* dicari menggunakan Persamaan 10

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D A_f V^2 \quad (10)$$

Dengan

ρ = massa jenis cairan

C_D = koefisien gaya *drag*

A_f = luas penampang yang menimbulkan gaya *drag*

V = kecepatan aliran cairan

b) *Gaya Angkat (Lift Force)*

Ketika AUV berpindah melalui cairan dan membentuk sudut terhadap cairan tersebut, maka cairan akan terpisah. Tekanan di atas permukaan AUV menurun dan tekanan di bawah permukaan AUV meningkat. Daya angkat yang dibangkitkan tegak lurus terhadap aliran air yang mengenai bagian luar AUV. Jika titik angkat efektif yang digunakan tidak tepat pada koordinat *body-fixed*, maka akan terjadi momen. Besarnya gaya dan momen *lift* dicari menggunakan Persamaan 11.

$$L = \frac{1}{2} \rho C_L A_f V^2 \text{ dan } M = \frac{1}{2} \rho C_M A_f V^2 \quad (11)$$

ρ = massa jenis cairan

C_L = koefisien gaya *lift*

C_M = koefisien momen *lift*

A_f = luas penampang yang menimbulkan gaya *drag*

V = kecepatan aliran cairan

c) *Gaya Added Mass (Added Mass Force)*

Pada dinamika fluida, sebuah percepatan atau perlambatan benda akan memindahkan volume yang menempati cairan pada perpindahan akhir. Karena objek dan cairan tidak dapat menempati ruang fisik yang sama secara simultan. Pada saat AUV berpindah, cairan juga akan menambah gaya untuk berpindah secara bersamaan. Fenomena tersebut samadengan menambah inersia pada AUV, penambahan inersia disebut dengan istilah gaya *added mass*. Besarnya gaya dan momen *added mass* dicari menggunakan Persamaan 12.

$$F_a = \int_{S_B} P \cdot n \cdot dS \text{ dan } M_a = \int_{S_B} P(r \times n) dS \quad (12)$$

Dengan

P = tekanan pada permukaan dS

n = vektor normal

r = posisi vektor pada dS

S_B = keseluruhan daerah diluar lintasan AUV

4. *Sliding Mode Control (SMC)*[5]

SMC merupakan metode pengontrolan menggunakan pengaturan *switch* berkecepatan tinggi untuk menggerakkan lintasan *state* dari sebuah *plant* menuju permukaan luncur atau *sliding surface*. Proses untuk mengarahkan *state plant* menuju *sliding surface* disebut dengan istilah *reching mode*.

Proses untuk mempertahankan *state plant* tetap pada lintasannya disebut dengan *sliding mode*. *Hitting time* adalah waktu yang dibutuhkan oleh *state trajectory* sebuah sistem dari kondisi awal menuju permukaan luncur yang telah

ditentukan. *Chattering* adalah perubahan sinyal kontrol dengan frekuensi tinggi yang timbul akibat fungsi *switch* pada aksi kontrol, sehingga untuk mengurangi perubahan sinyal kontrol tersebut dilakukan perubahan pada nilai sinyal kontrol.

a) *Permukaan Luncur (Sliding Surface)*

Sebuah sistem *linear* dinyatakan dalam Persamaan 13 dalam persamaan *state*

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (13)$$

Sinyal kontrol sesuai dengan Persamaan 14

$$u = -kx \quad (14)$$

Substitusi Persamaan 14 ke dalam persamaan 13 sehingga diperoleh persamaan sistem *loop* tertutup pada Persamaan 15.

$$\dot{x}(t) = (A - Bk)x(t) \quad (15)$$

Sliding surface dipilih dengan mempertimbangkan lintasan *state* dapat menuju permukaan luncur dalam waktu yang terbatas dan *state* sistem dapat bertahan pada *sliding surface*. Persamaan *sliding surface* dinyatakan dalam Persamaan 13.

$$s(x, t) = G \left[x(t) - x(0) - \int_0^t \dot{x}(\tau) d\tau \right] \quad (16)$$

