TUGAS AKHIR – KM184801

DESAIN KENDALI *AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE* (AUV) DENGAN BALLAST AKTIF MENGGUNAKAN METODE *SLIDING MODE CONTROL*

ARDYAN CHANDRA DWI ANGGORO
NRP. 06111640000090

Dosen Pembimbing
Dr. Dra. Mardlijah, MT
Dr. Dieky Adzkiya, S.Si, M.Si

DEPARTEMEN MATEMATIKA
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

FINAL PROJECT – KM184801

CONTROL DESIGN OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV) WITH ACTIVE BALLAST USING SLIDING MODE CONTROL

ARDYAN CHANDRA DWI ANGGORO
NRP. 06111640000090

Supervisors :
Dr. Dra. Mardlijah, MT
Dr. Dieky Adzkiya, S.Si, M.Si

DEPARTMENT OF MATHEMATICS
Faculty of Science and Data Analytics
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2020

DESAIN KENDALI *AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE* (AUV) DENGAN BALLAST AKTIF MENGGUNAKAN METODE *SLIDING MODE CONTROL*

CONTROL DESIGN OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV) WITH ACTIVE BALLAST USING SLIDING MODE CONTROL

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
Untuk memperoleh gelar Sarjana Matematika
Pada bidang studi Matematika terapan
Program Studi S-1 Departemen Matematika
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:

ARDYAN CHANDRA DWI ANGGORO
NRP. 06111640000090

Menyetujui,

Dosen Pembimbing II,

Dr. Dieky Adzkiya, S.Si, M.Si
NIP. 19830517 200812 1 003

Dosen Pembimbing I,

Dr. Dra Mardlijah, MT
NIP. 19670114 199102 2 001

Mengetahui,

Kepala Departemen Matematika
FSAD ITS

Subchan, Ph.D
NIP. 19710513 199702 1 001
Surabaya, 18 Agustus 2020

DESAIN KENDALI *AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE* (AUV) DENGAN BALLAST AKTIF MENGGUNAKAN METODE *SLIDING MODE CONTROL*

Nama : Ardyan Chandra Dwi Anggoro
NRP : 06111640000090
Jurusan : Matematika FSAD ITS
Pembimbing : 1. Dr. Dra. Mardlijah, MT
2. Dr. Dieky Adzkiya, S.Si, M.Si

ABSTRAK

Autonomous Underwater Vehicle (AUV) merupakan kapal selam tanpa awak yang saat ini sedang dikembangkan. Salah satu komponen penting yang ada di AUV adalah ballast aktif. Ballast aktif merupakan sebuah alat yang digunakan untuk mengatur massa air pada AUV. Tangki ballast bertujuan sebagai penyeimbang dan pemberat aktif pada AUV. Pada tugas akhir ini akan dirancang desain kendali Sliding Mode Control untuk mengatur ballast aktif yang optimal pada saat AUV berada dalam kedalaman tertentu. Gerak yang ditinjau hanya 3-DOF yaitu surge, heave dan yaw. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa rancangan sistem kontrol gerak dengan masing-masing gerak diberi 3 setpoint yang berbeda menghasilkan hittling time pada gerak surge, heve dan yaw masing-masing kurang dari 12.7 detik, 9.8 detik dan 6.9 detik. Steady state error pada gerak surge, heave dan yaw masing-masing kurang dari 0.0003%, 0.0005% dan 0.0003%. Overshoot dari respon masing-masing gerak adalah 0%

Kata Kunci : *Autonomous Underwater Vehicle (AUV), Ballast Aktif, Sliding Mode Control*

CONTROL DESIGN OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV) WITH ACTIVE BALLAST USING SLIDING MODE CONTROL

Name	: Ardyan Chandra Dwi Anggoro
NRP	: 06111640000090
Departement	: Mathematics FSAD ITS
Supervisors	: 1. Dr. Dra. Mardlijah, MT
	2. Dr. Dieky Adzkiya, S.Si, M.Si

ABSTRACT

Autonomous Underwater Vehicle (AUV) is an unmanned submarine that is currently being developed. One of the important components in the AUV is an active ballast. The active ballast is a tool used to adjust the mass of water at AUV. The ballast tank serves as a counterweight and active ballast to the AUV. In this final project, a Sliding Mode Control design will be designed to adjust the optimal active ballast when the AUV is at a certain depth. The only 3-DOF observed motion is surge, heave and yaw. The results showed that the motion control system design with each motion given 3 different setpoints resulted in hittling time for surge, heve and yaw motion less than 12.7 seconds, 9.8 seconds and 6.9 seconds. Steady state error on surge, heave and yaw motion is less than 0.0003%, 0.0005% and 0.0003%. Overshoot of the response of each motion is 0%

Keywords: *Autonomous Underwater Vehicle (AUV), Active Ballast, Sliding Mode Control*

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul

"DESAIN KENDALI *AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE* (AUV) DENGAN BALLAST AKTIF MENGGUNAKAN METODE *SLIDING MODE CONTROL*"

Sebagai salah satu syarat kelulusan Program Sarjana Departemen Matematika FSAD Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terimakasih dan penghargaan kepada :

1. Kedua orang tua saya, (Alm.) Bapak Bambang Budiyanto dan Ibu Yani Trisnowati yang selalu mendoakan, menyemangati, dan memberikan saran terbaik untuk penulis selama penulis menempuh kuliah di Departemen Matematika FSAD ITS hingga penulis bisa mencapai titik ini.
2. Kakak saya, Atrysia Maya Dyanti yang terus menyemangati dan memberikan motivasi penuh kepada penulis.
3. Bapak Subchan, Ph.D selaku Ketua Departemen Matematika ITS dan Ibu Dr. Dwi Ratna Sulistyaningrum, S.Si, MT selaku Sekretaris

Departemen Matematika ITS yang telah memberikan dukungan selama perkuliahan hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.

4. Ibu Dr. Dra. Mardlijah, MT dan Bapak Dr. Dieky Adzkiya, S.Si, M.Si selaku dosen pembimbing yang memberi bimbingan dan motivasinya kepada penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir ini sehingga dapat terselesaikan dengan baik.
5. Bapak Dr. Didik Khusnul Arif, S.Si, M.Si ,Bapak Dr. Chairul Imron, MI.Komp dan Ibu Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si selaku dosen penguji yang telah memberikan saran serta arahan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
6. Bapak Dr. Imam Mukhlash, S.Si, MT dan Ibu Dian Winda Setyawati, S.Si, M.Si selaku dosen wali yang telah memberikan arahan akademik selama penulis menempuh perkuliahan.
7. Bapak dan Ibu dosen serta para staff Jurusan Matematika ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.
8. Teman-teman *Basecamp*, Fachri Firmansyah, Muhammad Ardi, Rizal Fanani, Irfan Adli, Dimas Ari, Ahmad Ulul Albab, Praditya Lutvi, Fityan Azizi, Yusron yang telah menemani dan memberikan motivasi penulis selama kuliah 4 tahun di ITS.
9. Teman tugas akhir, Theresya Beatriz yang sangat membantu dan memberikan arahan kepada penulis dalam hal yang berkaitan dengan simulasi.
10. Teman-teman mahasiswa Matematika ITS khususnya Lemniscate yang telah memberikan masa-masa berkesan bagi penulis selama menjadi bagian dari mereka.

11. Teman-teman Kabinet Cipta dan Departemen *Sport and Art Development* (SAD) yang telah memberikan kesan indah selama menjabat di Himpunan Mahasiswa Matematika ITS (HIMATIKA ITS).
12. Semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu, terima kasih telah memberikan saran, dukungan, motivasi dan membantu sampai terselesaikannya Tugas Akhir ini.

Penulis juga menyadari bahwa dalam Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan. Oleh sebab itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan pada Tugas Akhir ini. Akhirnya, penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
LEMBAR PENGESAHAN v
ABSTRAK vii
ABSTRACT ix
KATA PENGANTAR xi
DAFTAR GAMBAR xvii
DAFTAR LAMPIRAN xix
DAFTAR SIMBOL xxi
PENDAHULUAN 1
1.1. Latar Belakang Masalah 1
1.2. Rumusan Masalah 3
1.3. Batasan Masalah 3
1.4. Tujuan 4
1.5. Manfaat 4
TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Penelitian Terdahulu 5
2.2 Autonomous Underwater Vehicle (AUV) 5
2.2. Ballast Aktif 6
2.3. Model Ballast Aktif pada AUV 7
2.4. Sifat-sifat Sistem 8
2.4.1. Kestabilan 9
2.4.2. Keterkontrolan 10
2.5. *Sliding Mode Control* (SMC) 10

2.5.1. Fungsi Switching 11
2.5.2. *Sliding Surface* 12
2.5.3. Teori Kestabilan *Lyapunov* 13
2.5.4. Kondisi *Sliding*..... 14
METODE PENELITIAN..... 17
3.1. Tahapan Penelitian..... 17
3.2. Diagram Alir..... 19
ANALISIS DAN PEMBAHASAN 21
4.1. Analisis Sifat Sistem..... 21
4.1.1. Kestabilan 21
4.1.2 Keterkontrolan 22
4.2. Perancangan Sistem Tanpa Kontrol..... 23
4.3. Perancangan Sistem Kontrol SMC 26
4.3.1. Perancangan Sistem Kontrol Gerak *Surge*..... 27
4.3.2. Perancangan Sistem Kontrol Gerak *Heave*..... 30
4.3.3. Perancangan Sistem Kontrol Gerak *Yaw* 32
4.3.4. Simulasi Sistem Kontrol dengan Metode SMC .. 35
KESIMPULAN DAN SARAN..... 45
DAFTAR PUSTAKA 47
BIODATA PENULIS 51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Menyelam secara Dinamis 6

Gambar 2.2 Menyelam secara Statis 7

Gambar 2.3 Kondisi Sliding 16

Gambar 3.1 Diagram Alir 20

Gambar 4.1 Diagram blok AUV 3-DOF 23

Gambar 4.2 Diagram Blok Subsistem gerak *surge*, *heave*, dan *yaw*…….……..24

Gambar 4.3. (a), (b) dan (c) Respon grafik tanpa kontrol.....26

Gambar 4.4. Diagram blok AUV dengan metode SMC…...36

Gambar 4.5. Diagram blok subsistem Kontrol SMC……....36

Gambar 4.6. Diagram blok subsistem Model AUV 3-DOF..37

Gambar 4.7. Respon gerak *surge* menggunakan kontrol SMC……39

Gambar 4.8. Respon gerak *heave* menggunakan kontrol SMC……....41

Gambar 4.9. Respon gerak *yaw* menggunakan kontrol SMC……....43

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN I Parameter Desain Remus……49

