

Research Article

Desain Sistem Kendali pada Ular (UUV) Unmanned Underwater Vehicle

Vega Pradana Rachim¹, Aris Triwiyatno², Budi Setiyono²

1. Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang
2. Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang

Abstract

Unmanned Underwater Vehicle (UUV) is one of the systems that have a complex characteristic. UUV usually used to obtain data, mapping and underwater survey. One of a complexity that UUV have is based on uncertainty and non-linearity of hydrodynamics parameter. Besides that, UUV which studied in this paper have 6 degree of freedom, so it has also a lot parameter. And to handle that, a bigger system need to divide into some sub-system, the divided is based on control needed. To handle a movement of UUV, it's important to build a control system that effective and efficient and a writer choose PID and Sliding-PID (SMC-PID) as a controller Modeling system used to linearize a non-linear system from UUV, linearizing around the equilibrium point. Then make a model into a state space, these state space uses for a controlling. For a control system building and respond system from an UUV movement, MATLAB program is needed

Keywords: UUV, PID control, Sliding-PID, MATLAB Simulink, Linier System

I. PENDAHULUAN

UUV (*Unmanned Underwater Vehicle*) adalah suatu kendaraan bawah laut yang diciptakan untuk membantu manusia mengerjakan pekerjaan-pekerjaan di bawah laut, kendaraan ini termasuk dalam kendaraan tanpa awak. Jenis dari UUV itu sendiri dibagi menjadi 2, yaitu AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) yaitu jenis kendaraan bawah laut tanpa awak yang bergerak secara otomatis, dan ROV (*Remote Operated Vehicle*) yaitu kendaraan bawah laut tanpa awak yang pergerakannya dapat dikendalikan intervensi oleh manusia dari jarak jauh.

Berhubungan dengan tugas akhir ini, penulis akan membahas mengenai sistem kontrol suatu ROV, salah satu jenis ROV yang dikembangkan oleh suatu universitas di Turki, bernama ULISAR [8] semua parameter plant sistem diambil dari ROV tersebut. Pembahasan mengenai sistem kontrol dalam suatu UUV menjadi sangat menarik dan sulit dikarenakan beberapa hal berikut ini, yaitu ke-nonlinierannya, ketidak-pastian koefisien hidrodinamisnya, banyaknya gangguan dari lingkungan laut sendiri, dan juga arus bawah laut yang tidak dapat diprediksi.

Beberapa tahun terakhir telah banyak penelitian-penelitian di berbagai penjuru dunia tentang sistem pengontrolan dari UUV, telah banyak peningkatan bila dilihat dari awal munculnya UUV. Mulai dari yang pengontrolan klasik menggunakan PID [3], lalu berkembang lagi menggunakan SMC (*Sliding Mode Control*) [4,5], *fuzzy*, *adaptive*, dan yang terbaru menggunakan kontrol robust seperti *H infinity* atau LPV [6].

Dalam penulisan penelitian ini, penulis mencoba untuk menuliskan model matematika dari ROV itu sendiri [1,2], Dikarenakan model yang didapat masih non linier, diperlukan linierisasi untuk membuatnya mudah dikontrol. Linierisasi dilakukan dengan melinierkan persamaan non-linier di sekitar titik kesetimbangannya [2]. Dari model linear ini nantinya akan dipecah lagi menjadi 3 subsistem kontrol, yaitu *speed* kontrol, *steering* kontrol, dan *depth* kontrol. Dalam proses pembuatan design sistem kontrol dianalisis sistem PID dan *Sliding*-PID (SMC-PID). Sistem kontrol ini

digunakan untuk mengendalikan *propeller* dan 4 *thruster* (pendorong), 2 diletakkan vertikal dan lainnya horizontal. Perancangan sistem kontrol dan simulasi respon keluaran tiap-tiap *thruster* (pendorong) dilakukan di komputer melalui program MATLAB

II. DASAR TEORI

A. Plant UUV

Unmanned Underwater Vehicle (UUV) dimodelkan dengan membuat beberapa asumsi-asumsi sebagai berikut:

1. Kendaraan UUV memiliki masa yang konstan
2. Wilayah operasi yang berada jauh di bawah laut menyebabkan kendaraan tidak mengalami gangguan dari ombak yang berada di permukaan
3. Efek dari rotasi bumi terhadap benda yang mengalami akselerasi di permukaan bumi diabaikan
4. Koefisien hidrodinamis tidak variable
5. Bidang xz- simetris terhadap bidang xy-

Permodelan UUV dilakukan dalam model persamaan gerak non-linier, model nonlinier UUV dapat direpresentasikan melalui *body-fixed frame* maupun *earth-fixed frame*, seperti berikut:

Representasi vektor *body-fixed*

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (1)$$

$$\dot{\eta} = T_1(\eta)v \quad (2)$$

Representasi vektor *earth-fixed*

$$M_\eta(\eta)\dot{\eta} + C_\eta(v, \eta) + D_\eta(v, \eta) + g_\eta(\eta) = J^{-T}(\eta) \tau \quad (3)$$

Dimana

$$v = [u, v, w, p, q, r]^T, \quad \eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$$

