

SKRIPSI

RANCANG BANGUN MINI *UNDERWATER* ROBOT

Disusun dan diajukan oleh

HAMDANI

D211 15 513



DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2021

SKRIPSI

RANCANG BANGUN MINI *UNDERWATER* ROBOT

Disusun dan diajukan oleh

HAMDANI

D211 15 513

**Merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin**

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2021

LEMBAR PENGESAHAN (TUGAS AKHIR)

LEMBAR PENGESAHAN (TUGAS AKHIR)

RANCANG BANGUN MINI *UNDERWATER* ROBOT

Disusun dan diajukan oleh

HAMDANI
D21115513

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
pada tanggal... dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan
09 Februari 2021

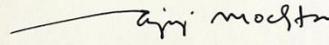
Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping



Rafiuddin Syam, ST, M.Eng, Ph.D.
NIP. 19720330 199512 1 001



Dr. Eng Andi Amijovo Mochtar, ST., M.Sc.
NIP. 19760216 201012 1 002

Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT.
19720825 200003 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Hamdani
NIM : D211 15 513
Program Studi : Departemen Teknik Mesin
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Rancang Bangun Mini *Underwaetr* Robot

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa Skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut

Makassar, 05 Februari 2021

Yang Menyatakan



Hamdani

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Nama : Hamdani

Tempat Tanggal Lahir : Tenggaraong, 26 Januari 1996

Alamat : Control and Robotics Lab. Area, Lt.1,
Mechanical Building, Fakultas Teknik
Unhas

Jenis Kelamin : Laki-laki

Agama : Islam

Telepon : 0823 5059 5568

E-mail : hamdani.26j@gmail.com

Riwayat Pendidikan : SMK Terate Samarinda
Mts. Al – Istiqomah Loa Janan
SDN 001 Loa Janan

Riwayat Organisasi : HMM FT-UH
Robotics and Mechatronics Research
Group

Pengalaman Magang (*Internship*) : PT Kaltim Prima Coal
PT United Tractors

Abstrak

HAMDANI, Rancang Bangun Mini *Underwater Robot* (dibimbing oleh Rafiuddin Syam, ST, M.Eng, PhD dan Dr.Eng Andi Amijoyo Mochtar, ST., M.Sc).

Kebocoran reaktor atau tangki adalah kejadian yang tidak diinginkan dan bisa terjadi tanpa diprediksi. Untuk itu diperlukan peralatan yang akurat untuk melakukan inspeksi dan pengawasan reaktor. Terkait pemeriksaan, pemeriksaan rutin diperlukan untuk memastikan kondisi reaktor selalu aman untuk dioperasikan. Oleh karena itu, penerapan teknologi canggih untuk mendeteksi kebocoran menjadi prioritas. Dalam penelitian ini kami menggunakan robot bawah air untuk diimplementasikan dalam kasus tersebut. Penggunaan robot mampu mendeteksi secara berkala, terus menerus dengan laporan yang akurat kepada operator atau supervisor reaktor. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji mini underwater robot sebagai alat bantu untuk inspeksi visual kebocoran pada tangki atau reaktor mini. Underwater robot ini menggunakan sistem remotely operated vehicle (ROV) yang dikendalikan diatas permukaan air melalui kabel dari pusat yang menyediakan daya elektrik dan telemetri. Robot ini memiliki 4 propeller dengan diameter 60mm, 3 blade CW/CCW, dan dibagian depannya robot ini dilengkapi kamera. Body robot ini dibuat menggunakan material Polylactic acid (PLA) memiliki dimensi 391 x 240mm dengan baterai lipo sebagai sumber listrik, adapun ukuran tempat uji robot ini berukuran 5.7 x 2.08 x 1.1m. Eksperimen dilakukan dengan melintasi beberapa trajectory untuk menguji kehandalan dari robot ini, dan hasil eksperimen yang dicapai berupa beberapa lintasan untuk mengukur tingkat efektivitas dengan metode Root Mean Square Error (RMSE). Underwater robot ini dapat dikendalikan dengan baik dengan tingkat error yang minimal pada beberapa trajectory tertentu dan dapat melakukan navigasi sederhana.

Kata Kunci: Underwater, robot, ROV

Abstract

HAMDANI, Design of Mini Underwater Robot (supervised by Rafiuddin Syam, ST, M.Eng, PhD and Dr. Eng Andi Amijoyo Mochtar, ST., M.Sc).

A reactor or tank leak is an unwanted event and can happen unpredictably. This requires accurate equipment to inspect and supervise the reactor. Regarding inspections, routine checks are needed to ensure that the reactor is always safe to operate. Therefore, the application of advanced technology to detect leaks is a priority. In this study we use an underwater robot to be implemented in this case. The use of robots is able to detect periodically, continuously with accurate reports to the operator or reactor supervisor. This study aims to design and test a mini underwater robot as a tool for visual inspection of leaks in a mini tank or reactor. This underwater robot uses a remotely operated vehicle (ROV) system that is controlled above the water level via a central cable that provides electrical power and telemetry. This robot has 4 propellers with a diameter of 60mm, 3 blades of CW / CCW, and the front of the robot is equipped with a camera. This robot body is made using Polylactic acid (PLA) material which has dimensions of 391 x 240mm with a lipo battery as a power source, while the size of the test site for this robot is 5.7 x 2.08 x 1.1m. Experiments were carried out by crossing several trajectories to test the reliability of this robot, and the experimental results achieved were several trajectories to measure the level of effectiveness with the Root Mean Square Error (RMSE) method. This underwater robot can be controlled properly with minimal error in certain trajectories and can perform simple navigation.

Keywords: Underwater, robot, ROV

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr.Wb.