$s(x, t) = 0$ dan $x(0)$ merepresentasikan posisi awal dari $x(t)$, matrik G dipilih agar $GB \neq 0$ agar dapat dicari inversnya.

b) *Sinyal Kontrol SMC*

Sinyal kontrol pada SMC terdiri dari 2 jenis, yaitu sinyal ekuivalen dan sinyal kontrol natural. Sinyal kontrol ekuivalen merupakan sinyal kontrol yang berfungsi memaksa *state* menuju permukaan luncur. Sinyal kontrol ekuivalen diperoleh dari turunan persamaan permukaan luncur yaitu $\dot{s} = 0$. Substitusi persamaan $\dot{s} = 0$ dan Persamaan 12 ke dalam Persamaan 13, sehingga diperoleh Persamaan 17.

$$\dot{s}(x, t) = G[(Ax(t) + Bu(t)) - (A - Bk)x(0)] = 0 \quad (17)$$

Dengan

$$U_{eq}(t) = (GB)^{-1} GBk(t) \quad (18)$$

Turunan permukaan luncur ditunjukkan pada Persamaan 19

$$\dot{s}(x, t) = GBU_n(t) = U_n^*(t) \quad (19)$$

Sinyal kontrol *natural* merupakan sinyal kontrol yang mempertahankan *state* pada *sliding surface* atau permukaan luncur. Untuk mendesain sinyal kontrol *natural* menggunakan analisa kestabilan Lyapunov. Persamaan kestabilan Lyapunov ditunjukkan pada Persamaan 20.

$$v(t) = \frac{1}{2} s^2 \quad (20)$$

kemudian Persamaan 20 diturunkan menjadi Persamaan 21

$$\dot{v}(t) = s \cdot \dot{s} \quad (21)$$

Syarat kestabilan Lyapunov terpenuhi jika $\dot{v}(t) = 0$, sehingga diperoleh nilai $\dot{v}(t) < 0$, atau $s \cdot \dot{s} < 0$, atau $s \cdot U_n^* < 0$.

Dapat dituliskan pada persamaan 22.

$s < 0$, maka $U_n^* > 0$

$s > 0$, maka $U_n^* < 0$

$$(22)$$

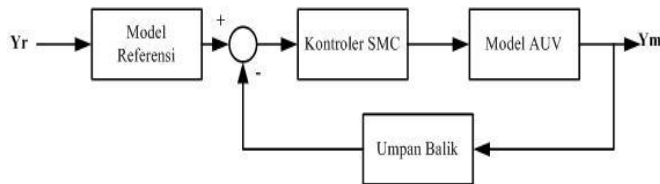
Sehingga akan terjadi aksi untuk mempertahankan lintasan *state* tetap berada pada permukaan luncur atau *sliding surface*.

Rumus sinyal kontrol natural ditunjukkan pada Persamaan 23

$$U_n(t) = -q \operatorname{sgn}(s) \quad (23)$$

Untuk mengurangi *chattering*, fungsi *diskontinyu signum* diganti dengan fungsi saturasi, sehingga rumus sinyal kontrol natural seperti pada Persamaan 24

$$U_n(t) = -q \operatorname{sat}(s, \varepsilon) \quad (24)$$



Gambar. 4 Diagram Blok Sistem Keseluruhan

Penjumlahkan sinyal kontrol ekivalen dengan sinyal kontrol natural diperoleh persamaan sinyal kontrol pada Persamaan 25

$$U(t) = -kx - q \text{ sat}(s, \varepsilon) \tag{25}$$

III. PERANCANGAN SISTEM

A. Gambaran Sistem

AUV merupakan benda tegar yang dapat bergerak di dalam air dan memiliki 6 DOF. 3 DOF untuk gerak rotasi dan 3 DOF untuk gerak translasi. Diagram blok sistem yang ingin dibangun ditunjukkan pada gambar 4.

AUV yang digunakan berbentuk kapal selam mini yang dibuat oleh Universitas Queensland, menyerupai bentuk seperti torpedo dengan panjang 1,5 m, diameter 0,15 m. AUV tersebut telah diuji dan diperoleh parameter-parameternya[4].