Model non-linier dapat dilinierkan pada titik kesetimbangannya, tapi titik kelinierannya harus didefinisikan terlebih dahulu, yaitu

$$v_0(t) = [u_0(t), v_0(t), w_0(t), p_0(t), q_0(t), r_0(t)]^T \quad (4)$$

$$\eta_0(t) = [x_0(t), y_0(t), z_0(t), \phi_0(t), \theta_0(t), \psi_0(t)]^T \quad (5)$$

Karena linierisasi bergantung pada gangguan dari titik kesetimbangan, gangguan tersebut dapat didefinisikan sebagai diferensial

$$\Delta v(t) = v(t) - v_0(t); \Delta \eta(t) = \eta(t) - \eta_0(t);$$

$$\Delta \tau = \tau(t) - \tau_0(t); \quad (6)$$

Sehingga didapatkan (1) menjadi model linier yaitu:

$$M\Delta \dot{v} + \left. \frac{\partial f_c(v)}{\partial v} \right|_{v_0} \Delta v + \left. \frac{\partial f_d(v)}{\partial v} \right|_{v_0} \Delta v + \left. \frac{\partial g(\eta)}{\partial \eta} \right|_{\eta_0} \Delta \eta = \Delta \tau \quad (7)$$

Dengan:

$$f_c(v) = C(v)v ; f_d(v) = D(v)v \quad (8)$$

Dan model perubahan kinematika (2) menjadi

$$\dot{\eta}_0 + \Delta \dot{\eta} = T_1(\eta_0 + \Delta \eta)[v_0 + \Delta v] \quad (9)$$

Dengan mengganti $\dot{\eta}_0 = T_1(\eta_0)v_0$, maka

$$\Delta \dot{\eta} = T_1(\eta_0 + \Delta \eta)\Delta v + [T_1(\eta_0 + \Delta \eta) - T_1(\eta_0)]v_0 \quad (10)$$

Model gerakan yang LTI bisa didapatkan dengan mengasumsikan bahwa kendaraan bergerak pada bidang longitudinal dengan kecepatan u_0 dan w_0 tidak sama dengan nol dan titik keseimbangan pada sudut $\phi_0(t) = \theta_0(t) = 0$ [2], sehingga didapat matriks LTInya sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M^{-1}(C + D) & -M^{-1}G \\ J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M^{-1} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (11)$$

Dengan:

$$x_1 = \Delta v, x_2 = \Delta \eta \text{ dan } u = \tau$$

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi_0 & -\sin \psi_0 & 0 \\ \sin \psi_0 & \cos \psi_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Untuk melakukan sistem pengontrolan, gaya dorong dan momen dari *propeller* dimodelkan sebagai berikut:

$$T = \rho D^4 C_T |n|n \quad (13)$$

$$Q = \rho D^5 C_Q |n|n \quad (14)$$

T adalah gaya dorong, Q adalah momen gaya, ρ masa jenis fluida, D diameter baling-baling, n perkisaran baling-baling, C_T koefisien gaya dorong, dan C_Q koefisien momen gaya

III. PERANCANGAN

A. Perancangan UUV

1) Model decoupled system :

Untuk mendapatkan sistem kontrol yang robust, digunakan metode kontrol *decoupled* atau terpisah. Persamaan matriks yang telah didapat sebagai matriks (11) dipecah menjadi beberapa subsistem yang independent satu sama lain. Dengan cara memisahkan gerakan 6 derajat kebebasan (DOF) menjadi 3 sub sistem inti dan mengendalikan tiap-tiap sub sistemnya dengan metode kontrol yang berbeda tidak saling berketergantungan, ketiga sub sistem tersebut adalah:

1. Sistem Kecepatan
2. Sistem Kemudi
3. Sistem Selam

Tiap-tiap sistem memiliki variable statenya masing-masing, untuk state sistem kecepatan : $u(t)$, state sistem kemudi : $v(t)$, $r(t)$, $\psi(t)$, state selam : $w(t)$, $q(t)$, $\theta(t)$, dan $z(t)$

Mode putar (*rolling mode*) yaitu $p(t)$ dan $\theta(t)$ diabaikan dalam pendekatan ini [2].

Sedangkan inputan untuk ketiga subsistem tersebut adalah propeller revolution $n(t)$, pembelokan kemudi $\delta_R(t)$ dan pembelokan buritan $\delta_S(t)$ dan keluarannya adalah u , ψ , dan z