DAFTAR SIMBOL

X	: Gaya *surge*
Z	: Gaya *heave*
N	: Gaya *yaw*
m	: *Massa* kapal
q	: Kecepatan linier dari *surge* pada sumbu x
w	: Kecepatan linier dari *heave* pada sumbu x
r	: Kecepatan angular dari *yaw* pada sumbu z
$\dot{q}$	: Percepatan *surge* pada sumbu x
$\dot{w}$	: Percepatan *heave* pada sumbu z
$\dot{r}$	: Percepatan *yaw* pada sumbu z
X_q	: Koefisien *drag* linier
$X_{q\|q\|}$	: *Axial drag*
$X_{\dot{q}}$	: *Massa* tambahan
Z_w	: Koefisien *drag* linier
$Z_{w\|w\|}$	: *Crossflow drag*
$Z_{\dot{w}}$	: *Massa* tambahan
N_r	: Koefisien *drag* linier
$N_{r\|r\|}$	: *Crossflow drag*
I_{zz}	: Momen inersia pada sumbu z
$N_{\dot{r}}$	: *Massa* tambahan
X_{prop}	: *Propeller thrust*
δ_s	: Kontrol untuk *heave* dan *roll*
δ_r	: Kontrol untuk *sway* dan *yaw*
ρ	: Massa jenis
g	: Percepatan gravitasi
$A(h)$	: Luas penampang
e	: *error*
x_d	: x yang diinginkan
$s(x,t)$	: Fungsi *switching*
λ	: Konstanta positif pada fungsi *switching*
V	: Fungsi Lyapunov
ϕ	: *Boundary Layer*
sgn	: *Signum*

η : Konstanta positif
$\tilde{q}$: *Tracking error* pada *surge*
$S_1(q,t)$: Fungsi *switchingi* untuk *surge*
q_d : q yang diinginkan pada *surge*
$\hat{x}_{prop}$: Nilai estimasi pengendali pada *surge*
K_1 : *Switching gain* untuk *surge*
$\widetilde{w}$: *Tracking error* pada *heave*
$S_2(w,t)$: Fungsi *switchingi* untuk *heave*
w_d : w yang diinginkan pada *heave*
$\widehat{\delta_s}$: Nilai estimasi pengendali pada *heave*
K_2 : *Switching gain* untuk *heave*
$\tilde{r}$: *Tracking error* pada *yaw*
$S_3(r,t)$: Fungsi *switching* untuk *yaw*
r_d : r yang diinginkan pada *yaw*
$\widehat{\delta_r}$: Nilai estimasi pengendali pada *yaw*
K_3 : *Switching gain* untuk *yaw*
D : Diameter *propeller*
K_T : Koefisien gaya dorong
ω_p : Rotasi dari *propeller*
U_a : Kecepatan awal *propeller*

BAB I

PENDAHULUAN

Pada bab ini dijelaskan tentang hal-hal yang menjadi latar belakang permasalahan pada Tugas Akhir. Permasalahan tersebut akan diringkas menjadi rumusan masalah. Selanjutnya disusun juga batasan masalah sehingga didapat tujuan yang diinginkan serta manfaat yang diperoleh dari Tugas Akhir.

1.1. Latar Belakang Masalah

Indonesia merupakan negara dengan wilayah yang cukup luas. Sebagian besar negara Indonesia terdiri dari lautan. Dengan adanya lautan yang luas maka terdapat banyak sekali sumber daya alam yang tersedia di Indonesia. Oleh karena itu sebagai manusia yang membutuhkan sumber daya alam, sudah selayaknya untuk merawat, memantau, menjaga dan melestarikannya. Dalam pemantauan sumber daya alam yang berada di lautan harus hati-hati dikarenakan kedalaman laut di Indonesia sendiri berbeda-beda. Maka dari itu dibutuhkan sebuah alat untuk mengatasi hal tersebut. Teknologi bawah air yang banyak dikembangkan akhir-akhir ini adalah *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV).[1]

AUV merupakan wahana bawah air tanpa awak yang dapat bergerak dalam 6 derajat kebebasan serta melaju di dalam air menggunakan sistem propulsi, dikendalikan dan kemudian dikemudikan oleh operator dengan bantuan komputer diatas kapal pendukung berdasarkan sistem navigasi, panduan, dan kendali. AUV sangat penting dalam kegiatan bawah laut karena memiliki kecepatan, daya tahan, dan kemampuan menyelam yang lebih tinggi daripada manusia. Aplikasi AUV

memberikan kontribusi bagi ilmu pengetahuan, lingkungan, industri minyak dan gas, serta militer. Beberapa contoh keuntungan menggunakan AUV, yaitu pemetaan dasar laut, perbaikan lingkungan struktur bawah laut termasuk jaringan pipa dan bendungan, konstruksi dan pemeliharaan struktur bawah laut, serta pencarian dan pembuangan tambang air dangkal [2].

Banyak sekali komponen-komponen yang tentunya berperan penting dalam pengoperasian AUV. Salah satu komponen penting yang ada di AUV adalah ballast aktif. Ballast aktif merupakan sebuah alat yang digunakan untuk mengatur massa air pada AUV. Tangki-tangki ballast tersebut bertujuan sebagai penyeimbang dan sistem pemberat aktif pada AUV agar mampu menyelam dan mengapung sesuai kebutuhan [3]. Mengingat hal tersebut, perlu adanya input kecepatan yang optimal yang nantinya dapat digunakan untuk kontrol AUV yang lebih baik.

Pada penelitian terdahulu telah dilakukan penelitian tentang model AUV. Pada tahun 2019, Ciko Pramuliasari telah melakukan penelitian yang berjudul “Model Kinematis Ballast pada Gerak Autonomous Underwater Vehicle (AUV)”[4], penelitian ini menjelaskan tentang pembentukan model kinematis yang terdapat sistem ballast. Dimana ballast diasumsikan dalam bentuk balok dan tabung yang memiliki properti berupa baja dan fiber. Desain AUV yang digunakan adalah UNUSAITS AUV dan REMUS. Gerak yang ditinjau hanya 3 DOF yaitu surge, heave, dan yaw karena AUV berkecepatan rendah dan tanpa faktor lingkungan.

Berdasarkan penelitian terdahulu, Maka tugas akhir ini akan dibentuk desain kendali dari model kinematis dari ballast aktif menggunakan metode *Sliding Mode Control*. Dari permasalahan ini, penulis mengangkat judul "Desain Kendali Model Ballast Aktif Pada *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) Menggunakan Metode *Sliding Mode Control*".

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana desain kendali *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) dengan ballast aktif menggunakan metode *Sliding Mode Control*?
2. Bagaimana hasil simulasi dari *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) setelah diberi desain kendali?

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Model yang digunakan berdasarkan dari penelitian terdahulu dari Ciko Pramuliasari
2. Parameter yang digunakan dari data kapal selam REMUS 100
3. Persamaan model gerak menggunakan 6 *Degree of Freedom* (DOF) yang direduksi menjadi 3 *Deegre of Freedom*. Sehingga yang digunakan hanya *surge*, *heave*, dan *yaw* sedangkan *sway*, *pitch*, dan *roll* diabaikan.
4. Simulasi menggunakan MATLAB.

1.4. Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah diatas, tujuan dari pembuatan tugas akhir ini adalah mendapatkan desain kendali ballast aktif pada *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) untuk mengendalikan kecepatan *surge*, *heave* dan *yaw* serta menganalisis performasi hasil simulasinya.

1.5. Manfaat

Manfaat yang didapat dari tugas akhir ini adalah:

1. Mengetahui hasil yang optimal dari desain kendali model ballast aktif pada *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) menggunakan metode *Sliding Mode Control.*
2. Sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dijelaskan tentang teori-teori maupun penunjang terkait permasalahan terkait Tugas Akhir, antara lain penelitian terdahulu, *Autonomous Underwater Vehicle*, Model Ballast Aktif, sifat-sifat sistem, *Sliding Mode Control* dan kestabilan Lyapunov. Teori-teori tersebut digunakan sebagai acuan untuk mengerjakan Tugas Akhir.

2.1 Penelitian Terdahulu

Pada tugas akhir ini mengacu kepada penelitian terdahulu yaitu penelitian yang dilakukan oleh Ciko Pramuliasari pada tahun 2019 yang berjudul "Model Kinematis Ballast pada Gerak Autonomous Underwater Vehicle (AUV)", penelitian ini menjelaskan tentang pembentukan model kinematis yang terdapat sistem ballast. Dimana ballast diasumsikan dalam bentuk balok dan tabung yang memiliki properti berupa baja dan fiber. Desain AUV yang digunakan adalah UNUSAITS AUV dan REMUS. Gerak yang ditinjau hanya 3 DOF yaitu surge, heave, dan yaw karena AUV berkecepatan rendah dan tanpa faktor lingkungan.

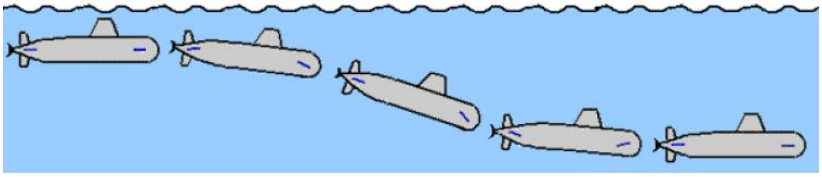
2.2 Autonomous Underwater Vehicle (AUV)

AUV merupakan wahana bawah air tanpa awak yang dapat bergerak dalam enam derajat kebebasan serta melaju di dalam air menggunakan sistem propulsi, dikendalikan dan kemudian dikemudikan oleh operator dengan bantuan komputer diatas kapal pendukung berdasarkan sistem navigasi, panduan, dan kendali [2]. AUV sangat penting dalam kegiatan

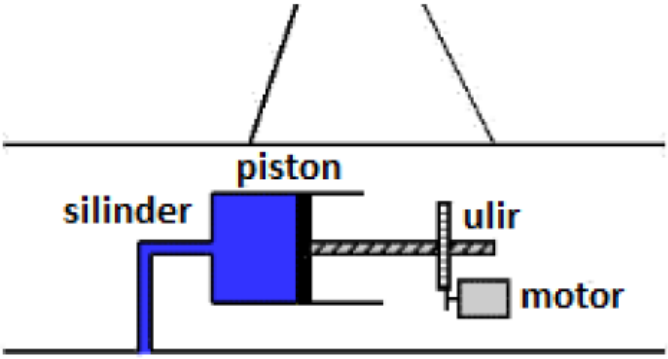
bawah laut karena memiliki kecepatan, daya tahan, dan kemampuan menyelam yang lebih tinggi daripada manusia.

2.2. Ballast Aktif

Ballast merupakan salah satu komponen penting yang diaplikasikan pada kapal selam tanpa awak (AUV) dengan tujuan untuk menjaga kesetimbangan dan mengubah massa jenis AUV. Dalam perkembangannya, ballast telah dimodifikasi sehingga mampu memenuhi kebutuhan AUV dan juga membantu manuver ketika bergerak didalam air. Pada dasarnya, ada dua cara dalam menenggelamkan AUV, yaitu secara dinamis dan juga statis. Sistem dinamis merupakan sistem dengan metode penyelaman dinamis dimana menggunakan sirip atau *hydroplane* dan dibantu dengan kecepatan dari AUV untuk membantu pergerakan AUV agar dapat mengapung dan menyelam di dalam air seperti pada gambar 2.1. Sedangkan sistem statis seperti pada gambar 2.2 memiliki proses penyelaman dengan cara mengubah berat AUV tersebut. Misalnya dengan mengisi tangki ballast yang bertujuan untuk melakukan pergerakan penyelaman dan untuk melakukan pergerakan mengapung dapat dilakukan dengan cara memompa air dari tangki ballast keluar dari AUV [3].