B. Model Matematika AUV

AUV diidentifikasi secara fisik, sehingga diperoleh model dinamika yang menyatakan 6 DOF AUV. 6 DOF tersebut adalah gerak *yaw*, *pitch*, *roll*, *surge*, *sway* dan *heave*. Model tersebut dinyatakan dalam persamaan *state* seperti ditunjukkan pada Persamaan 26. AUV tersebut memiliki parameter ditunjukkan pada tabel 1

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{u} \\ \dot{y} \\ \dot{v} \\ \dot{z} \\ \dot{w} \\ \dot{\phi} \\ \dot{p} \\ \dot{\theta} \\ \dot{q} \\ \dot{\psi} \\ \dot{r} \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \tau_X \\ 0 \\ \frac{1}{m} \tau_Y \\ 0 \\ \frac{1}{m} \tau_Z \\ 0 \\ \frac{1}{I_{xx}} \tau_K \\ 0 \\ \frac{1}{I_{yy}} \tau_M \\ 0 \\ \frac{1}{I_{zz}} \tau_N \end{bmatrix} \tag{26}$$

$$\begin{bmatrix} u \\ vr - wq + x_G(q^2 + r^2) - y_G(pq - \dot{r}) - z_G(pr + \dot{q}) \\ v \\ wp - ur + y_G(r^2 + p^2) - z_G(qr - \dot{p}) - x_G(pq + \dot{r}) \\ w \\ uq - vp + z_G(p^2 + q^2) - x_G(rp - \dot{q}) - y_G(rp + \dot{p}) \\ p \\ \frac{1}{I_{xx}} (m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] - (I_{zz} - I_{yy})qr) \\ q \\ \frac{1}{I_{yy}} (m[z_G(\dot{u} - vr + wp) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] - (I_{xx} - I_{zz})rp) \\ r \\ \frac{1}{I_{zz}} (m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{w} - vr + wp)] - (I_{yy} - I_{xx})pq) \end{bmatrix}$$

Tabel 1.
Parameter Utama AUV

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Massa	m	18.826	Kg
Momen inersia X	Ixx	0.0727	Kg.m ²
Momen inersia Y dan Z	Iyy = Izz	1.77	Kg.m ²
Panjang	L	1.391	m
Diameter lambung	R	0.076	m
Jarak fin dengan pusat berat	Xfin	0.537	m
Jarak Pusat Massa dengan Pusat Gravitasi	[Xg, Yg, Zg]	[-0.0012 0 0.0048]	m
Gaya Buoyancy	B	184.6793	Kg.m/s ²

C. Perancangan SMC

Kontroler berfungsi untuk mengatur sistem agar memiliki *output* sesuai dengan *input* referensi yang diberikan. Kontroler yang digunakan adalah SMC, diharapkan *output* sistem yang dihasilkan dapat mengikuti lintasan yang diberikan. Kontroler yang digunakan untuk mengatur pergerakan lateral AUV.

Output sistem diharapkan menyerupai *output* sistem orde 1 dengan persamaan fungsi alih $\frac{1}{\tau_s + 1}$. Dilakukan substitusi *output* AUV dengan sistem yang dijadikan referensi $Y \equiv Y_m$ dinyatakan pada Persamaan 27.

$$Y_m = \frac{1}{\tau_s + 1} Y_r \tag{27}$$

Diperoleh persamaan *error* $Y_r - Y_m$ ditunjukkan pada Persamaan 28.

$$e = \frac{\tau_s}{\tau_s + 1} Y_r \tag{28}$$

Pada saat \dot{Y}_r dalam keadaan stabil, maka $\dot{Y}_r = 0$, sehingga Persamaan *error* dapat dinyatakan pada Persamaan 29.

$$\tau \dot{e} + e = 0 \tag{29}$$

Jika $\tau = \frac{1}{\alpha}$, diperoleh persamaan untuk *sliding surface* ditunjukkan persamaan 30.

$$s = \dot{e} + \alpha e \tag{30}$$

Gerak lateral AUV dinyatakan dalam Persamaan 31.