IV. SIMULASI DAN ANALISIS

A. Plant UUV

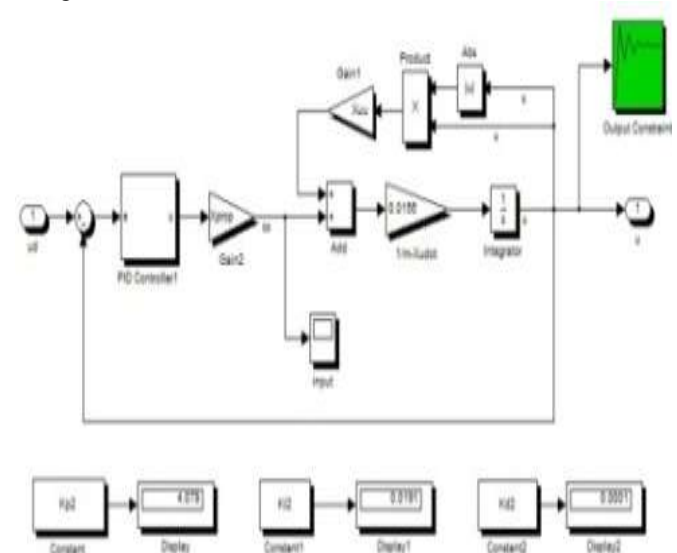
Telah dijelaskan pada bab sebelumnya bahwa dalam laporan ini digunakan metode *decoupled system* atau sistem terpisah yang independen satu sama lain. Sistem tersebut dibagi menjadi 3 sub sistem yaitu sistem kecepatan, sistem kemudi, dan sistem selam. Masing-masing sistem akan dikontrol dengan 2 sistem kontrol yang berbeda, yaitu PID kontroler dan S-PID kontroler. Semua sistem pengontrolan dilakukan dengan simulasi menggunakan matlab 2009a

1) Kontrol Sistem Kecepatan:

Telah didapatkan persamaan kecepatan adalah

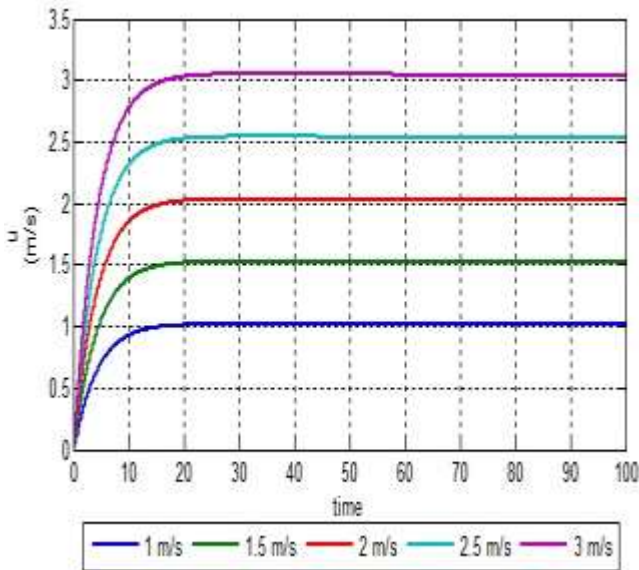
$$(m - X_a)\dot{u} = X_{|u|u}|u|u + \tau + X_{ext} \quad (15)$$

Maka didapatkan simulasi dalam matlab simulinknya sebagai berikut:



Gambar 3 Simulink sistem kecepatan

Untuk penentuan parameter Proporsional, Integral, dan Derivative-nya, dilakukan dengan cara metode optimisasi, yaitu dengan blok *output constraint*, Sehingga didapatkan besar $K_p = 4.0779$; $K_i = 0.0191$; $K_d = 1.0000e-004$;. Hasil pengontrolan dengan PID dengan variasi input kecepatan u pada sistem ini dapat dilihat pada gambar 4

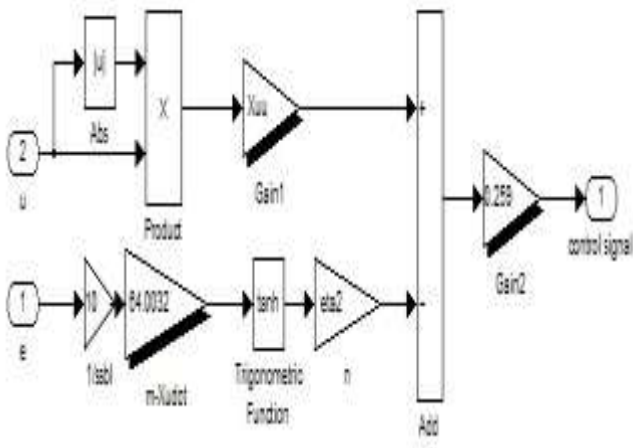


Gambar 4 Hasil pengontrolan sistem kecepatan dengan PID kontroler

Untuk sistem kecepatan yang memiliki 1 state, blok sliding sinyal kontrol S-PID adalah

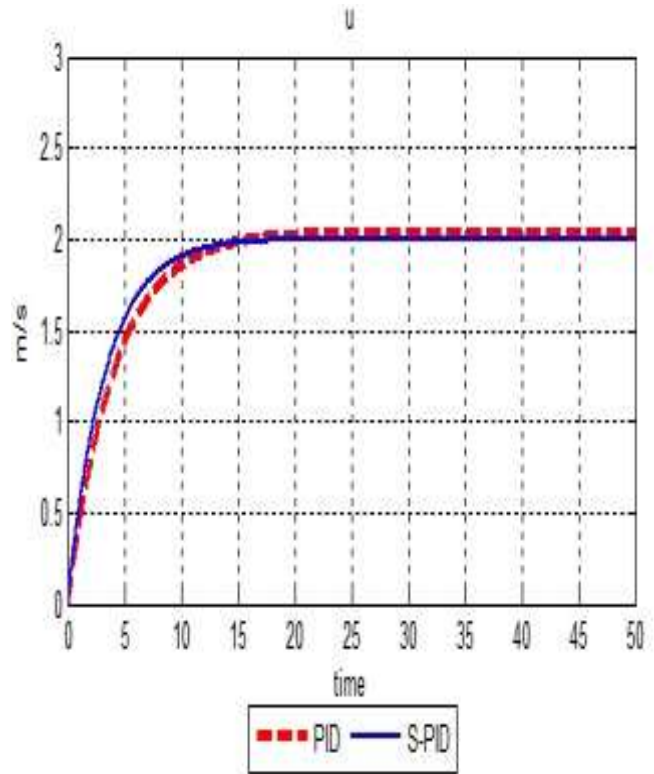
$$u = \frac{1}{x_{prop}} (X_{|u|u} |u|u - (m - X_u)\eta \cdot \tanh(\sigma/\phi)) \quad (16)$$