Gambar 2.1 Menyelam secara dinamis



Gambar 2.2 Menyelam secara statis

2.3. Model Ballast Aktif pada AUV

Berdasarkan penelitian terdahulu [4], persamaan gerak AUV terdiri dari gerak translasi dan rotasi. Dimana gerak translasi yang terdiri dari *surge*, *sway* dan *heave*, sedangkan gerak rotasi yang terdiri dari *roll*, *pitch* dan *yaw*. Karena yang diinginkan model AUV kecepatan rendah, maka beberapa gerak translasi diabaikan seperti gerak *sway*, *pitch* and *roll*. Didapatkan percepatan *surge*, *heave* dan *yaw* sebagai berikut:

1. Gerak *surge*

$$\dot{q} = \frac{X_q q + X_{q|q|} q|q| + X_{prop}}{m - X_{\dot{q}}} \tag{2.1}$$

2. Gerak *heave*

$$\dot{w} = \frac{Z_w w + Z_{w|w|} w|w| - (ballast) + Z_{qw} qw + Z_{qq\delta_s} qq\delta_s}{m - Z_{\dot{w}}} \quad (2.2)$$

3. Gerak *yaw*

$$\dot{r} = \frac{N_r r + N_{r|r|} r|r| + N_{qq\delta_r} qq\delta_r}{I_{zz} - N_{\dot{r}}} \quad (2.3)$$

$$ballast = \left(\rho ag \int_{-h}^{0} A(h)dh)\right) - \left(\rho bg \int_{-h}^{L-h} A(h)dh\right) \quad (2.4)$$

Setelah itu dilakukan pelinieran sehingga terbentuklah persamaan linear sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -0.2448 & 0 & 0 \\ 0.0344 & 0.1579 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3881 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ w \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1.92 & 0 \\ 0 & 0 & -1.92 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{prop} \\ \delta_s \\ \delta_r \end{bmatrix}$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ w \\ r \end{bmatrix} + [0][u] \quad (2.5)$$

Dimana X_{prop} merupakan *propeller thrust*, δ_s merupakan kontrol untuk *sway* dan *yaw*, serta δ_r merupakan kontrol untuk *heave* dan *roll*.

2.4. Sifat-sifat Sistem

Sistem memiliki sifat yang berbeda-beda. Terdapat beberapa sifat sistem yakni terkontrol, teramati dan stabil. Untuk sistem linier lebih mudah dianalisis daripada sistem non-linier.

Sistem linier invariant terhadap waktu diberikan pada persamaan berikut[5]:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \tag{2.6}$$

2.4.1. Kestabilan

Berikut ini adalah penjelasan dari kestabilan suatu sistem.

Teorema 2.1 [5] *Diberikan persamaan differensial tingkat satu* $\dot{x}(t) = Ax$ *dengan* $x \in \mathbb{R}^n$, *penyelesaan dengan keadaan awal* $x(0) = x_0$ *dinotasikan oleh* $x(t, x_0)$.

- *Vektor* $\bar{x}$ *yang memenuhi* $f(\bar{x}) = 0$ *disebut suatu* titik setimbang.
- *Suatu titik setimbang* $\bar{x}$ *dikatakan* stabil *bila untuk setiap* $\varepsilon > 0$ *ada* $\delta > 0$ *dan* t_δ *sedemikian hingga bila* $\| x_{t_\delta} - \bar{x} \| < \delta$ *maka* $\| x(t, x_{t_\delta}) - \bar{x} \| < \varepsilon$ *untuk semua* $t > t_\delta$.
- *Suatu titik setimbang* $\bar{x}$ *dikatakan* stabil asimtotik *bila ia stabil dan bila ada* $\delta_1 > 0$ *sedemikian hingga* $\lim_{t \to \infty} \| x(t, x_{t_\delta}) - \bar{x} \| = 0$ *bila* $\| x_{t_\delta} - \bar{x} \| < \delta_1$.
- *Suatu titik setimbang dikatakan* tak stabil *bila ia tidak stabil.*

2.4.2. Keterkontrolan

Diberikan sistem linier terhadap waktu seperti persamaan (2.6). Syarat perlu dan cukup untuk dikatakan terkontrol adalah sebagai berikut[5]:

1. Misalkan M adalah matriks keterkontrolan, sehingga:

$$M = [B\ AB\ A\ 2B \ldots A^{(n-1)}B] \tag{2.7}$$

Persamaan (2.6) dikatakan terkontrol, ketika rank matriks M pada persamaan (2.7) sama dengan rank matriks A

2.5. *Sliding Mode Control* (SMC)

Sliding Mode Control merupakan salah satu metode pengendalian yang berbasis *robust control* dimana sistem ini bekerja untuk mengatasi permasalahan tentang pemodelan. *Sliding Mode Control* (SMC) adalah kontrol umpan balik pensaklaran berkecepatan tinggi yang dapat diterapkan pada sistem linier maupun *nonlinear* [8]. Prinsip kerja dari kontrol *sliding mode* adalah memaksa *trajectory state* suatu sistem menuju permukaan luncur tertentu dan mempertahankannya pada permukaan luncur tersebut. SMC memiliki beberapa keunggulan, yaitu sifatnya yang sangat *robust*, maupun bekerja dengan baik pada sistem *nonlinier* yang memiliki ketidakpastian model ataupun parameter [6].

2.5.1. Fungsi Switching

Pada suatu sistem dinamis [6]:

$$\dot{x}(t) = f(x,t) + b(x,t)u + d(t) \tag{2.9}$$

dimana u input kendali, x merupakan vektor keadaan, $f(x,t)$ dan $b(x,t)$ berupa fungsi terbatas, $d(t)$ gangguan eksternal. Jika xd merupakan x yang diinginkan, maka *tracking error* – nya dapat dinyatakan dengan:

$$e(t) = x(t) - x_d(t) \tag{2.10}$$

Fungsi *switching* yaitu permukaan $S(x,t)$ di dalam ruang keadaan Rn memenuhi persamaan umum:

$$s(x,t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{(n-1)} e(t) \tag{2.11}$$

Untuk *static sliding mode control* menggunakan persamaan (2.11) sedangkan untuk *dynamic sliding mode control* menggunakan persamaan berikut:

$$s(x,t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{(n-1)-1} e(t) \tag{2.12}$$

Dengan λ berupa konstanta positif dan n order sistem dinamik. Dimana fungsi *switching* ini digunakan untuk menentukan besarnya nilai u agar memenuhi kondisi *sliding.*

2.5.2. *Sliding Surface*

Fungsi *switching* disebut dengan permukaan *sliding* (*sliding surface*) jika memenuhi [6]:

$$s(\dot{x}, t) = 0 \tag{2.13}$$

dengan λ suatu konstanta positif yang dipilih agar persamaan diatas menjadi permukaan yang stabil. Permukaan *sliding* berupa garis yang merupakan komponen penting dari SMC sebagai tempat trayektori keadaan meluncur dari kondisi awal menuju keadaan yang diinginkan. Untuk sistem berorde-2 ($n = 2$), permukaan *sliding* dapat ditulis:

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{(2-1)} e(t)$$

$$s(x, t) = \frac{de}{dt} + \lambda e(t)$$

$$s(x, t) = \dot{e} + \lambda e(t)$$

$$s(x, t) = \frac{de}{dt} + \lambda e(t)$$

$$s(x, t) = 0 \tag{2.14}$$

Persaman (2.14) menunjukan suatu garis lurus pada bidang $e\dot{e}$. Permukaan *sliding* ini membagi bidang menjadi dua

bagian, yaitu $s > 0$ dan $s < 0$. Agar trayektori keadaan dapat meluncur, maka sistem harus berada dalam kondisi *sliding*. Besar nilai input kendali bergantung pada nilai $s(x, t)$.

2.5.3. Teori Kestabilan *Lyapunov*

Dalam teori kestabilan *Lyapunov*, diambil sebarang fungsi definit positif sedemikian hingga turunan dari fungsi tersebut definit negatif. Akan dijelaskan lebih rinci diberikan pada definisi dan teorema dibawah ini:

Definisi 2.1. [7] *Diberikan fungsi* $V: E \subset \Re^n$ *dan* $\bar{x} \in E$ *titik ekuilibrium sistem persamaan differensial nonlinear. Fungsi V disebut sebagai fungsi Lyapunov jika memenuhi ketiga pernyataan berikut:*

1. *Fungsi V kontinu dan mempunyai turunan parsial ke satu yang kontinu pada E atau* $V \in C'(E)$.
2. *Fungsi* $V(x) > 0$ *untuk* $\bar{x} \in E$ *dengan* $x \neq \bar{x}$ *dan* $V(\bar{x}) = 0$ *dengan* $x \neq \bar{x}$ *(dengan titik ekuilibrium* $\bar{x}$ *merupakan titik minimum global).*
3. *Fungsi* $\dot{V}(x) \leq 0$ *untuk setiap* $x \in E$.

Berikut adalah definisi yang menjelaskan tentang syarat-syarat suatu fungsi disebut definit positif, definit negatif, semi definit positif dan semi definit negatif:

Definisi 2.2. [7] *Misalkan* $E(x, y)$ *memiliki turunan parsial ke satu yang kontinu pada semua titik* (x, y) *di domain D yang memuat titik* $(0,0)$.

1. *Fungsi E dikatakan definit positif di D jika* $E(0,0) = 0$ *dan* $E(x, y) > 0$ *untuk setiap titik-titik* (x, y) *yang lain di* D.
2. *Fungsi E dikatakan definit negatif di D jika* $E(0,0) = 0$ *dan* $E(x, y) < 0$ *untuk setiap titik-titik* (x, y) *yang lain di* D.

3. *Fungsi E dikatakan semi definit positif di D jika $E(0,0) = 0$ dan $E(x, y) \geq 0$ untuk setiap titik-titik (x, y) yang lain di D.*
4. *Fungsi E dikatakan semi definit negatif di D jika $E(0,0) = 0$ dan $E(x, y) \leq 0$ untuk setiap titik-titik (x, y) yang lain di D.*

Teorema 2.2 [9]

Diasumsikan terdapat sebuah fungsi skalar V pada state x, dengan turunan pertamanya kontinu sehingga memenuhi

1. $V(x)$ merupakan definit positif
2. $\dot{V}(x)$ merupakan definit negatif

Maka titik kesetimbangan sistem tersebut stabil, jika $\dot{V}$ definit negatif maka sistem tersebut stabil asimtotik.