Puji dan syukur dipanjatkan atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, yang telah memberikan kekuatan, rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini dengan judul “Rancang Bangun Mini *Underwater Robot*”. Penyusunan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Makassar.

Penulis menyadari dalam penyusunan skripsi ini masih terdapat kekurangan dikarenakan keterbatasan penulis sebagai manusia biasa. Untuk itu penulis sangat mengharapkan kritik dan saran dalam skripsi ini. Semoga skripsi ini berguna bagi penulis dan pihak-pihak lain sebagai acuan untuk kebutuhan ilmu pengetahuan.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan bimbingan serta masukan, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulis juga sangat menyadari penyusunan skripsi ini tidak akan selesai tanpa kerja keras penulis dan bantuan orang-orang terdekat yang selalu memberikan berbagai macam dukungan dan masukan demi kelancaran skripsi ini. Atas alasan itu pula penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Orang tua saya tercinta Ibu Nadimah terima kasih atas semua kasih sayang, doa dan petuahnya yang tidak pernah putus, beliau adalah semangat penulis dalam menyelesaikan studi ini.
2. Ana Mardiana, Hasanah sebagai kakak yang selalu siap sedia memberi doa dan dukungan kepada penulis serta adik Hesty Mei Sarah dan Muhammad Athorikal Syawal terima kasih doa dan dukungannya.
3. Sebagai seorang perantau saya juga mengucapkan terimakasih sebanyak-banyaknya kepada keluarga besar saya, kepada paman, tante, dan sepupu-sepupu yang tidak dapat saya sebutkan satu-persatu.
4. Bapak Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT. selaku ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin beserta seluruh staff

Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala bantuan dan kemudahan administrasi yang diberikan.

5. Bapak Rafiuddin Syam, ST, M.Eng, Ph.D. selaku pembimbing I penulisan Skripsi ini.
6. Bapak Dr. Eng Andi Amijoyo Mochtar, ST., M.Sc. selaku pembimbing II penulisan Skripsi ini.
7. Bapak Prof. Dr.Ir. Onny Sutresman, M.T. selaku penguji I.
8. Bapak Dr.Ir. H. Nasruddin Azis, M.Si. selaku penguji II.
9. Segenap Dosen Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
10. Kanda-kanda senior terutama kanda Alam Syani M'11 yang telah banyak memberikan bantuan dan masukan-masukan dalam pengerjaan rancang bangun robot ini.
11. Saudara-saudara seperjuangan penulis Hydraulic 2015 yang sudah menjadi tim hore dan tim support paling hebat yang selalu ada dalam suka maupun duka, yang bahkan saya tidak yakin bisa menyelesaikan penelitian ini dengan baik tanpa mereka.
12. Penghuni kost Lantai 1 A. Ilham Akbar, Lukman Hakim, Imam A. Agil, Fahrul Islam, Akbar Ali, Wahyudi Rizal Amil. A. K, Arifuddin, Rijal S. Amin, Hasan, Chatib, Kaspar, Agim, Fadil. H, terima kasih saudara atas kebersamaannya selama ini.
13. Teman – teman seperjuangan Laboratorium *Control and Robotics*, Wahyudi dan Akbar Ali.
14. Terakhir untuk seseorang yang tak dapat disebutkan namanya yang sudah menjadi motivasi penulis.

Hamdani

Gowa, 23 Januari 2021

DAFTAR ISI

SKRIPSI.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN (TUGAS AKHIR).....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iv
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	v
Abstrak	vi
Abstract	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR NOTASI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL.....	xvi
BAB I	17
PENDAHULUAN.....	17
1.1. Latar Belakang.....	17
1.2. Rumusan Masalah	18
1.3. Tujuan Perancangan	18
1.4. Batasan Masalah.....	18
1.5. Manfaat Penelitian.....	19
BAB II.....	20
TINJAUAN PUSTAKA.....	20
2.1. Underwater Robot	20
2.2. Klasifikasi Robot Bawah Air.....	21
2.3. Esensi dan Konsep Desain.....	23
2.3.1. Sistem Koordinat.....	23
2.3.2. Daya Apung	24
2.3.3. Redaman Hidrodinamik	25
2.3.4. Stabilitas.....	25
2.3.5. Penambahan Massa	27
2.3.6. Gangguan Lingkungan.....	27

2.3.7.	Tekanan.....	28
2.4.	Desain Umum ROV	28
2.4.1.	Desain Lambung	28
2.4.2.	Tenaga Penggerak	28
2.4.3.	Penyelaman	29
2.4.4.	Tenaga Listrik	30
2.5.	Sistem Koordinat Definisi Kinematika, dan Posisi ROV	30
2.6.	Pemodelan Dinamis ROV	32
2.6.1.	Model Kinematika dari ROV	32
2.6.2.	Model Dinamis dari ROV	33
2.6.3.	Menambahkan Massa.....	34
2.6.4.	Gaya dan Momen Motor Pendorong.....	36
BAB III.....		37
METODOLOGI PERENCANAAN		37
3.1.	Waktu dan Tempat Pelaksanaan.....	37
3.2.	Desain ROV <i>Underwater Robot</i>	37
3.3.	Tahapan Pembuatan <i>Underwater Robot</i>	37
3.3.1.	Tahapan Perencanaan.....	38
3.3.2.	Tahapan Pembuatan	38
3.3.3.	Eksperimen.....	39
3.4.	Alat dan Bahan yang digunakan.....	39
3.4.1.	Alat.....	39
3.4.2.	Bahan.....	40
3.4.3.	Diagram Alir Perencanaan / Flow Chart.....	42
BAB IV		44
HASIL DAN PEMBAHASAN.....		44
4.1.	Desain dan Pembuatan <i>Underwater Robot</i>	44
4.1.1.	Mendesain <i>Underwater Robot</i>	44
4.1.2.	Pembuatan <i>Body</i> Keseluruhan <i>Underwater Robot</i>	44
4.1.3.	Komponen Elektrik	48
4.1.4.	Skema Rangkaian Kelistrikan	51
4.1.5.	Pembuatan Kode Program.....	52