Dengan η adalah 1.1 dan $\phi = 0.05$, sehingga simulinknya adalah sebagai berikut



Gambar 5 Blok Simulink Sliding pada sistem kecepatan

Perbandingan hasil pengontrolan PID dan S-PID pada model sistem kecepatan dapat dilihat pada gambar 6 dengan target kecepatan 2 m/s, dicuplik pada kecepatan 2 m/s saja karena karakter output tiap variasi input hampir sama sehingga salah satu perbandingan saja dapat mewakilinya.



Gambar 6 Hasil pengontrolan sistem kecepatan

TABEL I

Perbandingan Sistem Kontrol pada Sistem Kecepatan

Sistem Kecepatan	Respon	PID	S-PID	Resp on area
1	Rising time (rs)	16.71 s	27.5 4 s	
2	Settling time (2 %)	13.6 s	12.9 1 s	Resp on transien
3	Peak time	33.3 s	28 s	
4	Maksimum Overshoot	1.645 %	0 %	Resp on steady
5	Integral Area Error	8.648	6.60 3	state

Dari table 1 dapat dilihat sistem kecepatan yang dikontrol dengan sistem PID memiliki waktu *settle* yang lebih lambat dibanding yang dikontrol dengan sistem S-PID. Sistem S-PID memperbaiki *settling time* dari sistem PID. Ditinjau dari respon *steady statenya*, sistem kecepatan yang dikontrol oleh S-PID memiliki *integral area error* yang lebih kecil dibandingkan dengan sistem kecepatan yang dikontrol oleh PID, yaitu 6.603 berbanding 8.648.

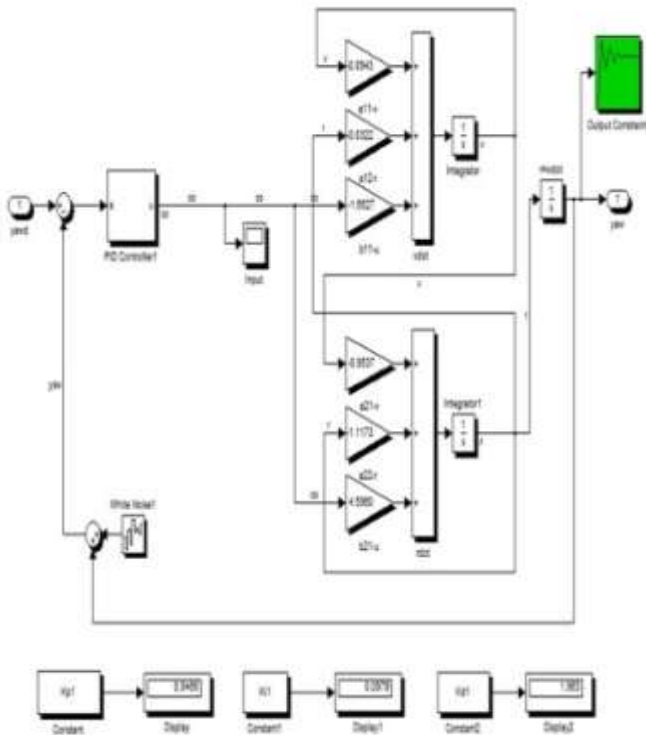
2)Kontrol Sistem Kemudi

Dalam sistem kemudi, akan dikendalikan sudut yaw dari sistem (ψ), sistem kemudi itu sendiri berorde 3 seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya maka didapatkan persamaan ruang keadaan sistem kemudi sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0943 & -0.0322 & 0 \\ -0.9537 & -1.1733 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1.6627 \\ 4.5960 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_R \quad (17)$$

Setelah dipasangkan kontroler PID pada sistem umpan baliknya maka disusun blok Simulink pada matlab seperti pada gambar 7 dengan sudut yang diinginkan

Adapun untuk penentuan parameter-parameter kontroler PID, untuk sistem kemudi ini menggunakan metode yang sama dengan sistem kecepatan yaitu dengan menggunakan optimisasi atau dengan blok output constraint, sehingga didapatkan parameter $K_p = 0.9466$; $K_i = 0.0979$; $K_d = 1.9634$;. Hasil pengontrolan dengan PID dengan variasi input kecepatan u pada sistem ini dapat dilihat pada gambar 8