Teorema 2.3 [9]

Diasumsikan terdapat sebuah fungsi skalar V pada state x, dengan turunan pertamanya kontinu sehingga memenuhi

1. $V(x)$ merupakan definit positif
2. $\dot{V}(x)$ merupakan definit negatif
3. $V(x) \to \infty$ untuk $\|x\| \to \infty$

sehingga merupakan stabil global asimtotik.

2.5.4. Kondisi *Sliding*

Perancangan *control law* pada *Sliding Mode Control* (SMC) dilakukan sedemikian hingga $e(t)$ bergerak menuju permukaan *sliding* dan meluncur pada permukaan tersebut untuk semua $t \geq 0$ [6]. Untuk memperoleh *control law* digunakan sebuah fungsi yaitu *Lyapunov* dimana fungsi yang dikonstruksikan merupakan definit positif, yaitu:

$$V = \frac{1}{2}S^2 \tag{2.15}$$

Dengan $V(0) = 0$ dan $V > 0$ untuk $S = 0$. Kondisi yang memenuhi syarat kestabilan sistem merupakan turunan pertama dari persamaan (2.10) yang bersifat definit negatif, yaitu:

$$\dot{V} = S\dot{S} \leq -\eta|S| \tag{2.16}$$

Pertidaksamaan (2.11) disebut kondisi *sliding*. Kondisi tersebut dapat ditulis dalam beberapa bentuk yaitu :

$$S\dot{S} < 0$$

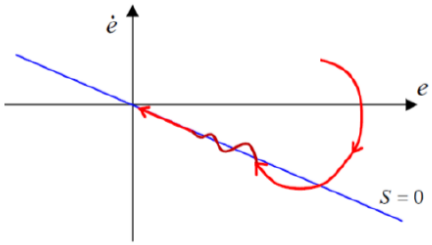
atau

$$\dot{S}.sgn(S) \leq -\eta \tag{2.17}$$

dengan suatu η konstanta positif dan $sgn(S)$ dapat didefinisikan sebagai berikut [6]:

$$sgn(x) = \begin{cases} -1 & ,jika\ x < 0 \\ 0 & ,jika\ x = 0 \\ 1 & .jika\ x > 0 \end{cases}$$

Gambar 2.3 menginterpretasikan gambar untuk kondisi *sliding* dari metode pengendalian SMC, dimana trayektori keadaan bergerak meluncur pada garis lurus $S = 0$ yang merupakan permukaan *sliding*.



Gambar 2.3. Kondisi Sliding

BAB III

METODE PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan metode penelitian yang akan digunakan dalam menyelesaikan permasalahan yang ada di Tugas Akhir. Dengan mengacu pada tinjauan yang ada, metode penelitian ini sangat berguna untuk mempermudah dan menjelaskan secara rinci mengenai langkah-langkah yang akan dilaksanakan untuk menyelesaikan masalah.

3.1. Tahapan Penelitian

1. Studi Literatur

   Pada tahap ini dilakukan studi referensi tentang ballast aktif, *Autnomous Underwater Vehicle* (AUV), model gerak matematika dari kapal dengan tiga derajat kebebasan atau *Degree Of Freedom* (DOF) yaitu *surge*, *heave* dan *yaw*, serta tentang metode yang akan digunakan yaitu *Sliding Mode Control* (SMC). Referensi yang digunakan adalah buku-buku, skripsi, thesis dan paper-paper dalam jurnal ilmiah yang berkaitan dengan topik pada penelitian ini.

2. Identifikasi Model

   Pada tahap ini, dilakukan identifikasi model gerak yang sesuai untuk diaplikasikan pada AUV. Model yang digunakan adalah model *linier* dari tugas akhir yang dikerjakan oleh Ciko Pramuliasari pada tahun 2019.

3. Analisa Model

   Pada tahap ini akan dilakukan analisa dari model yang didapat. Analisa yang dilakukan adalah mencari kestabilan, keteramatan dan keterkontrolan sistem.

4. Desain Kendali dengan *Sliding Mode Control*

   Pada tahap ini akan dilakukan penerapan metode *Sliding Mode Control* (SMC) pada model linier. Terdapat beberapa langkah yang terdiri dari

   a. Penentuan fungsi *switching*.
   b. Menentukan nilai pengendali.
   c. Penggunaan *control law*.
   d. Pengubahan fungsi *signum* menjadi fungsi saturasi.

   Dari tahapan ini diharapkan bisa mendapatkan fungsi saturasi dimana hal tersebut adalah langkah terakhir dari SMC

5. Simulasi

   Pada tahap ini akan dilakukan simulasi menggunakan software SIMULINK untuk mengetahui apakah hasil yang didapatkan sesuai atau tidak.

6. Analisa Hasil

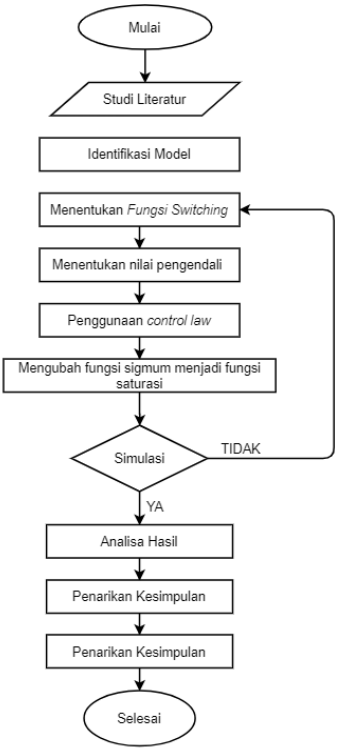
   Pada tahap ini akan dianalisa hasil dari simulasi menggunakan SIMULINK. Hasil dari analisa hasil tersebut akan dibuat landasan untuk penarikan kesimpulan.

7. Penarikan Kesimpulan

   Pada tahap ini, akan dilakukan penarikan kesimpulan dari hasil pembahasan. Setelah itu akan diberikan saran untuk perbaikan pada penelitian berikutnya.

3.2. Diagram Alir

Tahapan penelitian pada tugas akhir ini disajikan pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Diagram Alir

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai rancangan sistem kontrol gerak pada *Autonomous Underwater Vehicle* dengan Ballast aktif. Diawali dengan menganalisa model dengan mengecek keterkontrolan dan keteramatan. Setelah itu dilanjutkan dengan penerapan metode *Sliding Mode Control*. Kemudian akan disimulasikan mengggunakan SIMULINK untuk mengetahui performa sistem berdasarkan hasil yang diperoleh.

4.1. Analisis Sifat Sistem

Sebelum dilakukan perancangan sistem kendali, dilakukan analisis sifat sistem. Berikut adalah analisis sifat sistem:

4.1.1. Kestabilan

Kestabilan sistem dapat diuji dengan mencari nilai eigennya, dengan persamaan karakteristik sistem sebagai berikut:

$$|A - \lambda I| = 0$$

$$\left|\begin{bmatrix} -0.2448 & 0 & 0 \\ 0.0344 & 0.1579 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3881 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix}\right| = 0$$

$$\left|\begin{bmatrix} -0.2448 - \lambda & 0 & 0 \\ 0.0344 & 0.1579 - \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0.3881 - \lambda \end{bmatrix}\right| = 0$$

Dengan menggunakan MATLAB, diperoleh nilai eigen pada persamaan tersebut sebesar:

λ_1 = -0.2448

λ_2 = 0.3881

$\lambda_3 = 0.1579$

Hasil dari uji kestabilan sistem diatas menunjukkan bahwa terdapat nilai eigen yang bagian *real* positif sehingga sistem dikatakan tidak stabil.

4.1.2 Keterkontrolan

Suatu matriks dikatakan terkontrol apabila memenuhi persyaratan pada bab 2.4.2, dengan:

$$A = \begin{bmatrix} -0.2448 & 0 & 0 \\ 0.0344 & 0.1579 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3881 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1.92 & 0 \\ 0 & 0 & -1.92 \end{bmatrix}$$

sehingga,

$$AB = \begin{bmatrix} -2.4480 & 0 & 0 \\ 0.0344 & -0.1579 & 0 \\ 0 & 0 & -0.3881 \end{bmatrix}$$

$$A^2B = \begin{bmatrix} 5.9927 & 0 & 0 \\ -0.0788 & -0.0249 & 0 \\ 0 & 0 & -0.1506 \end{bmatrix}$$

$$A^3B = \begin{bmatrix} -14.6701 & 0 & 0 \\ 0.1937 & -0.0039 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0585 \end{bmatrix}$$

Sehingga diperoleh matriks keterkontrolan sebagai berikut:

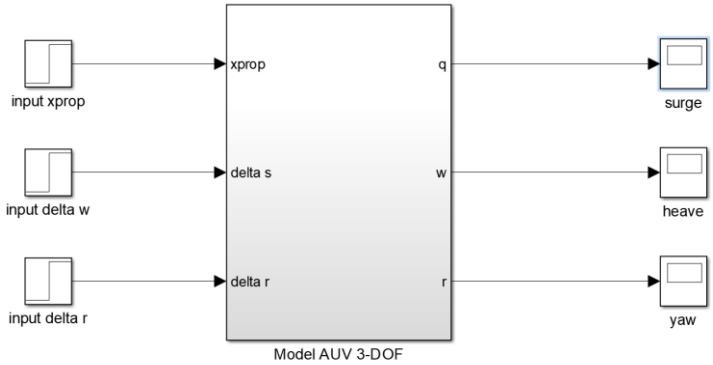
$$m_c = \begin{bmatrix} -2.4480 & 0 & 0 & 5.9927 & 0 & 0 & -14.6701 & 0 & 0 \\ 0.0344 & -0.1579 & 0 & -0.0788 & -0.0249 & 0 & 0.1937 & -0.0039 & 0 \\ 0 & 0 & -0.3881 & 0 & 0 & -0.1506 & 0 & 0 & -0.0585 \end{bmatrix}$$

Dengan menggunakan MATLAB, diperoleh $rank\ M_c = n = 3$ yang berarti *rank* pada m_c sama dengan orde sistem sehingga menunjukkan bahwa sistem tersebut terkontrol yang berarti bahwa sistem ballast pada AUV dapat

dilakukan desain kendali untuk memperbaiki keluaran sistem.

4.2. Perancangan Sistem Tanpa Kontrol

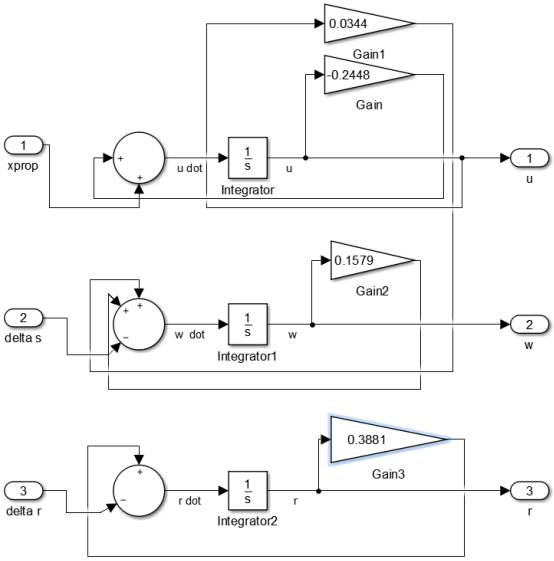
Sistem Ballast pada *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) berdasarkan persamaan (2.5) tanpa diberi kontol mempunyai blok diagram yang telah diimplementasikan pada simulink sebagai berikut:



Gambar 4.1. Diagram Blok AUV 3-DOF

Gambar 4.1 menunjukkan diagram blok AUV 3 DOF (*Degree of Freedom*) yang terdiri dari subsistem gerak *surge*, *heave*, *yaw*. Pada gambar tersebut, inputan X_{prop} , delta s (δ_s), delta r (δ_r) merupakan sinyal step sedangkan keluaran dari sistem adalah gerak *surge*, gerak *heave*, dan gerak *yaw*.