4.2. Eksperimen <i>Underwater Robot</i>	53
4.2.1. <i>Trajectory Underwater Robot</i>	53
4.2.2. Kecepatan <i>Underwater Robot</i>	60
4.2.3. Pengujian Kemampuan Monitoring di Bawah Permukaan Air.....	61
4.2.4. Massa Jenis <i>Underwater Robot</i>	62
BAB V.....	64
PENUTUP.....	64
5.1. Kesimpulan.....	64
5.2. Saran	64
LAMPIRAN.....	68

DAFTAR NOTASI

Notasi	Keterangan	Satuan
B	Buoyancy (Gaya apung)	N
W	Weight (Berat benda)	N
ϕ	Roll	-
ψ	Yaw	-
θ	Pitch	-
C_M	Center of Mass	-
C_B	Center of Buoyancy	-
RM	Right Moment	-
d	Jarak tegak lurus antara gaya acting B dan W	-
L	Jarak antara pusat massa dan daya apung	-
λ	Lambda	m
α	Alpha	rad/s ²
ρ	Densitas air	kg/m ³
s	Kecepatan	m/s
A	Luas permukaan efektif	m ²
c_D	Koefisien drag	-
η	Eta	-
$RMSE$	Root Mean Square Error	-
Σ	Sum	-
X_t	Sumbu X prediksi	m
X_r	Sumbu X observasi	m
Y_t	Sumbu Y prediksi	m
Y_r	Sumbu Y observasi	m
n	Jumlah data rata-rata	-

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Miniatur prototype AUV Nekton Research [7].	20
Gambar 2. REMUS 100 AUV di Glovers Reef, Belize [9].	22
Gambar 3. ROV Sistem Koordinat.	24
Gambar 4. Efek daya apung dan berat pada bodi robot bawah air.	25
Gambar 5. a). Konfigurasi tubuh bawah air yang stabil. b). Ketidakstabilan tubuh bawah air melalui ketidakselarasan pusat massa dan daya apung.	26
Gambar 6. Momen kanan yang disebabkan oleh roll atau pitch kendaraan.	27
Gambar 7. Sistem koordinat fixed-fix dan earth-fixed.	31
Gambar 8. Desain 3D Underwater Robot.	37
Gambar 9. Tahapan Pembuatan Underwater Robot.	37
Gambar 10. Diagram alir perencanaan.	42
Gambar 11. Tampilan kerja perangkat lunak Autodesk Inventor.	44
Gambar 12. Proses cetak salah satu body menggunakan mesin cetak tiga dimensi.	45
Gambar 13. Camera housing.	45
Gambar 14. Housing motor pendorong horizontal bagian depan (Kiri) dan belakang (kanan).	46
Gambar 15. Body tengah.	46
Gambar 16. Cover body tengah.	47
Gambar 17. Pengikat pipa stabilizer.	47
Gambar 18. Motor bracket.	48
Gambar 19. Baterai Li-Po.	48
Gambar 20. Module kamera CCTV.	49
Gambar 21. Arduino 101	49
Gambar 22. ESC (Electronic Speed Control).	50
Gambar 23. Motor brushless.	51
Gambar 24. Skema rangkaian kelistrikan.	52
Gambar 25. Tampilan antar muka Arduino IDE software.	52
Gambar 26. Eksperimen underwater robot tanpa stabilizer.	53
Gambar 27. Trajectory underwater robot tanpa stabilizer.	54
Gambar 28. RMSE Trajectory tanpa stabilizer.	55
Gambar 29. Eksperimen underwter robot dengan penggunaan stabilizer.	55
Gambar 30. Trajectory eksperimen 1 underwater robot dengan penggunaan stabilizer.	56
Gambar 31. RMSE Trajectory (eksperimen 1) dengan satbilizer.	56
Gambar 32. Trajectory eksperimen 2 underwater robot dengan penggunaan stabilizer.	57
Gambar 33. RMSE Trajectory (eksperimen 2) dengan satbilizer.	57

Gambar 34. Trajectory eksperimen 3 underwater robot dengan penggunaan stabilizer.	58
Gambar 35. RMSE Trajectory (eksperimen 3) dengan stabilizer.	58
Gambar 36. Trajectory eksperimen 4 underwater robot dengan penggunaan stabilizer.	59
Gambar 37. RMSE Trajectory 1 (eksperimen 4) dengan stabilizer.	59
Gambar 38. RMSE Trajectory 2 (eksperimen 4) dengan stabilizer.	60
Gambar 39. Eksperimen kecepatan undewater robot gerakan motor horizontal.	60
Gambar 40. Eksperimen kecepatan undewater robot gerakan motor vertikal.	61
Gambar 41. Pengoperasian underwater robot.	61
Gambar 42. Visualisasi dibawah permukaan air oleh kamera underwater robot.	62

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Notasi gerakan standar.	31
Tabel 2. Daftar alat-alat pada pembuatan underwater robot.	39
Tabel 3. Daftar bahan-bahan pada pembuatan underwater robot.	40
Tabel 4. Detail spesifikasi motor brushless.	51

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir, selain robot lain berbagai jenis robot bawah laut telah dirancang, dibangun, dan dikembangkan oleh banyak peneliti yang tertarik. Berbagai jenis pekerjaan sulit, dapat dilakukan dengan mudah menggunakan robot bawah laut di lautan atau sumber air apa pun [1].