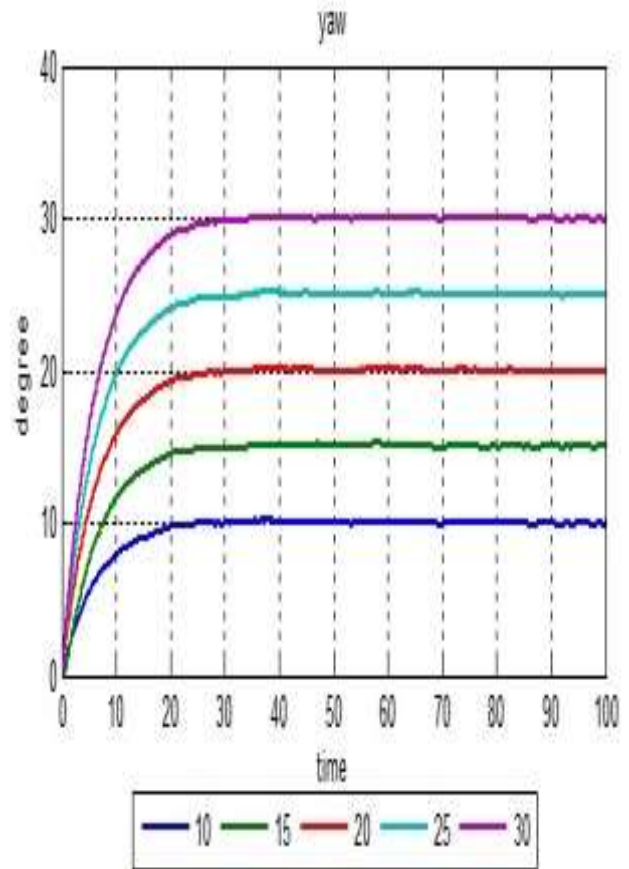
Gambar 7 Simulink sistem kemudi

Sedangkan untuk pengontrolan S-PID, pada sistem kemudi, sistemnya adalah Single-input Multiple-state (SIMS), sehingga sliding surfacenya adalah

$$\sigma = s_1 v + s_2 r + s_3 (\psi - \psi_d) \quad (18)$$

Dengan model sistem

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0943 & -0.0322 & 0 \\ -0.9537 & -1.1733 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1.6627 \\ 4.5960 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_R \quad (19)$$



Gambar 8 Hasil pengontrolan sistem kemudi dengan PID

Maka didapat matriks A_c

$$A_c = (A - Bk^T) = \begin{bmatrix} -0.3653 & -0.2994 & 0 \\ -0.2047 & -0.4347 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Dengan memilih pole $[-0.15; -0.65; 0]^T$, vector k-nya adalah $[-0.1630; -0.1607; 0]^T$. Matriks A_c dicari untuk mendapatkan matriks s, s adalah eigenvector dari matriks A_c^T pada eigenvalue $\lambda = 0$

$$A_c^T s = 0 \quad (21)$$

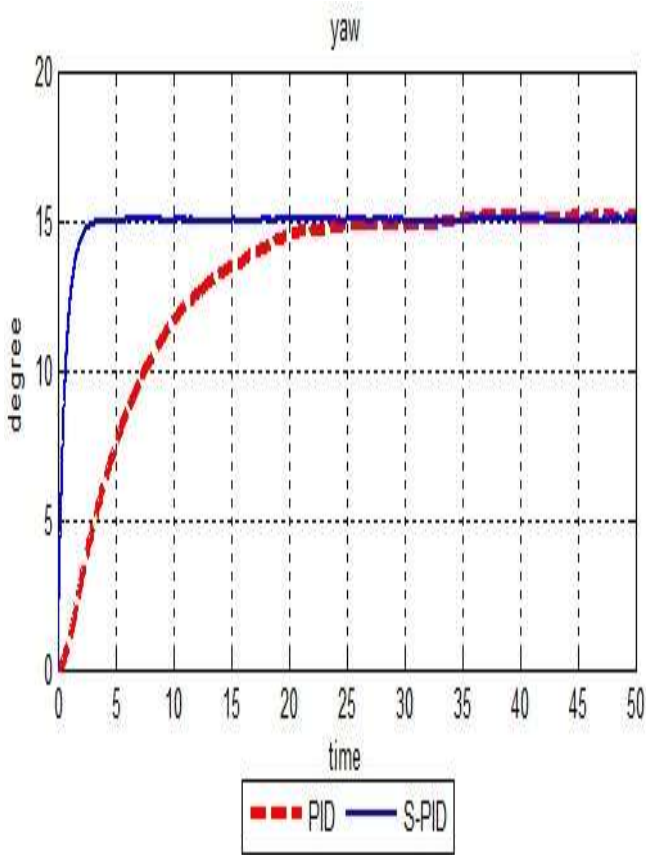
$$s = [-0.4762; 0.8496; 0.2268]^T \quad (22)$$

Maka sinyal kontrol mode slidingnya adalah

$$u = 0.1630v + 0.1607r + \frac{1}{4.6965} (-0.23 \tanh (-0.4762v + 0.8496r + 0.2268(\psi - \psi_d)/0.05)) \quad (23)$$