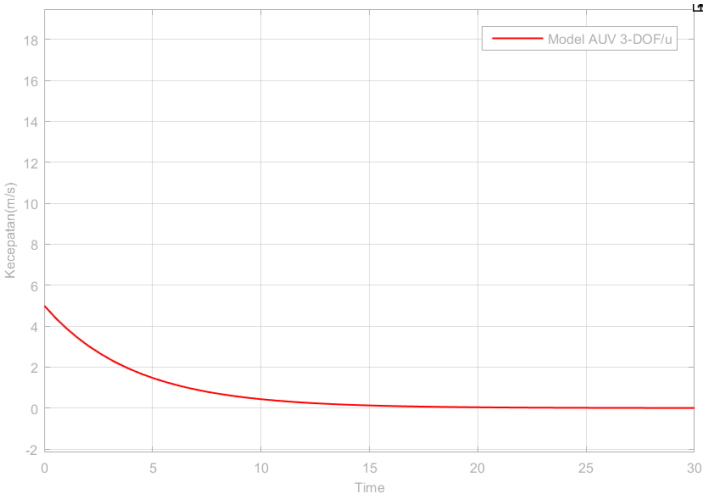
Berikut ini adalah gambar dari diagram blok subsistem gerak *surge*, *heave*, *yaw*.



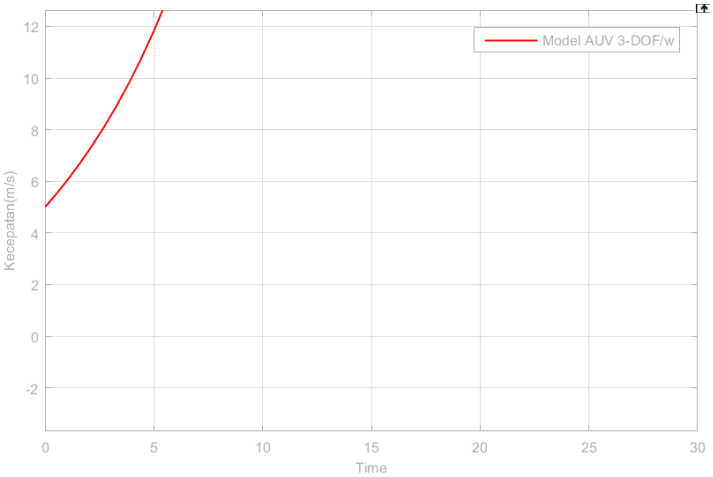
Gambar 4.2. Diagram Blok Subsistem gerak *surge*, *heave*, dan *yaw*

Gambar 4.2 menunjukkan blok diagram dari subsistem yang terdiri dari persamaan 2.5 sehingga menghasilkan suatu keluaran *u*, *v*, dan *r*.

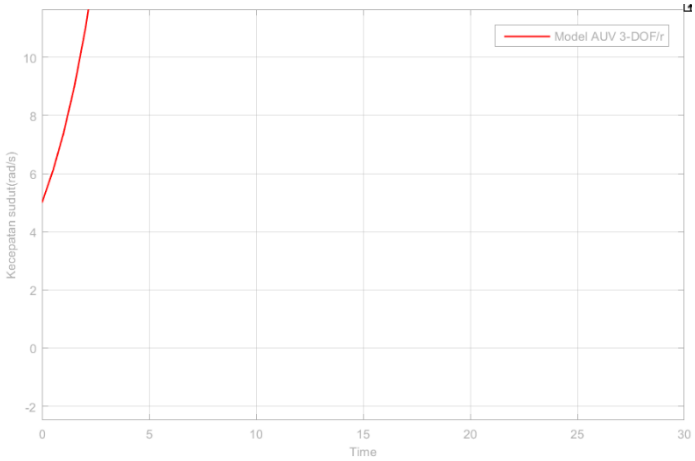
Setelah terbentuk blok diagram, maka akan disimulasikan pada *software* Simulink pada MATLAB sehingga menghasilkan grafik seperti pada gambar (4.3).



(a) Respon gerak *surge*



(b) Respon gerak *heave*



(c) Respon gerak *yaw*

Gambar 4.3. (a), (b) dan (c) Respon grafik tanpa kontrol

Pada gambar 4.3 terlihat bahwa pada gerak *surge* telah menuju ke titik setimbang, sedangkan gerak *heave* dan gerak *yaw* menjauh dari titik setimbang sehingga *steady state error* dan *overshoot* tidak dapat diprediksi.

4.3. Perancangan Sistem Kontrol SMC

Pada perancangan sistem kontrol gerak menggunakan metode *Sliding Mode Control* (SMC) akan dibagi menjadi tiga yaitu perancangan sistem kontrol gerak pada *surge*, *heave*, dan *yaw*.

4.3.1. Perancangan Sistem Kontrol Gerak *Surge*

Untuk perancangan kontrol SMC, langkah pertama yang harus dilakukan adalah menetapkan q_d yakni gerak *surge*. Selanjutnya dengan menggunakan SMC, akan digunakan nilai *error* selisih antara gerak *surge* yang ada dengan gerak *surge* yang diinginkan.

Dari persamaan (2.5) didapatkan:

$$\dot{q} = -0{,}2448q + x_{prop} \tag{4.1}$$

Tracking error dari gerak *surge* adalah:

$$\tilde{q} = q - q_d$$

Dimana q_d adalah konstan

Karena sistem berorde 1 maka akan dibentuk fungsi *switching* seperti pada persamaan (2.11) sebagai berikut:

$$S_1(q,t) = \left(\frac{d}{dx} + \lambda\right)^{n-1} \tilde{q} \text{ , dengan n=1}$$

$$S_1(q,t) = \left(\frac{d}{dx} + \lambda\right)^{1-1} \tilde{q}$$

$$S_1(q,t) = \tilde{q}$$

$$S_1(q,t) = q - q_d$$

Sedangkan turunan dari $S_1(q,t)$ adalah

$$S_1(\dot{q},t) = \dot{q} - q_d \tag{4.2}$$

Karena q_d = konstan maka $\dot{q_d} = 0$. Dengan mensubstitusikan persamaan (4.1) maka didapat:

$$S_1(\dot{q}, t) = \dot{q}$$

$$S_1(\dot{q}, t) = -0{,}2448q + x_{prop} \tag{4.3}$$

Selanjutnya akan ditentukan nilai estimasi $\hat{x}_{prop}$ dari persamaan (4.3) dengan mensubstitusikan $S_1(\dot{q}, t) = 0$

$$0 = -0{,}2448q + x_{prop} \tag{4.4}$$

Sehingga didapat nilai $\hat{x}_{prop}$ adalah

$$\hat{x}_{prop} = 0{,}2448q \tag{4.5}$$

Berdasarkan *control law* yang memenuhi kondisi *sliding* didapatkan

$$x_{prop} = \hat{x}_{prop} - K_1.sgn(S_1) \tag{4.6}$$

Dari persamaan (4.5) dapat disubstitusikan ke persamaan (4.6) diperoleh:

$$x_{prop} = 0{,}2448q - K_1.sgn(S_1) \tag{4.7}$$

Setelah mendapatkan x_{prop}, seanjutnya akan disubstitusikan pada persamaan (4.3) sehingga menjadi

$$S_1(\dot{q}, t) = -0{,}2448q + 0{,}2448q - K_1.sgn(S_1)$$

$$S_1(\dot{q}, t) = -K_1.sgn(S_1) \tag{4.8}$$

Selanjutnya akan dicari nilai K dengan cara mensubstitusikan persamaan (4.8) ke persamaan (2.17) agar memenuhi kondisi *sliding*, maka diperoleh:

$$S_1\dot{S}_1 \leq -\eta|S_1|$$
$$S_1(-K_1.Sgn(s_1)) \leq -\eta|S_1|$$

$$-K_1.Sgn(s_1) \leq \frac{-\eta|S_1|}{S_1}$$
$$-K_1.Sgn(s_1) \leq -\eta \tag{4.9}$$

Dengan menggunakan aturan *signum*, jika $S_1 > 0$ maka $K_1 \geq \eta$, dan jika $S_1 < 0$ maka $K_1 \leq -\eta$ .Dari kedua persamaan tersebut , maka diperoleh

$$-K_1 \leq \eta \leq K_1$$
$$|\eta| \leq K_1 \tag{4.10}$$

Dari persamaan (4.10) diperoleh bahwa nilai K_1 adalah

$$K_1 = max|\eta| \tag{4.11}$$

Selanjutnya digunakan suatu *boundary layer* yang berfungsi meminimalkan *chattering* dengan cara mengubah fungsi *signum* (sgn) menjadi fungsi saturasi (sat) sebagai berikut:

$$x_{prop} = \hat{x}_{prop} - K_1.sat\left(\frac{S_1}{\phi}\right) \tag{4.12}$$

Maka dengan mensubstitusikan persamaan (4.5) dan persamaan (4.11) ke persamaan (4.12), telah didapatkan sistem kontrol SMC untuk gerak *surge* pada *Autonomous Underwater Vehicle* sebagai berikut:

$$x_{prop} = 0{,}2448q - max|\eta|.sat\left(\frac{s_1}{\phi}\right) \tag{4.13}$$

4.3.2. Perancangan Sistem Kontrol Gerak *Heave*

Untuk perancangan kontrol SMC, langkah pertama yang harus dilakukan adalah menetapkan w_d yakni gerak *heave*. Selanjutnya dengan menggunakan SMC, akan digunakan nilai *error* selisih antara gerak *heave* yang ada dengan gerak *heave* yang diinginkan.