Robot yang dioperasikan dari jarak jauh di bawah air memainkan peran penting dalam sejumlah misi dangkal dan laut dalam untuk ilmu kelautan, ekstraksi minyak dan gas, atau eksplorasi dan penyelamatan. Dalam aplikasi ini, gerakan robot dipandu oleh pilot manusia atau biasa disebut dengan istilah *remotely operated vehicle (ROV)* yang dikendalikan diatas permukaan melalui kabel dari pusat yang menyediakan tenaga dan telemetri, atau oleh pilot otomatis. Dalam hal kontrol otomatis, umpan balik keadaan ROV disediakan oleh sensor akustik dan inersia [2].

Operasi bawah laut, pengawasan samudera, pengamatan bentuk kehidupan perairan, pencarian polusi, dan deteksi militer hanyalah beberapa contoh yang menuntut pengembangan robot bawah air untuk menggantikan manusia [3].

Sebagai solusi yang hemat biaya untuk melakukan tugas-tugas kompleks di lingkungan bawah air, kendaraan bawah air menarik minat yang signifikan. Namun, masalah pengendaliannya sangat menantang, karena mereka diharapkan beroperasi di lingkungan bawah laut yang tidak pasti [4].

Underwater vehicle memainkan peran penting dalam eksplorasi lautan, karena kemampuan manuver dan survei jarak jauh mereka. Namun, lingkungan bawah lautnya kompleks dan beragam, sehingga mereka mungkin menghadapi kondisi yang keras dalam beberapa keadaan [5].

Studi robot bawah air adalah bidang aktif dan mungkin memiliki dampak luas pada manusia. Sebagai salah satu jenis robot bawah air yang penting, kendaraan bawah harus dapat dipindahkan secara bebas dan dimanipulasi dengan mudah [6].

1.2. Rumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana merancang *underwater* robot dengan fungsi agar dapat digunakan sebagai alat bantu untuk monitoring kebocoran pada tangki atau reaktor mini.
2. Bagaimana merancang sistem kendali *underwater* robot tersebut pada program berbasis kontrol.
3. Bagaimana membuat formulasi kinematika sistem mekanik pada *underwater* robot.
4. Bagaimana membuat *underwater* robot yang dapat memonitoring kebocoran tangki.
5. Bagaimana menguji *underwater* robot untuk beberapa lintasan.

1.3. Tujuan Perancangan

Tujuan perancangan *underwater* robot:

1. Merancang *underwater* robot dengan fungsi agar dapat digunakan sebagai alat bantu untuk monitoring kebocoran pada tangki atau reaktor mini.
2. Merancang sistem kendali *underwater* robot tersebut pada program berbasis kontrol.
3. Menganalisa kinematika sistem mekanik *underwater* robot.
4. Membuat *underwater* robot yang dapat memonitoring kebocoran tangki.
5. Menguji *underwater* robot untuk beberapa lintasan.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah dan asumsi yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Alat yang dibuat adalah unit *underwater* robot.
2. Lingkungan kerja dari *underwater* robot ini yaitu kolam dengan dimensi panjang 5.7m, lebar 2.08m, dan tinggi 1.1m yang terdapat pada laboratorium *control and robotics*.
3. *Underwater* robot hanya digunakan untuk memonitoring keadaan dibawah permukaan air dalam bentuk visual.

4. Sumber listrik yang digunakan berasal dari baterai lipo ataupun sumber listrik lainnya yang berkapasitas 12 – 24V DC.
5. Sistem kontrol manual dengan menggunakan sistem kabel tether *Remotely Operated Vehicle* (ROV).

1.5. Manfaat Penelitian

1. Bagi penulis:
Mampu mendesain dan mensimulasikan teknologi *underwater* robot sebagai alat bantu monitoring dibawah permukaan bawah air.
2. Bagi akademik:
Sebagai materi tambahan yang dapat digunakan sebagai acuan untuk penelitian dibidang kendaraan bawah air, dan juga agar nantinya purwarupa *underwater* robot dapat berkontribusi dalam pameran yang melibatkan instansi akademik
3. Bagi industri:
Dapat difungsikan bagi pelaku industri yang berhubungan dengan lingkungan kerja bawah air untuk monitoring asset proyek yang ditempatkan di bawah permukaan air ataupun survey keadaan bawah air.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Underwater Robot

Robot bawah air atau Underwater Robotic adalah robot kedap air yang dapat bergerak di bawah permukaan air secara autonomus atau non autonomus. Robot ini memiliki bagian transmitter dan penerima, ketika pengguna mengirimkan perintah, transmitter akan mengirim ke bagian controller penerima. Arduino sebagai controller penerima memproses perintah dengan program C++ yang dibuat sebelumnya. Kemudian arduino mengirim signal kepada unit electronic speed control (ESC) motor dan robot mulai bergerak. Untuk bergerak maju, motor yang dipasang secara horizontal dari kedua sisi robot harus berputar bersama-sama searah jarum jam dan berputar sebaliknya untuk bergerak mundur. Motor yang dipasang secara vertikal akan bergerak sesuai dengan kedalaman yang di inginkan. Untuk bergerak belok, masing-masing motor horizontal berputar berlawanan arah. Untuk bergerak ke atas, semua motor vertikal harus berputar berlawanan arah jarum jam dan akan berputar sebaliknya untuk bergerak ke bawah [1].

Terdapat dua jenis kontrol *underwater* robot yaitu *Remotely Operated Vehicle* (ROV) dan *Autonomous Under Vehicle* (AUV) (**Gambar 1**) yang dapat bepergian dalam kelompok, berkomunikasi satu sama lain dan memberikan data kepada peneliti [7].



Gambar 1. Miniatur prototype AUV Nekton Research [7].