$$\dot{r} = -\frac{(I_{yy} - I_{xx})}{I_{zz}} pq + \frac{m}{I_{zz}} [x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{w} - vr + wp)] + \frac{1}{I_{zz}} \tau_N \tag{31}$$

Persamaan 28 dilakukan *linearisasi* terhadap *deflexion rudder* $\frac{\psi(s)}{\delta_r(s)}$, diperoleh persamaan fungsi alih orde 2 yang memiliki persamaan umum seperti ditunjukkan pada Persamaan 32.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{as^2 + bs + 1} \tag{32}$$

Parameternya ditunjukkan pada Persamaan 33

$$G(s) = \frac{\psi(s)}{\delta_r(s)} = \frac{\left(\frac{2N_{uu}\delta_r}{N_{uv}}\right)}{\left(\frac{I_{zz} - N_{\dot{r}}}{N_{uv}V^2}\right)s^2 + \left(\frac{-mX_g - N_{ur}}{N_{uv}V}\right)s + 1}$$

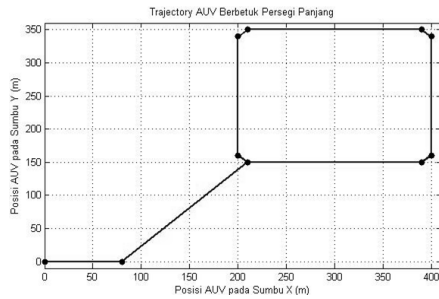
$$K = \frac{2N_{uu}\delta_r}{N_{uv}} = 2.9184$$

$$a = \frac{I_{zz} - N_{\dot{r}}}{N_{uv}V^2} = -0.4223$$

$$b = \frac{-mX_g - N_{ur}}{N_{uv}} = -0.3563 \tag{33}$$

Tabel 2.
Parameter Manuver AUV

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Momen gaya lift sirip	$N_{uu\delta r}$	-6.08	kg/rad
Momen badan dan sirip	N_{uv}	-24	kg
Gaya added mass	$N_{\dot{r}}$	-4.3	kg.m ² /rad ²
Gaya Added mass silang dan gaya lift sirip	N_{ur}	-4.93	kg.m/rad



Gambar .5 Lintasan AUV dengan Bentuk Persegi

Analisa kestabilan Lyapunov menyatakan sebuah sistem akan stabil jika $\dot{v}(t) = s \cdot \dot{s} = 0$. Hasil perhitungan yang telah dilakukan diperoleh besar sinyal kontrol ditunjukkan pada Persamaan 34.

$$U(t) = U_{eq}(t) + U_n(t) \tag{34}$$

Nilai $U_{eq}(t)$ dan $U_n(t)$ ditunjukkan pada Persamaan 35

$$U_n(t) = \frac{a}{K} W \cdot \text{sign}(\sigma)$$

$$U_{eq}(t) = \frac{1}{K} \left(-cx_1 + \left(\alpha - \frac{b}{a} \right) x_2 + cr + b\dot{r} + a\ddot{r} \right) \tag{35}$$

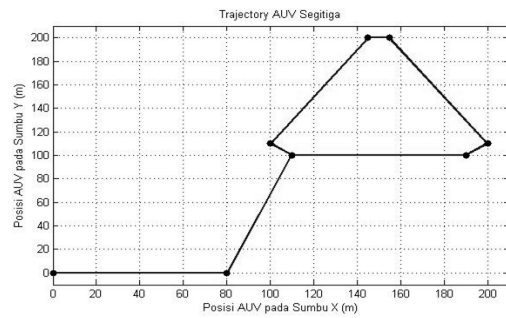
D. Perencanaan Lintasan Gerak Lateral

Koordinat lintasan gerak yang ingin dicapai ada 3 macam lintasan, yaitu berupa lintasan persegi, segitiga dan trapesium. Lintasan dengan bentuk persegi memiliki titik koordinat pada sumbu X = [0 80 210 390 400 400 390 210 200 200 210] dan sumbu Y = [0 0 150 150 160 340 350 350 340 160 150].