Dari persamaan (2.5) didapatkan:

$$\dot{w} = 0{,}0344q + 0{,}1579w - \delta_s \qquad (4.14)$$

Tracking error dari gerak *heave* adalah:

$$\widetilde{w} = w - w_d$$

Dimana w_d adalah konstan

Karena sistem berorde 1 maka akan dibentuk fungsi *switching* seperti pada persamaan (2.11) sebagai berikut:

$$S_2(w,t) = \left(\frac{d}{dx} + \lambda\right)^{n-1} \widetilde{w} \text{ , dengan n=1}$$

$$S_2(w,t) = \left(\frac{d}{dx} + \lambda\right)^{1-1} \widetilde{w}$$

$$S_2(w,t) = \widetilde{w}$$

$$S_2(w,t) = w - w_d$$

Sedangkan turunan dari $S_2(w,t)$ adalah

$$S_2(\dot{w},t) = \dot{w} - w_d \qquad (4.15)$$

Karena w_d = konstan maka $\dot{w_d} = 0$. Dengan mensubstitusikan persamaan (4.14) maka didapat:

$$S_2(\dot{w}, t) = \dot{w}$$

$$S_2(\dot{w}, t) = 0{,}0344q + 0{,}1579w - \delta_s \qquad (4.16)$$

Selanjutnya akan ditentukan nilai estimasi $\hat{\delta}_s$ dari persamaan (4.16) dengan mensubstitusikan $S_2(\dot{w}, t) = 0$

$$0 = 0{,}0344q + 0{,}1579w - \delta_s \qquad (4.17)$$

Sehingga didapat nilai $\hat{\delta}_s$ adalah

$$\hat{\delta}_s = 0{,}0344q + 0{,}1579w \qquad (4.18)$$

Berdasarkan *control law* yang memenuhi kondisi *sliding* didapatkan

$$\delta_s = \hat{\delta}_s - K_2.sgn(S_2) \qquad (4.19)$$

Dari persamaan (4.18) dapat disubstitusikan ke persamaan (4.19) diperoleh:

$$\delta_s = 0{,}0344q + 0{,}1579w - K_2.sgn(S_2) \qquad (4.20)$$

Setelah mendapatkan δ_s, selanjutnya akan disubstitusikan pada persamaan (4.16) sehingga menjadi

$$S_2(\dot{w}, t) = 0{,}0344q + 0{,}1579w - (0{,}0344q + 0{,}1579w - K_2.sgn(S_2))$$

$$S_2(\dot{w}, t) = K_2.sgn(S_2) \qquad (4.21)$$

Selanjutnya akan dicari nilai K dengan cara mensubstitusikan persamaan (4.21) ke persamaan (2.17) agar memenuhi kondisi *sliding*, maka diperoleh:

$$S_2\dot{S}_2 \leq -\eta|S_2|$$

$$S_2(K_2.Sgn(s_2)) \leq -\eta|S_2|$$
$$K_2.Sgn(s_2) \leq \frac{-\eta|S_2|}{S_2}$$
$$K_2.Sgn(s_2) \leq -\eta \tag{4.22}$$

Dengan menggunakan aturan *signum*, jika $S_2 > 0$ maka $K_2 \leq -\eta$, dan jika $S_2 < 0$ maka $-K_2 \leq -\eta$. Didapatkan nilai K_2 adalah

$$K_2 = -\eta - 1 \tag{4.23}$$

Selanjutnya digunakan suatu *boundary layer* yang berfungsi meminimalkan *chattering* dengan cara mengubah fungsi *signum* (sgn) menjadi fungsi saturasi (sat) sebagai berikut:

$$\delta_s = \hat{\delta}_s - K_2.sat\left(\frac{S_2}{\phi}\right) \tag{4.24}$$

Maka dengan mensubstitusikan persamaan (4.18) dan persamaan (4.23) ke persamaan (4.24), telah didapatkan sistem kontrol SMC untuk gerak *heave* pada *Autonomous Underwater Vehicle* sebagai berikut:

$$\delta_s = 0{,}0344q + 0{,}1579w - (-\eta - 1).sat\left(\frac{s_2}{\phi}\right) \tag{4.25}$$

4.3.3. Perancangan Sistem Kontrol Gerak *Yaw*

Untuk perancangan kontrol SMC, langkah pertama yang harus dilakukan adalah menetapkan r_d yakni gerak *yaw*. Selanjutnya dengan menggunakan SMC, akan digunakan nilai *error* selisih antara gerak *yaw* yang ada dengan gerak *yaw* yang diinginkan.

Dari persamaan (2.5) didapatkan:

$$\dot{r} = 0{,}3881r - \delta_r \tag{4.26}$$

Tracking error dari gerak *yaw* adalah:

$$\tilde{r} = r - r_d$$

Dimana r_d adalah konstan

Karena sistem berorde 1 maka akan dibentuk fungsi *switching* seperti pada persamaan (2.11) sebagai berikut:

$$S_3(r,t) = \left(\frac{d}{dx} + \lambda\right)^{n-1} \tilde{r} \text{ , dengan n=1}$$

$$S_3(r,t) = \left(\frac{d}{dx} + \lambda\right)^{1-1} \tilde{r}$$

$$S_3(r,t) = \tilde{r}$$

$$S_3(r,t) = r - r_d$$

Sedangkan turunan dari $S_3(r,t)$ adalah

$$S_3(\dot{r},t) = \dot{r} - r_d \tag{4.27}$$

Karena r_d = konstan maka $\dot{r_d} = 0$. Dengan mensubstitusikan persamaan (4.26) maka didapat:

$$S_3(\dot{r},t) = \dot{r}$$

$$S_3(\dot{r},t) = 0{,}3881r - \delta_r \tag{4.28}$$

Selanjutnya akan ditentukan nilai estimasi $\hat{\delta}_r$ dari persamaan (4.28) dengan mensubstitusikan $S_1(\dot{q},t) = 0$

$$0 = 0{,}3881r - \delta_r \tag{4.29}$$

Sehingga didapat nilai $\hat{\delta}_r$ adalah

$$\hat{\delta}_r = 0{,}3881r \tag{4.30}$$

Berdasarkan *control law* yang memenuhi kondisi *sliding* didapatkan

$$\delta_r = \hat{\delta}_r - K_3.sgn(S_3) \tag{4.31}$$

Dari persamaan (4.30) dapat disubstitusikan ke persamaan (4.31) diperoleh:

$$\delta_r = 0{,}3881r - K_3.sgn(S_3) \tag{4.32}$$

Setelah mendapatkan δ_r, selanjutnya akan disubstitusikan pada persamaan (4.28) sehingga menjadi

$$S_3(\dot{r}, t) = 0{,}3881r - (0{,}3881r - K_3.sgn(S_3))$$

$$S_1(\dot{q}, t) = K_3.sgn(S_3) \tag{4.33}$$

Selanjutnya akan dicari nilai K dengan cara mensubstitusikan persamaan (4.33) ke persamaan (2.17) agar memenuhi kondisi *sliding*, maka diperoleh:

$$\begin{aligned}
&S_3\dot{S}_3 \leq -\eta|S_3| \\
&S_3(K_3.Sgn(s_3)) \leq -\eta|S_3| \\
&K_3.Sgn(s_3) \leq \frac{-\eta|S_3|}{S_3} \\
&K_3.Sgn(s_3) \leq -\eta
\end{aligned} \tag{4.34}$$

Dengan menggunakan aturan *signum*, jika $S_3 > 0$ maka $K_3 \leq -\eta$, dan jika $S_3 < 0$ maka $-K_3 \leq -\eta$. Didapatkan nilai K_3 adalah

$$K_3 = -\eta - 1 \tag{4.35}$$

Selanjutnya digunakan suatu *boundary layer* yang berfungsi meminimalkan *chattering* dengan cara mengubah fungsi *signum* (sgn) menjadi fungsi saturasi (sat) sebagai berikut:

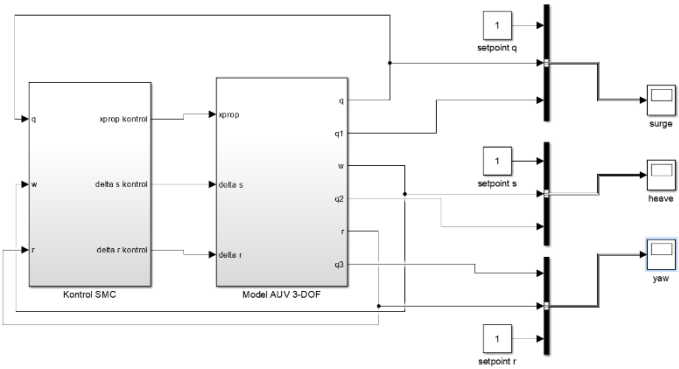
$$\delta_r = \hat{\delta}_r - K_3 . sat\left(\frac{S_3}{\phi}\right) \tag{4.36}$$

Maka dengan mensubstitusikan persamaan (4.30) dan persamaan (4.35) ke persamaan (4.36), telah didapatkan sistem kontrol SMC untuk gerak *yaw* pada *Autonomous Underwater Vehicle* sebagai berikut:

$$\delta_r = 0{,}3881r - (-\eta - 1\,) . sat\left(\frac{s_3}{\phi}\right) \tag{4.37}$$

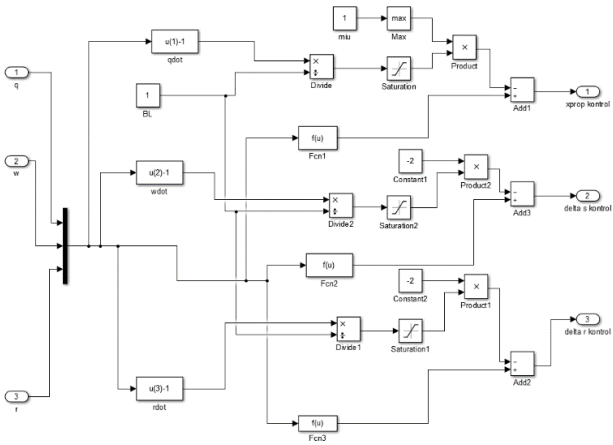
4.3.4. Simulasi Sistem Kontrol dengan Metode SMC

Setelah diperoleh rancangan sistem kontrol gerak dengan menggunakan metode SMC, selanjutnya akan di simulasikan menggunakan SIMULINK pada MATLAB. Sistem kontrol ini dirancang dalam bentuk blok diagram pada sistem *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) dengan $\eta = 1$ dan $\phi = 1$. Berikut diagram blok *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) dengan menggunakan metode SMC.



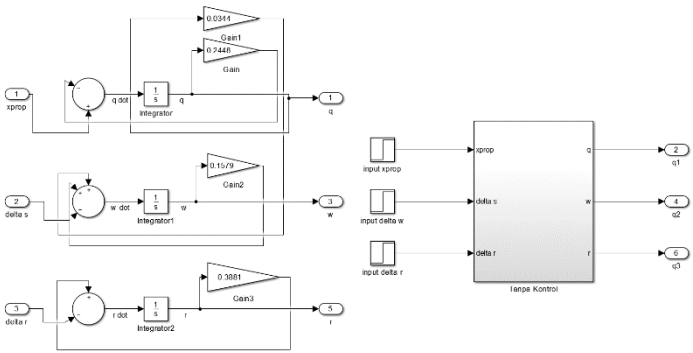
Gambar 4.4. Diagram blok AUV dengan metode SMC

Dari Gambar 4.4 kemudian dirangkai diagram blok subsistem dari Kontrol SMC yang didapat dari hasil perencanaan sistem kontrol gerak *surge*, *heave*, dan *yaw* pada persamaan (2.31), (2.43), dan (2.55) disajikan dalam Gambar 4.5.