2.2. Klasifikasi Robot Bawah Air

Robot bawah air secara tipikal diklasifikasikan ke dalam dua kategori; Kendaraan Bawah Air Autonomous (AUV) dan Jarak Jauh Kendaraan yang Dioperasikan (ROV). AUV tidak berawak, selfpropelled kendaraan yang dapat beroperasi secara mandiri, yang membuatnya sangat cocok untuk eksplorasi lingkungan ekstrem. Perkembangan baru yang berkelanjutan kendaraan dan sensor, dan kemajuan dalam kecerdasan buatan meningkatkan jangkauan aplikasi AUV. Namun, biaya tinggi dan pengetahuan yang dibutuhkan untuk mengembangkannya membuat adopsi mereka menjadi halangan bagi masyarakat umum.

Kendaraan bawah air yang dioperasikan dari jarak jauh adalah perangkat seluler umum yang digunakan dalam industri dalam air. ROV biasanya terhubung ke kapal dipermukaan melalui tambatan dan dikendalikan oleh operator, yang membuat mereka lebih andal dan kurang rentan untuk kegagalan dari pada AUV. Sama halnya dengan AUV, ROV professional biasanya sangat mahal [8]. Berikut klasifikasi robot bawah air:

1. *Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*

AUV adalah kendaraan bertenaga baterai yang tidak ditambatkan yang dapat beroperasi secara independen selama beberapa jam hingga beberapa hari. AUV telah menjadi platform pilihan untuk pemetaan lantai laut beresolusi tinggi di laut dalam, memungkinkan pengumpulan data bentuk pada skala lanskap (ratusan hingga ribuan meter persegi). Penyelaman AUV biasanya ditentukan sebelumnya dan minimal dieksekusi dengan input oleh manusia, secara umum, tugas yang menuntut interpretasi dan interaksi dengan lingkungan menantang untuk platform otonom, tetapi seiring dengan meningkatnya kemajuan komputer, machine learning, dan kemampuan perencanaan adaptif, AUV diharapkan dapat melakukan tugas yang lebih rumit. AUV yang paling umum digunakan saat ini adalah kendaraan berbentuk torpedo (**Gambar 2**) yang dapat digunakan dari pantai atau kapal kecil tetapi membutuhkan kecepatan untuk kemampuan maneuver.



Gambar 2. REMUS 100 AUV di Glovers Reef, Belize [9].

Kendaraan ini telah digunakan untuk mengumpulkan data batimetri dan pemindaian sampling pada [9].

2. *Remotely Operated Vehicles (ROV)*

ROV adalah kendaraan yang dikendalikan dari jarak jauh yang menggunakan kabel Panjang sebagai penyedia daya dan komunikasi ke kendaraan, memungkinkan operasi terus menerus tanpa kendala energi. Penggunaan kabel Panjang juga memungkinkan transfer video waktu nyata, sonar, dan data lainnya, yang memungkinkan pengawasan dan kontrol manusia. ROV juga memberikan peluang untuk pemrosesan berbasis aliran data kapal yang masuk dengan lebih banyak komputasi dari kapal kecil, yang semakin banyak digunakan untuk inisial survei video MCE. Misalnya, vLBV-300 ROV (SeaBotix, San Diego, AS) telah digunakan untuk survei video dan koleksi biologis di atas karang mesofotik bawah komunitas Great Barrier Reef [10].

3. *Hybrid Remotely Operated Vehicles (HROV)*

Dalam beberapa tahun terakhir, kelas baru ROV, yaitu HROV. HROV bertenaga baterai, tetapi ditambatkan dengan lampu kabel, seringkali serat optik, dan menggabungkan keunggulan baik AUV dan ROV. Dengan mengusung daya dan navigasisistem onboard, mereka dapat beroperasi secara independen sebagai AUV atau, dengan kabel komunikasi serat optik kecil, sebagai ROV dengan kontrol pilot dan umpan balik video langsung.

Ringan, fleksibel tether menyederhanakan manajemen kabel dibandingkan dengan yang lebih besar, sistem menyelam. Beberapa HROV yang cocok untuk penelitian MCE sekarang tersedia secara komersial. Awal, skala besar akustik dan optic pemetaan dalam mode AUV dapat diikuti dengan detail inspeksi dan pengambilan sampel (bila dilengkapi dengan manipulator lengan) dalam mode ROV. Dengan cara ini, HROV memiliki potensimemberikan yang terbaik kedua dari dunia.

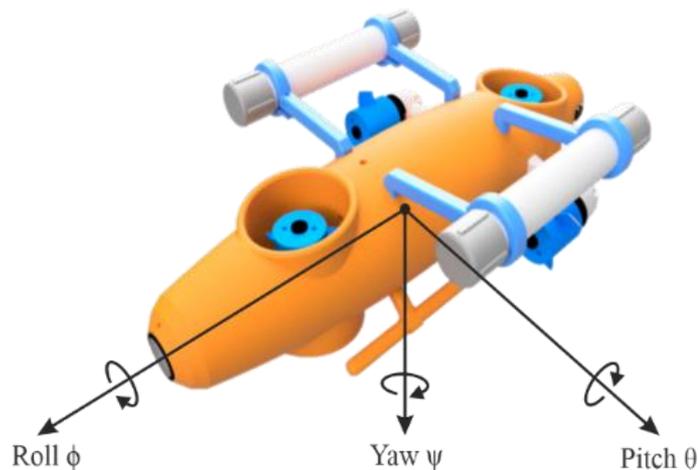
2.3. Esensi dan Konsep Desain

Beberapa gaya yang bekerja pada kendaraan bawah air memerlukan pertimbangan untuk proses desain. Ini termasuk daya apung, redaman hidrodinamik, dan massa tambahan. Daya apung adalah salah satu faktor terpenting yang secara signifikan memengaruhi kemampuan kendaraan untuk menenggelamkan serta stabilitasnya. Stabilitas juga dipengaruhi oleh kekuatan eksternal. Tekanan adalah faktor penting lain untuk kendaraan bawah laut yang perlu dipertimbangkan dalam proses desain.