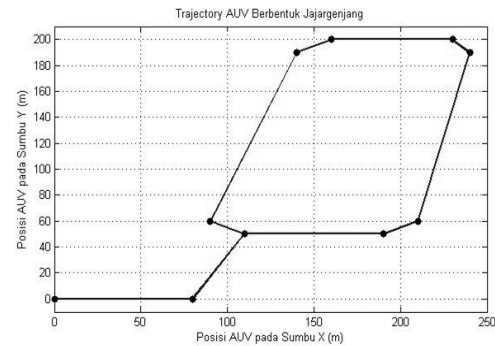
Lintasan dengan bentuk segitiga memiliki titik koordinat pada sumbu X = [0 80 110 190 200 155 145 100 110] dan sumbu Y = [0 0 100 100 110 200 200 110 100]. Lintasan dengan bentuk jajaran genjang memiliki titik koordinat pada sumbu X = [0 80 110 190 210 240 220 160 140 90 110] dan sumbu Y = [0 0 50 50 60 190 200 200 190 60 50]. Lintasan yang ingin dicapai oleh AUV berbentuk persegi, segitiga dan jajaran genjang dapat dilihat pada Gambar 5, 6 dan 7.

E. Perancangan Perangkat Lunak

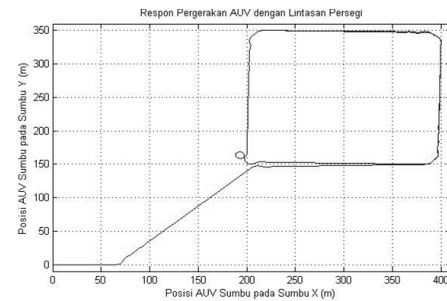
Perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan simulasi sistem dan perancangan kontroler yaitu menggunakan Matlab 2012b.



Gambar. 6 Lintasan AUV dengan Bentuk Segitiga



Gambar.7 Lintasan AUV dengan Bentuk Jajaran Genjang



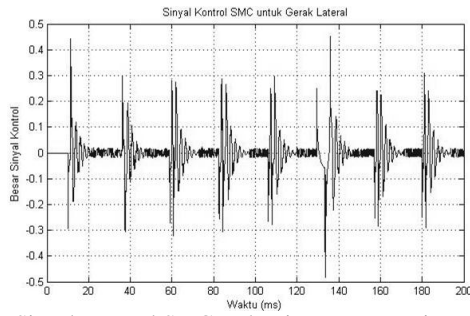
Gambar. 8 Pergerakan AUV pada Sumbu X dan Y dengan kontroler SMC

IV. HASIL SIMULASI DAN ANALISA

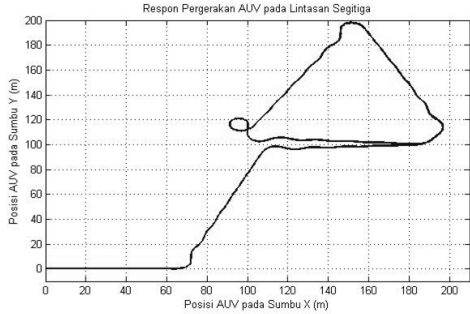
Simulasi yang dilakukan yaitu dengan menjalankan plant yang telah dimodelkan pada perangkat lunak matlab, kemudian diberikan kontroler untuk mengatur agar tetap stabil dan tetap pada lintasan yang diperintahkan.

A. Lintasan Persegi

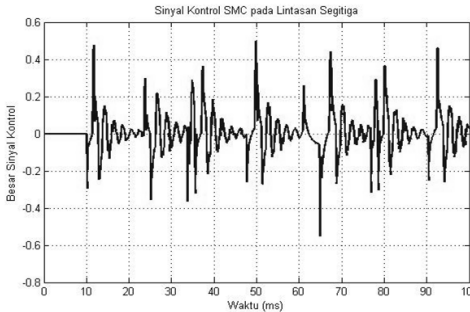
AUV diberikan perintah untuk bergerak menyelam pada kedalaman 10 m, kemudian bergerak melewati koordinat yang diberikan berupa lintasan berbentuk persegi seperti ditunjukkan pada gambar 5, didapatkan respon pergerakan AUV seperti ditunjukkan pada gambar 8. Besar sinyal kontrol yang diberikan dapat dilihat pada gambar 9.