Gambar 4.5. Diagram blok subsistem Kontrol SMC

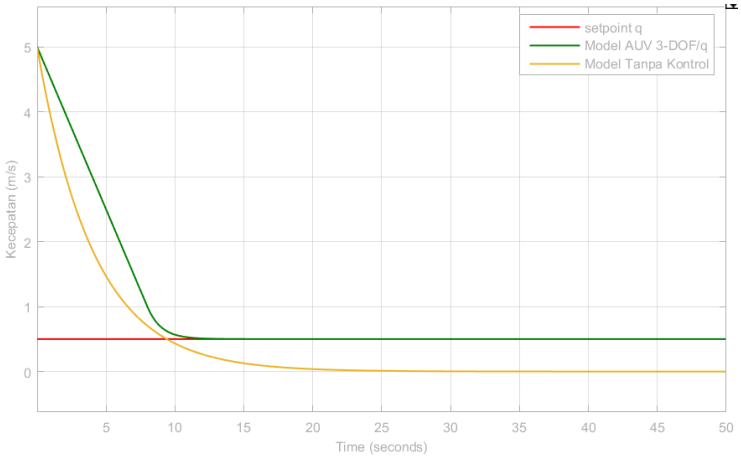
Dari Gambar 4.4 kemudian dirangkai diagram blok subsistem dari Model AUV 3-DOF yang disajikan pada gambar 4.6.



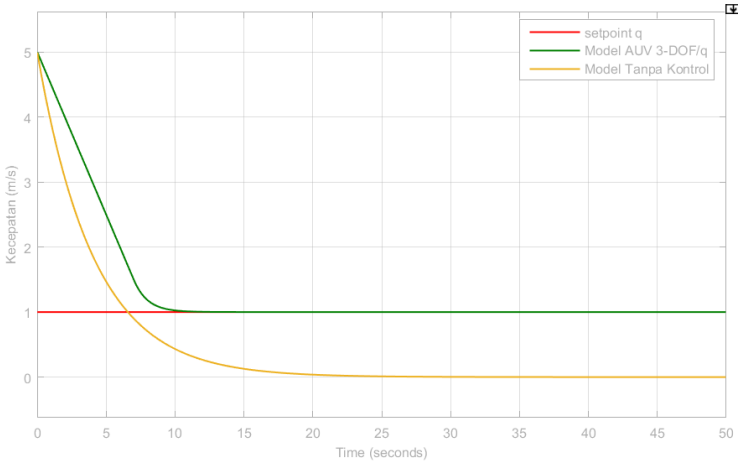
Gambar 4.6. Diagram blok subsistem Model AUV 3-DOF

Setelah terbentuk diagram blok Kontrol SMC dan Model AUV 3-DOF, akan disimulasikan masing-masing gerak dengan 3 *setpoint* yang berbeda.

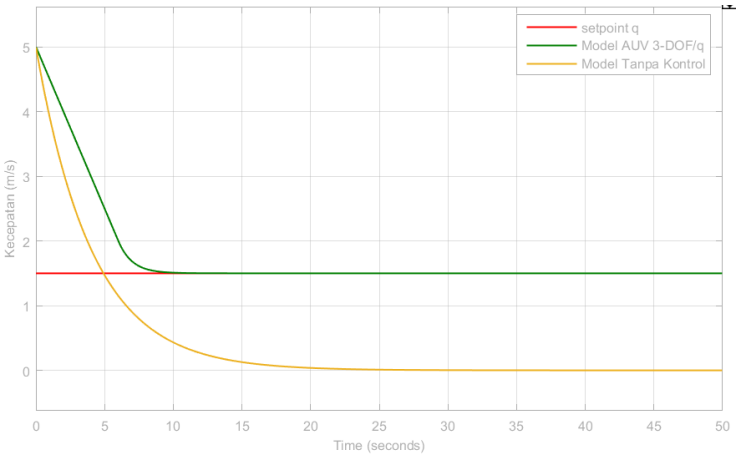
Pada gerak *surge* digunakan 3 *setpoint* dengan masing-masing nilai 0.5 m/s, 1 m/s dan 1.5 m/s. Untuk gerak *heave* digunakan 3 *setpoint* dengan masing-masing nilai 1 m/s, 4 m/s dan 7 m/s. Sedangkan untuk gerak *yaw* digunakan 3 *setpoint* dengan masing-masing nilai 0.78 rad/s (45°), -0.78 rad/s (-45°), 1.57 rad/s (90°). Berikut adalah hasil simulasi gerak AUV setelah diberi kontrol:



(a) Respon gerak *surge* dengan nilai *setpoint* 0.5



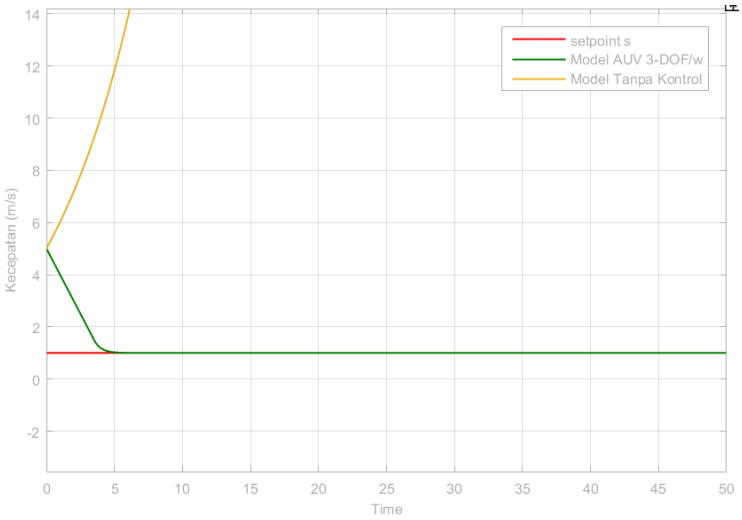
(b) Respon gerak *surge* dengan nilai *setpoint* 1



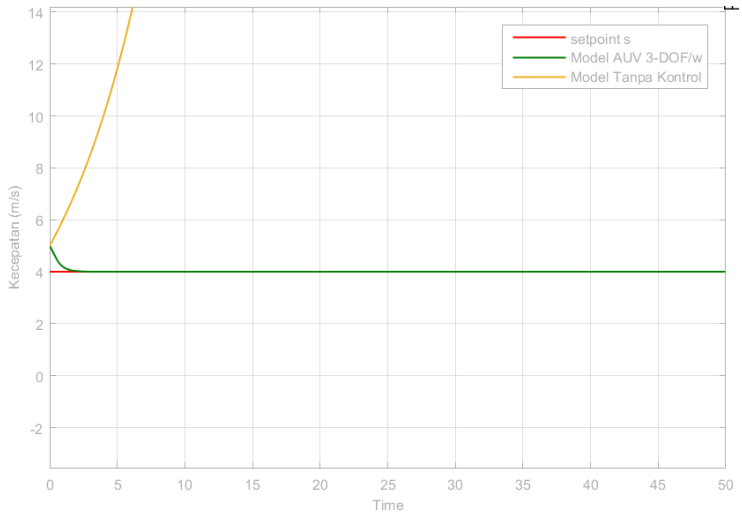
(c) Respon gerak *surge* dengan nilai *setpoint* 1.5

Gambar 4.7. Respon gerak *surge* menggunakan kontrol SMC

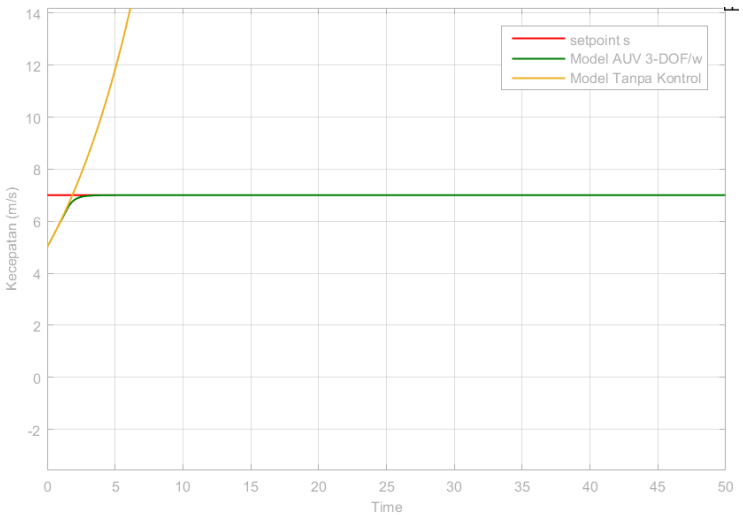
Gambar 4.7 merupakan hasil respon gerak *surge* dengan menggunakan metode SMC. Gambar 4.7 (a) menunjukkan respon gerak *surge* dengan nilai *setpoint* 0.5 pertama kali mencapai kestabilan (*hittling time*) pada waktu 14.3 detik dan *steady state error* 0.0003% serta *overshoot* 0%. Gambar 4.7 (b) merupakan hasil respon gerak *surge* dengan nilai *setpoint* 1 dengan metode SMC, dimana respon gerak *surge* mencapai *hittling time* pada waktu 13.3 detik dan *steady state error* 0.0001% serta *overshoot* 0%. Gambar 4.7 (c) merupakan hasil respon gerak *surge* dengan nilai *setpoint* 1.5 dengan metode SMC, dimana respon gerak *surge* mencapai *hittling time* pada waktu 12.7 detik dan *steady state error* 0% serta *overshoot* 0%.