Untuk merancang kendaraan apa pun, penting untuk memiliki latar belakang pengetahuan dan dasar konsep tentang proses dan hukum fisik yang mengatur kendaraan di lingkungannya. Berkenaan dengan robot bawah air, faktor-faktor seperti daya apung, stabilitas, redaman hidrodinamik dan tekanan harus dipertimbangkan. Bab ini memperkenalkan beberapa hal mendasar ini konsep dan ide tentang kendaraan bawah laut, dan juga meneliti secara umum desain kendaraan ini. Sistem mekanik dan listrik kendaraan bawah air masa lalu juga disajikan dan diperiksa dengan cermat untuk mendapatkan wawasan tentang desain yang berbeda.

2.3.1. Sistem Koordinat

Analogi dengan kendaraan terbang, kendaraan bawah laut memiliki 6 Degree of Freedom (DOF); tiga koordinat spasial, x , y dan z ; dan tiga sikap yang mendefinisikan sudut Euler, roll, pitch, dan yaw, (**Gambar 3**).



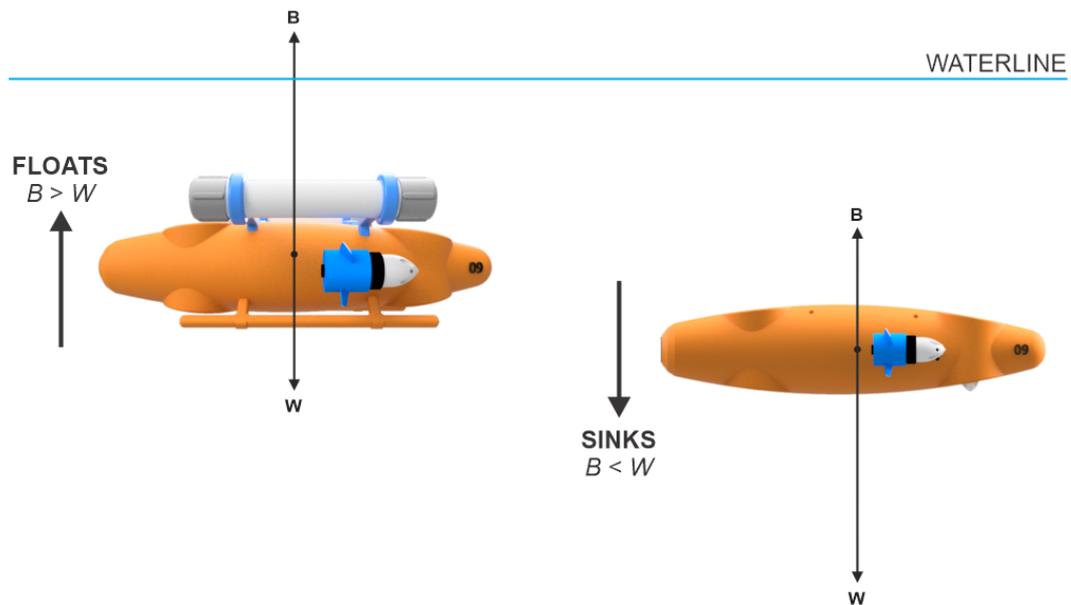
Gambar 3. ROV Sistem Koordinat.

Sumbu x menunjuk di sepanjang arah maju kendaraan, mendefinisikan longitudinal kendaraan. Sumbu y menunjuk sisi kanan kendaraan, mendefinisikan lateral kendaraan. Sumbu z mendefinisikan vertikal kendaraan atau kedalaman. Perhatikan bahwa sumbu z adalah nol pada permukaan dan menunjuk ke bawah; karenanya, positif untuk meningkatkan kedalaman. Ini karena ROV tidak dapat melakukan perjalanan lebih jauh dari permukaan air.

Tingkat kebebasan yang dimiliki kendaraan bawah air memungkinkannya cukup fleksibel. Namun, rentang gerak yang tinggi ini dapat menjadi masalah karena harus dipertimbangkan selama proses desain bagaimana setiap tingkat kebebasan akan dapat dikendalikan untuk menjaga kendaraan stabil. Sebagian besar ROV dirancang untuk dapat mengendalikan sebanyak mungkin derajat kebebasan.

2.3.2. Daya Apung

Besarnya gaya apung atau buoyancy (B), yang diberikan pada benda mengambang atau tenggelam, adalah sama dengan berat volume air yang dipindahkan oleh tubuh itu. Kemampuan suatu benda mengapung tergantung pada besarnya bobot tubuh, atau weight (W), lebih besar dari kekuatan apung. Jelas, jika $B > W$, maka tubuh akan mengambang, sedangkan jika $B < W$ akan tenggelam (**Gambar 4**). Jika B dan W menyamakan, maka tubuh tetap di tempatnya