Gambar. 9 Sinyal Kontrol SMC pada Lintasan Persegi



Gambar.10 Pergerakan AUV pada Lintasan Segitiga dengan SMC



Gambar. 11 Sinyal Kontrol SMC pada Lintasan Segitiga

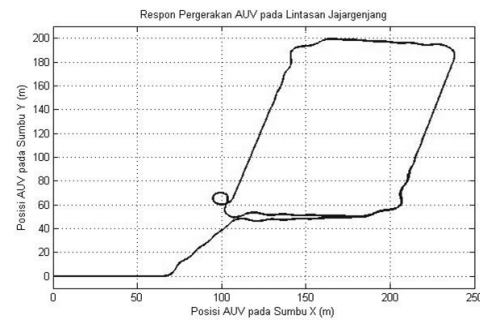
B. Lintasan Segitiga

AUV diberikan perintah untuk bergerak menyelam pada kedalaman 10 m, kemudian bergerak melewati koordinat yang diberikan berupa lintasan berbentuk persegi seperti ditunjukkan pada Gambar 6, didapatkan respon pergerakan AUV seperti ditunjukkan pada Gambar 10.

Besar sinyal kontrol yang diberikan dapat dilihat pada Gambar 11.

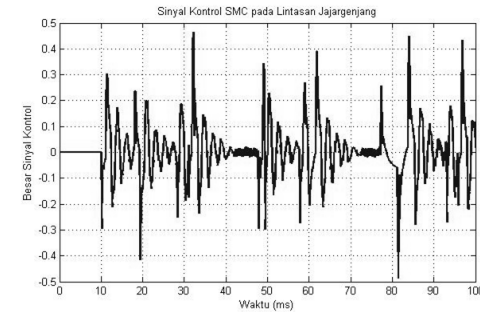
C. Lintasan Jajaran Genjang

AUV diberikan perintah untuk bergerak menyelam pada kedalaman 10 m, kemudian bergerak melewati koordinat yang diberikan berupa lintasan berbentuk persegi seperti ditunjukkan pada Gambar 7, diperoleh respon pergerakan AUV seperti ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar. 12 Pergerakan AUV pada Lintasan Jajaran Genjang dengan SMC

Besar sinyal kontrol yang diberikan dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar. 13 Sinyal Kontrol SMC pada Lintasan Jajaran Genjang

V. KESIMPULAN

Hasil simulasi pergerakan AUV pada lintasan berbentuk persegi, segitiga dan jajaran genjang menggunakan SMC dapat disimpulkan bahwa SMC dapat memaksa pergerakan agar selalu stabil pada lintasannya 0 radian dengan osilasi maksimal pada lintasan persegi, segitiga dan jajaran genjang sebesar 0,19 radian atau sekitar 10,89°.

Besar sinyal kontrol yang diberikan dapat dilihat pada Gambar 9, 11 dan 13 menunjukkan bahwa terjadi *chattering* yaitu perubahan sinyal kontrol dengan frekuensi tinggi yang timbul akibat fungsi *switch* pada aksi kontrol untuk mempertahankan posisi AUV tetap pada lintasan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D.R. Blidberg, "The Development of Autonomous Underwater Vehicles (AUVs); A Brief Summary", 2001
- [2] F. Dougherty, "An autonomous underwater vehicle (auv) flight control system using sliding mode control", Martin Marietta Aero & Naval Systems, CH2585-8/88/0000, IEEE, 1988.
- [3] C. Yang, "Modular modeling and control for autonomous underwater vehicle (AUV)", Thesis Submitted National University Of Singapore, 2007.
- [4] P. Ridley, "Submarine dynamic modeling", School Of Mechanical Engineering, Australia, 2003.
- [5] T. Fatmila, "Kontrol tracking pada sistem pendulum-kereta menggunakan fuzzy-integral sliding mode control", Tugas Akhir, ITS, 2013.