(a) Respon gerak *heave* dengan nilai *setpoint* 1



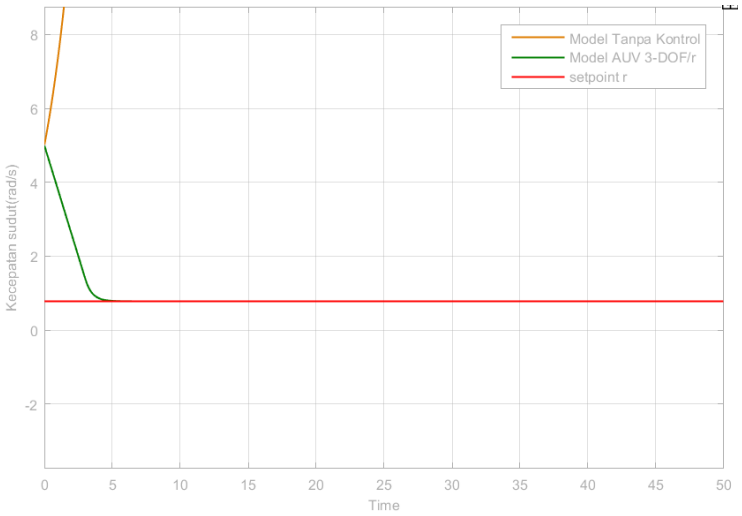
(b) Respon gerak *heave* dengan nilai *setpoint* 4



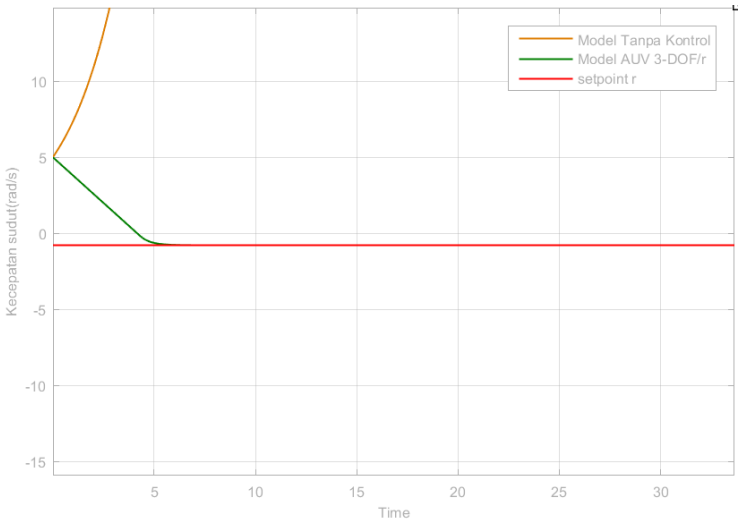
(c) Respon gerak *heave* dengan nilai *setpoint* 7

Gambar 4.8. Respon gerak *heave* menggunakan kontrol SMC

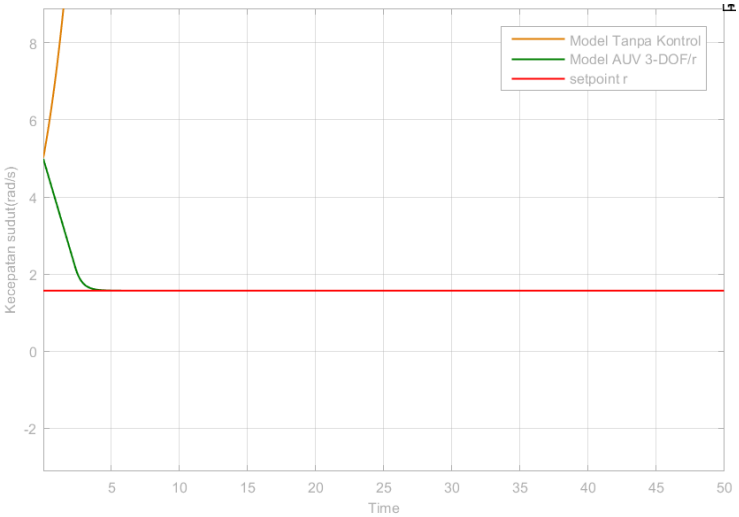
Gambar 4.8 merupakan hasil respon gerak *heave* dengan menggunakan metode SMC. Gambar 4.8 (a) menunjukkan respon gerak *heave* dengan nilai *setpoint* 1 pertama kali mencapai kestabilan (*hittling time*) pada waktu 7.3 detik dan *steady state error* 0.0005% serta *overshoot* 0%. Gambar 4.7 (b) merupakan hasil respon gerak *heave* dengan nilai *setpoint* 4 dengan metode SMC, dimana respon gerak *heave* mencapai *hittling time* pada waktu 3.8 detik dan *steady state error* 0% serta *overshoot* 0%. Gambar 4.7 (c) merupakan hasil respon gerak *heave* dengan nilai *setpoint* 7 dengan metode SMC, dimana respon gerak *heave* mencapai *hittling time* pada waktu 9.8 detik dan *steady state error* 0.0001% serta *overshoot* 0%.



(a) Respon gerak *yaw* dengan nilai *setpoint* 0.78



(b) Respon gerak *yaw* dengan nilai *setpoint* -0.78



(c) Respon gerak *yaw* dengan nilai *setpoint* 1.57

Gambar 4.9. Respon gerak *yaw* menggunakan kontrol SMC

Gambar 4.9 merupakan hasil respon gerak *yaw* dengan menggunakan metode SMC. Gambar 4.9 (a) menunjukkan respon gerak *yaw* dengan nilai *setpoint* 0.78 pertama kali mencapai kestabilan (*hittling time*) pada waktu 6.5 detik dan *steady state error* 0% serta *overshoot* 0%. Gambar 4.7 (b) merupakan hasil respon gerak *yaw* dengan nilai *setpoint* -0.78 dengan metode SMC, dimana respon gerak *yaw* mencapai *hittling time* pada waktu 6.9 detik dan *steady state error* 0% serta *overshoot* 0%. Gambar 4.7 (c) merupakan hasil respon gerak *yaw* dengan nilai *setpoint* 1.57 dengan metode SMC, dimana respon gerak *yaw* mencapai *hittling time* pada waktu 5.8 detik dan *steady state error* 0.0003% serta *overshoot* 0%.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini diberikan kesimpulan dari analisis dan pembahasan yang telah dilakukan terhadap sistem kontrol dengan menggunakan metode SMC yang telah diterapkan pada gerak *Autonomous Underwater Vehicle*. Selain itu, diberikan saran dan rekomendasi yang dapat dilakukan sebagai kelanjutan penelitian ini

5.1 Kesimpulan

Dari analisis dan pembahasan yang telah dilakukan pada bab sebelumnya yakni penerapan metode *sliding Mode Control* pada *Autonomous Underwater vehicle* dengan ballast aktif diperoleh sebagai berikut:

1. Perancangan sistem kontrol dengan menggunakan *Sliding Mode Control* (SMC) telah diterapkan pada gerak *surge*, *heave* dan *yaw* pada *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) didapatkan

   Gerak *surge*:

   $$x_{prop} = 0{,}2448q - max|\eta|.sat\left(\frac{s_1}{\phi}\right)$$

   Gerak *heave*:

   $$\delta_s = 0{,}0344q + 0{,}1579w - (-\eta - 1).sat\left(\frac{s_2}{\phi}\right)$$

   Gerak *yaw*:

   $$\delta_r = 0{,}3881r - (-\eta - 1\ ).sat\left(\frac{s_3}{\phi}\right)$$

2. Performa kontrol gerak *Autonomous Underwater Vehicle* dengan menggunakan metode *Sliding Mode Control* telah diperoleh hasil bahwa gerak *surge*, *heave* dan *yaw* stabil menuju ke nilai *setpoint* yang diberikan. Respon gerak

surge diberikan 3 *setpoint* menghasilkan *hittling time* kurang dari 14.3, *steady state error* kurang dari 0.0003% dan *overshoot* 0%. Untuk respon gerak *heave* diberikan 3 *setpoint* menghasilkan *hittling time* kurang dari 9.8, *steady state error* kurang dari 0.0005% dan *overshoot* 0%. Untuk respon gerak *yaw* diberikan 3 *setpoint* menghasilkan *hittling time* kurang dari 6.9, *steady state error* kurang dari 0.0003% dan *overshoot* 0%. Hal ini menunjukkan bahwa metode SMC bekerja dengan baik pada sistem gerak AUV dengan ballast aktif.

5.2 Saran

Adapun yang penulis sarankan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah menggunakan metode yang lain untuk perancangan kontrol agar dapat mengetahui metode mana yang lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Puspita, S. (2019). *Model Regresi Linear Dari Ballast Aktif Pada Autonomous Underwater Vehicle (AUV)*. Surabaya : Tugas Akhir, Departemen Matematika, FMKSD, ITS.

[2] Yang, C. 2007. *Modular Modeling and Control For Autonomous Underwater Vehicle (AUV)*. *Thesis*. National University of Singapore. Singapore.

[3] Hatinoto, R. 2018. *Analisa Sistem Ballast Aktif Desain AUV-MILITUS (Autonomous Underwater Vehicle Multi Purpose Intelligent Tandem Unmanned System). Tugas Akhir*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.

[4] Pramuliasari, C. (2019). *Model Kinematis Ballast pada Gerak Autonomous Underwater Vehicle (AUV)*. Surabaya: Tugas Akhir, Departemen Matematika, FMKSD, ITS.

[5] Subiono. (2016). *Sistem Linier dan Kontrol Optimal.* Surabaya: Jurusan Matematika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

[6] Cahyani, N. D. *Perbandingan Metode SMC dan PID pada Rancangan Sistem Kontrol Gerak Autonomous Surface Vehicle (ASV) Terhadap Pengaruh Lingkungan.* Surabaya: Tugas Akhir, Departemen Matematika, FMKSD, ITS.

[7] Palm, R, Driankov, D., dan Hellendoorn, H. (1997). *Model Based Fuzzy Control: Fuzzy Gain Scheduller and Sliding Mode Controllers*. Berlin: Springer-Verlag

[8] Mursyitah, D. 2014. Studi Perfomasi Sliding Mode dan PID Pada Pengendalian Kecepatan Motor DC. *Jurnal Teknik Elektro ITP* 3(2) : 113

[9] Oktafianto, K. 2015. Desain dan Analisa Kendali Gerak Autonomous Underwater Vehicle Menggunakan Metode Fuzzy Sliding Mod Control. *Thesis.* Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.

LAMPIRAN I

Parameter Desain REMUS

Parameter	Nilai
m	30,581
ρ	1030
V	0,05
g	9,81
I_{zz}	3,45
D	0,03
K_T	0,3265
ω_p	2400
U_a	1,5
α	0,4
X_q	6
$X_{q\|q\|}$	-6,68
$X_{\dot{q}}$	0,513
Z_w	1,1
$Z_{w\|w\|}$	1,24
$Z_{\dot{w}}$	1,57
$Z_{qq\delta_s}$	-1.92
Z_{qw}	1
N_r	3
$N_{r\|r\|}$	4,13
$N_{\dot{r}}$	1,57
$N_{qq\delta_r}$	-1,92

BIODATA PENULIS

Penulis bernama Ardyan Chandra Dwi Anggoro, lahir di Sidoarjo, 5 Maret 1998. Jenjang pendidikan yang ditempuh oleh penulis dimulai dari SDN Larangan Sidoarjo (2004-2010), SMPN 3 Sidoarjo (2010-2013), SMAN 1 Sidoarjo (2013-2016). Setelah lulus dari jenjang SMA, penulis melanjutkan studi ke jenjang S1 di Departemen Matematika ITS surabaya melalui jalur mandiri. Selama mengikuti perkuliahan di ITS, penulis juga aktif dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Matematika ITS sebagai Staff Departemen *Sport and Art Development* (2017-2018) dan Kepala Departement *Sport and Art Development* (2018-2019). Selain berorganisasi, penulis juga aktif di beberapa kepanitiaan seperti GERIGI 2017 sebagai Fasilitator, Olimpiade Matematika ITS (OMITS) 2018 dan 2019 sebagai panitia, GEMPA FMIPA (2016) sebagai Sie Acara. Penulis juga mengikuti Kerja Praktik di PT. PINDAD (Persero) Turen pada tahun 2019 selama satu bulan dan ditempatkan di divisi Rendalprod (Perencanaan Pengendalian Produksi).