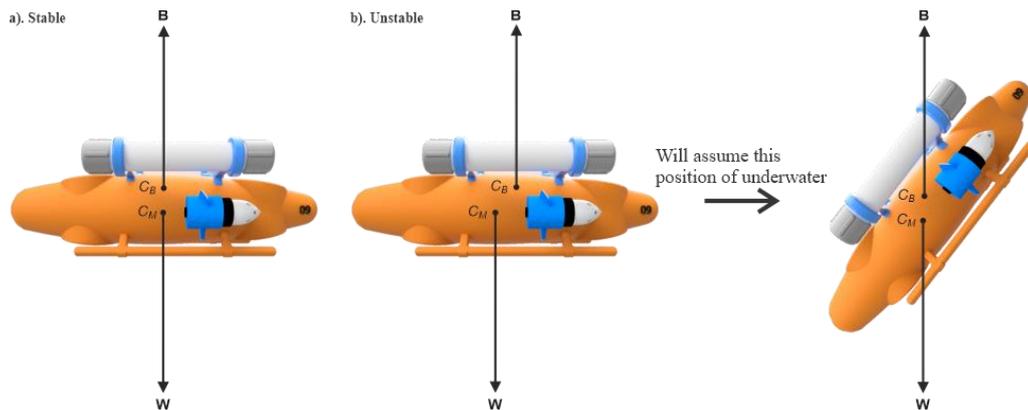
Gambar 4. Efek daya apung dan berat pada bodi robot bawah air.

2.3.3. Redaman Hidrodinamik

Ketika suatu benda bergerak melalui air, gaya utama yang bekerja dalam arah yang berlawanan dengan gerak tubuh adalah gaya peredam hidrodinamik. Kekuatan redaman ini terutama disebabkan oleh gaya seret dan angkat, serta gesekan kulit linier. Kekuatan redaman memiliki pengaruh signifikan terhadap dinamika kendaraan bawah air yang mengarah pada nonlinier. Gesekan kulit linier dapat dianggap diabaikan bila dibandingkan dengan gaya seret, dan oleh karena itu, biasanya cukup untuk hanya memperhitungkan yang terakhir ketika menghitung kekuatan redaman. biasanya cukup untuk hanya mempertimbangkan yang terakhir ketika menghitung kekuatan redaman.

2.3.4. Stabilitas

Dengan asumsi tidak ada pergerakan air, stabilitas benda statis di bawah air sebagian besar dipengaruhi oleh posisi pusat massa, C_M , dan daya apung, C_B . Pusat daya apung adalah centroid dari perpindahan volumetrik tubuh. Jika C_M dan C_B tidak disejajarkan secara vertikal satu sama lain dalam arah longitudinal atau lateral, maka ketidakstabilan akan terjadi karena penciptaan momen bukan nol (**Gambar 5**).



Gambar 5. a). Konfigurasi tubuh bawah air yang stabil. b). Ketidakstabilan tubuh bawah air melalui ketidakselarasan pusat massa dan daya apung.

Jika C_M dan C_B bertepatan di posisi yang sama di ruang angkasa, kendaraan akan sangat rentan terhadap gangguan. Idealnya, kedua centroid harus disejajarkan secara vertikal dengan jarak terpisah satu sama lain dengan C_M di bawah C_B . Ini menghasilkan konfigurasi berat bawah yang ideal dengan stabilitas bawaan.

Seperti yang terlihat pada **Gambar 6**, konfigurasi ini menghasilkan momen kanan atau *Right Moment* (RM), ketika kendaraan menggelindingkan atau melenggang yang berbanding lurus dengan jarak tegak lurus antara C_M dan C_B , serta untuk kedua B dan W . Momen ini kondusif untuk kendaraan. stabilitas, bertindak sebagai roll and pitch control system pasif. Momen diberikan oleh,

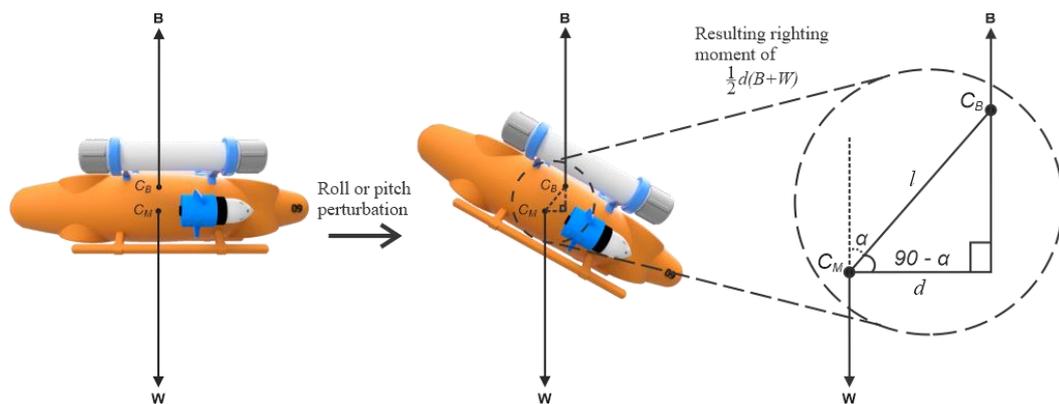
$$RM = \frac{1}{2} d (B + W) \quad (1)$$

di mana d adalah jarak tegak lurus antara gaya akting B dan W .

Besarnya RM bervariasi secara sinusoidal dengan sudut yang digulung atau dilengkungkan. Dari **Gambar 6**, persamaan (1) menjadi.

$$RM = \frac{1}{2} l (B + W) \sin \lambda \quad (2)$$

di mana l , B dan W adalah konstanta untuk kendaraan; l menjadi jarak antara pusat massa dan daya apung.



Gambar 6. Momen kanan yang disebabkan oleh roll atau pitch kendaraan.

Dalam kasus badan bawah air yang dinamis, stabilitas dipengaruhi tidak hanya oleh pusat massa dan daya apung, tetapi juga oleh faktor-faktor seperti kekuatan eksternal dan pusat-pusat drag. Untuk meningkatkan stabilitas dinamis, pusat-pusat drag, ditentukan oleh centroid area permukaan efektif kendaraan, harus disejajarkan dengan pusat-pusat kekuatan yang diterapkan secara eksternal. Dengan cara ini, kendaraan tidak akan cenderung menunjukkan karakteristik yang tidak diinginkan dalam gerakannya.