Dengan sliding surface diambil dari persamaan 18 dan 22

$$\sigma = -0.4762v + 0.8496r + 0.2268(\psi - \psi_d) \quad (24)$$



Gambar 9 Hasil pengontrolan sistem kemudi

TABEL II

Perbandingan Sistem Kontrol pada Sistem Kemudi

Sistem Kemudi	Parameter	PID	S-PID	Respons area
1	Rising time (rs)	33.09 s	5.43 s	
2	Settling time(2 %)	23.55 s	2.45 s	Respon transien
3	Peak time	38.1 s	7.7 s	
4	Maksimum Overshoot	1.13 %	0.03 %	Respon steady
5	Integral Area Error	116.7	9.512	state

Berikut ini beberapa analisa yang dapat diambil dari gambar dan table tersebut:

Dapat dilihat pada table bahwa sistem PID mencapai *rise timenya* pada detik ke 33.09, dan sistem S-PID mencapai *rise timenya* pada detik ke 5.43. Sistem S-PID memperbaiki *rising time* dari PID, sistem yang dikontrol dengan sistem PID memiliki waktu *settle* yang lebih lambat dibanding yang dikontrol dengan sistem S-PID. Pada sistem kemudi dengan S-PID didapatkan waktu *settle* yang lebih kecil dari pada waktu *peak*, hal ini disebabkan overshoot yang dihasilkan dari pengontrolan masih sangat kecil sehingga masuk dalam toleransi waktu *settle*

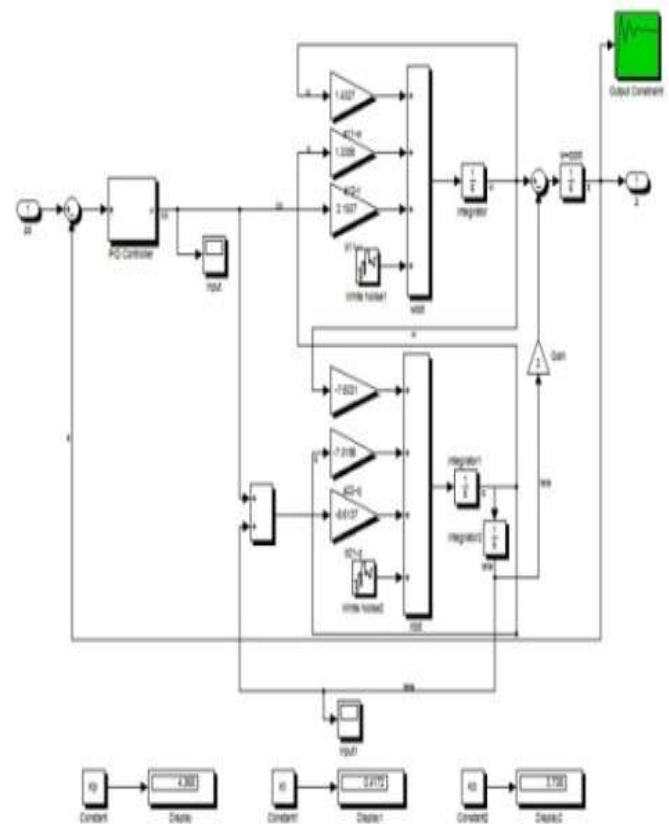
3) Kontrol Sistem Selam

Ketinggian dalam sumbu z yang akan dikendalikan melalui sistem ini (z_d). Sistem selam juga memiliki 3 orde dari 3 statenya yaitu w,q, dan z. Untuk diperoleh sistem kontrolnya maka diperoleh model sistem dalam bentuk ruang keadaan

$$\dot{x} = Ax + b\delta_s \tag{25}$$

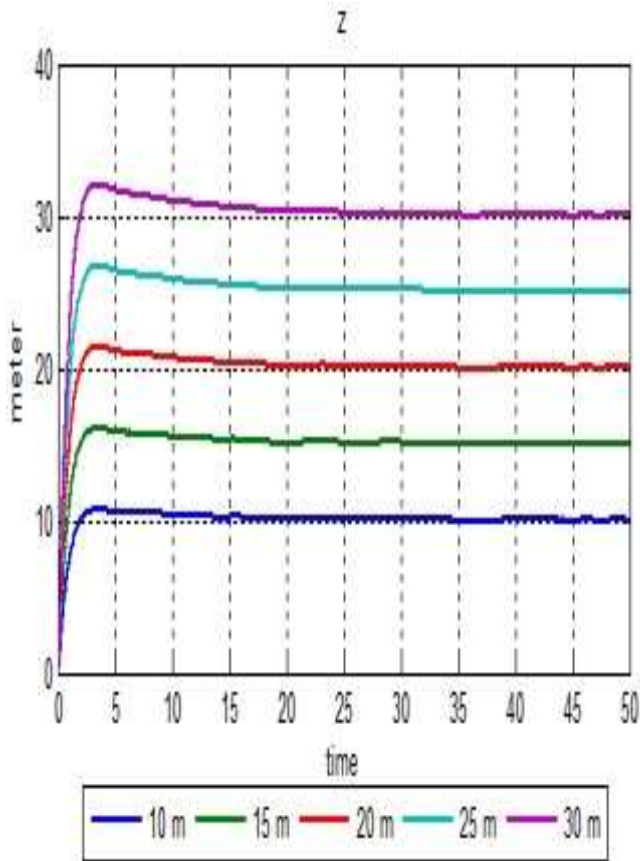
$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.4327 & 1.3356 & 0 & 0 \\ -7.6031 & -7.0186 & -8.6137 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2.1937 \\ -8.6137 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_s \tag{26}$$

Dengan menggunakan Simulink pada matlab maka didapatkan model seperti gambar 10



Gambar 10 Simulink sistem selam

Hasil dari simulasi dapat dilihat dari gambar 11, hasil tersebut didapatkan setelah blok PID kontroler mengalami proses optimisasi terhadap parameter-parameternya. Seperti yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya, maka didapat parameter-parameternya adalah $K_p = 4.3680$; $K_i = 0.4172$; $K_d = 3.7380$;



Gambar 11 Hasil pengontrolan sistem selam dengan PID

Sedangkan untuk pengontrolan S-PID pada sistem selam, sistem selam juga memiliki Single-input Multiple-state (SIMS), sliding surfaceny adalah

$$\sigma = s_1 w + s_2 q + s_3 (z - z_d) \tag{27}$$

Dengan model sistem

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.4327 & 1.3356 & 0 & 0 \\ -7.6031 & -7.0186 & -8.6137 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2.1937 \\ -8.6137 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_s \tag{28}$$

Didapat matriks Ac

$$Ac = (A - Bk^T) = \begin{bmatrix} 0.7909 & 1.1732 & -1.2120 & 0 \\ -5.0831 & -6.3809 & -3.8549 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -2 & 0 \end{bmatrix} \tag{29}$$

Dengan memilih pole $0; -3.23; -3.24; 0.88]^T$, vector k-nya adalah $[0.2926; 0.0740; 0.5525; 0]^T$. Matriks Ac dicari untuk mendapatkan matriks s, dengan mencari eigenvektornya

$$Ac^T s = 0 \tag{30}$$

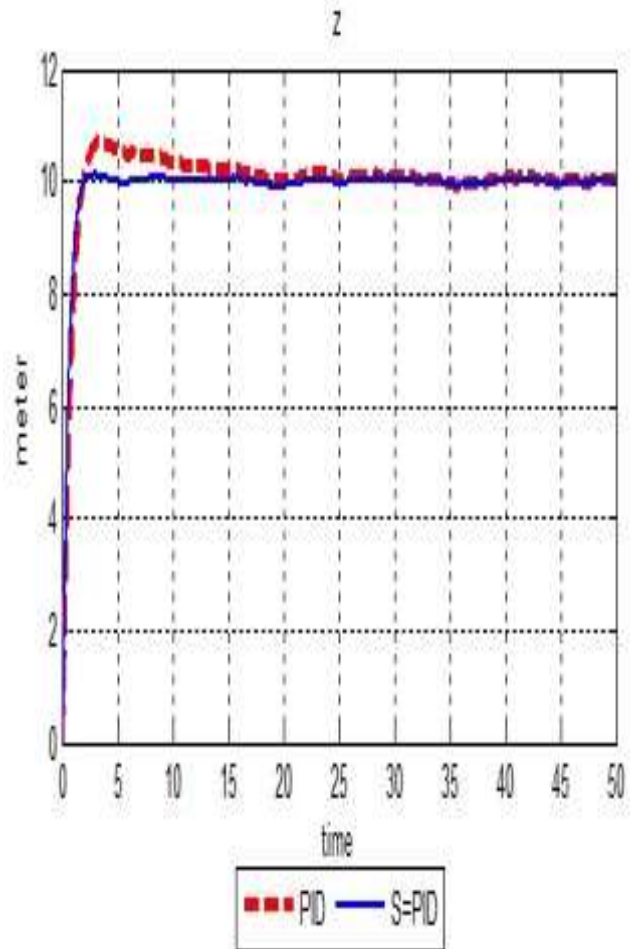
$$s = [-0.6399; -0.0169; 0.6431; 0.4203]^T \tag{31}$$

Maka sinyal kontrolnya adalah

$$u = -0.2926w - 0.0740q - 0.5525\theta - \frac{1}{1.2582} (-0.11 \tanh(-0.6399w - 0.0169q + 0.6431\theta + 0.4203(z - z_d)/0.05)) \tag{32}$$

Dengan sliding surface diambil dari persamaan 27 dan 31

$$\sigma = -0.6399w - 0.0169q + 0.6431\theta + 0.4203(z - z_d) \tag{33}$$



Gambar 12 Hasil pengontrolan sistem selam

Perbandingan hasil pengontrolan PID dan S-PID pada model sistem kemudi dapat dilihat pada gambar 12. Pada sistem ini diambil sample pada kedalaman 10 meter.

TABEL III

Perbandingan Sistem Kontrol pada Sistem Selam

Sistem Selam	Parameter	PID	S-PID	Respon area
1	<i>Rising time</i> (rs)	2.02 s	1.95 s	
2	<i>Settling time</i> (2 %)	16.32 s	1.66 s	Respon transien
3	<i>Peak Time</i>	3.65 s	3 s	
3	<i>Maksimum Overshoot</i>	9.8 %	1.1 %	Respon steady
5	<i>Integral Area Error</i>	13.99	7.128	state

Berikut ini beberapa analisa yang dapat diambil dari gambar tersebut:

Dapat dilihat pada gambar bahwa sistem PID mencapai *rise timenya* pada detik ke 2.02, dan sistem S-PID mencapai *rise timenya* pada detik ke 1.95. Sistem S-PID mencapai *rising time* lebih cepat dibanding sistem PID

Dilihat dari table III sistem yang dikontrol dengan sistem PID memiliki waktu *settle* yang lebih lambat dibanding yang dikontrol dengan sistem S-PID. Sistem S-PID memperbaiki waktu *settle* dari sistem PID pada plant selam

Overshoot, dalam pembahasan sistem kemudi, sistem PID memiliki *overshoot* yang lebih tinggi dibanding dengan sistem S-PID, sistem S-PID memperbaiki *overshoot* dari sistem PID

Ditinjau dari respon *steady statenya*, sistem selam yang dikontrol oleh S-PID memiliki *integral area error* yang lebih kecil dibandingkan dengan sistem kecepatan yang dikontrol oleh PID, sehingga dapat disimpulkan pada sistem kemudi S-PID lebih baik

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Pada skema kontrol PID sistem kecepatan dan sistem kemudi, semakin besar masukan inputnya maka akan memperlama waktu *settle* dan waktu *rising nya* rata-rata 1.66%, namun maksimum *overshoot* yang dihasilkan semakin kecil dengan rata-rata 1.37%
2. Pada skema kontrol PID sistem selam, variasi input mempengaruhi output sistem. Semakin besar inputan, akan memperlama *rising time* dari sistem namun mempercepat *settling time* dari sistem. Pada *error steady state-nya*, perbesaran input mempengaruhi perbesaran *Integral Area Error (IAE)* dengan rata-rata 23.37 %
3. Untuk penentuan parameter Kp, Ki, dan Kd baik itu PID maupun S-PID, dilakukan dengan blok MATLAB *signal constraint*, dengan blok ini dilakukan iterasi parameter terbaik pada setiap sistem plantnya. Pada sistem kecepatan didapatkan Kp = 4.0779; Ki = 0.0191; Kd = 1.0000e-004;
4. Matriks s dalam skema kontrol S-PID menjadi penting sebagai penyusun sinyal kontrol dari SMC. Penentuan matriks s berdasarkan besar *eigenvector* dari matriks Ac, untuk sistem kemudi didapatkan s₁=-0.6399; s₂=-0.0169; s₃=0.6431; s₄=0.4203;
5. Skema kontrol S-PID jika dibandingkan dengan PID akan memperbaiki nilai *overshoot* sebesar 88% dan mampu memperbaiki *error steady state*, dilihat dari nilai *integral area errornya* sistem S-PID dapat memperbaiki sebesar 49.05 % dari sistem PID pada sistem selam

5.2 Saran

Untuk pengembangan lebih lanjut, maka dapat diberikan saran-saran sebagai berikut:

1. Sistem pergerakan secara lintasan (trajektori) dapat dilakukan untuk digunakan dalam prediksi pergerakan dari UUV
2. Penambahan cascade kontrol bisa dilakukan, dengan secondary process nya itu adalah plant fin atau thruster dan plant propeller. Yang membuat analisa sistem menjadi lebih lengkap lagi
3. Dikarenakan sistem yang kompleks dan non-linier. Dapat dilakukan banyak teknik pengontrolan lain, seperti kontrol modern yaitu kontrol optimal ataupun H-infinity robust dapat dicoba untuk plant UUV ini.
4. modern yaitu kontrol optimal ataupun robust dapat dicoba untuk plant UUV ini.

Daftar Pustaka

- [1] Wadoo ,Sabiha. Kachroo ,Pushkin. Autonomous Underwater Vehicles: Modeling, Control Design and Simulation. Taylor & Francis.CRC press.December. 2010
- [2] Thor I. Fossen. 1994. *Guidance and Control of Ocean Vehicle*, Buffins Lane, Chichester, England : John Wiley and Sons Ltd.
- [3] Lee, S. K. , Sohn, K. H.. Byum, S. W..and Kim, J. Y.. Modeling and controller design of manta-type unmanned underwater test vehicle. *Journal of Mechanical Science and Technology* 23 .(2009). 987~990
- [4] A., Halil .Y. ,H. , Alpaslan. S., Gaye. G., Fuat. Sliding Mode Control of Autonomous Underwater Vehicle. Turkey
- [5] Jimenez, T. Salgado. Jouvencel, B. Using a High Order Sliding Modes for diving control a torpedo Autonomous Underwater Vehicle. France
- [6] Roche, E., Sename, O., and Simon, D. (2009). Lpv / H_{∞} control of an autonomous underwater vehicle (auv). In *Proceedings of the European Control Conference*. Budapest, Hungary.
- [7] Ogata, Katsuhiko, 2002, *Modern Control Engineering*, Third Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- [8] Isiyel , K.. “Autopilot Design and Guidance Control of ULISAR UUV (Unmanned Underwater Vehicle)”. Yüksek LisansTezi. ODTÜ. 2007.
- [9] Modul praktikum DSK Teknik Elektro UNDIP. 2010.
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/Sliding_mode_control