2.3.5. Penambahan Massa

Fenomena lain yang mempengaruhi kendaraan bawah laut adalah penambahan massa. Ketika tubuh bergerak di bawah air, cairan di sekitarnya langsung dipercepat bersama dengan tubuh. Ini mempengaruhi dinamika kendaraan sedemikian rupa sehingga gaya yang dibutuhkan untuk mempercepat air dapat dimodelkan sebagai massa tambahan. Menambahkan massa adalah efek yang cukup signifikan dan terkait dengan nilai massa dan inersia kendaraan.

2.3.6. Gangguan Lingkungan

Gangguan lingkungan dapat mempengaruhi gerakan dan stabilitas kendaraan. Ini terutama berlaku untuk kendaraan bawah laut di mana ombak, arus, dan bahkan angin dapat mengganggu kendaraan. Ketika kendaraan terendam, efek angin dan ombak sebagian besar dapat diabaikan. Gangguan paling signifikan untuk kendaraan bawah air adalah arus. Dalam lingkungan yang terkendali seperti kolam, efek dari kekuatan lingkungan ini minimal.

2.3.7. Tekanan

Seperti halnya udara, tekanan bawah air disebabkan oleh berat medium, dalam hal ini air bekerja pada permukaan. Tekanan biasanya diukur sebagai tekanan absolut atau ambient; absolut menunjukkan tekanan total dan ambient yang bersifat relativistik. Di permukaan laut, tekanan karena udara adalah 14,7 psi atau 1atm. Untuk setiap kedalaman 10 m, tekanan meningkat sekitar 1atm dan karenanya, tekanan absolut pada 10 m di bawah air adalah 2 atm. Meskipun sifatnya linier, peningkatan tekanan karena peningkatan kedalaman adalah signifikan dan kendaraan bawah air harus secara struktural mampu menahan sejumlah besar tekanan jika mereka ingin bertahan hidup.

2.4. Desain Umum ROV

Ada beberapa aspek dalam desain mekanis dan elektrik ROV yang perlu dicermati. Rekayasa Kapal Selam Internasional mengidentifikasi desain lambung, propulsi, perendaman dan tenaga listrik sebagai aspek desain utama.

2.4.1. Desain Lambung

Desain *underwater* robot harus memberikan desain lambung yang kuat terhadap tekanan untuk menyimpan komponen kelistrikan di wadah yang kering dan kedap air. Lambung harus memungkinkan komponen agar mudah diakses dan dirawat, serta memungkinkan modularitas jika terjadi perubahan atau penambahan di masa depan. Selain ringan dan kuat, lambung juga harus tahan korosi karena akan mengalami lingkungan air asin yang keras.

Lambung bola menawarkan integritas struktural terbaik, namun, bentuknya menghambat penggunaan ruang yang efisien karena sebagian besar komponen dan sistem berbentuk persegi panjang. Lambung silinder menyediakan alternatif terbaik, terdiri dari integritas struktural yang tinggi dan bentuk yang kondusif untuk perumahan komponen elektronik.

2.4.2. Tenaga Penggerak

Beberapa jenis tenaga diperlukan pada semua ROV dan biasanya merupakan salah satu sumber utama konsumsi daya. Kebanyakan ROV menggunakan motor untuk tenaga penggerak karena kelangkaan dan biaya sistem alternatif.

Lokasi motor mempengaruhi derajat kebebasan mana yang dapat dikendalikan. Penempatan posisi motor juga dapat memengaruhi interferensi derau dengan komponen elektronik yang terpasang, serta interaksi baling-baling dan baling-baling. Interaksi antara baling-baling dan baling-baling ke baling-baling dapat memiliki efek yang tidak diinginkan dalam dinamika ROV.

Saat berpindah dengan kecepatan konstan, daya dorong yang dihasilkan oleh motor sama dengan gesekan atau hambatan kendaraan, yaitu,

$$Thrust = Drag = \frac{1}{2} \rho s^2 A C_D \quad (3)$$

di mana densitas air, s adalah kecepatan, A adalah luas permukaan efektif dan C_D adalah koefisien drag.

Konsumsi daya untuk sistem propulsi meningkat secara dramatis ketika kecepatan kendaraan meningkat. Ini karena daya dorong sama dengan produk dorong dan kecepatan, yang berarti daya dorong adalah fungsi dari kecepatan potong dadu,

$$Thrust Power = Thrust \times s = \frac{1}{2} \rho s^3 A C_D \quad (4)$$

oleh karena itu, karena pasokan energi ROV yang terbatas, ia harus melakukan perjalanan dengan kecepatan yang tidak membutuhkan terlalu banyak daya, tetapi pada saat yang sama tidak membutuhkan waktu terlalu lama untuk menyelesaikan misinya. Memperoleh kecepatan ideal menjadi masalah optimisasi.

2.4.3. Penyelaman

Dalam kasus kendaraan selam, karena volume kendaraan tetap konstan, untuk menyelam lebih dalam, itu harus meningkatkan gaya ke bawah yang bekerja padanya untuk menetralkan gaya apung. Ini dapat dilakukan dengan menambah massanya melalui penggunaan tank pemberat atau dengan menggunakan pendorong eksternal.

Ballasting adalah pendekatan yang lebih umum untuk tenggelam. Metode ini sebagian besar bersifat mekanis dan melibatkan penggunaan pompa dan udara tekan untuk mengambil dan mengeluarkan air. Alternatifnya adalah menggunakan pendorong yang mengarah ke bawah. Ini adalah sistem yang jauh lebih sederhana,

tetapi sangat tidak efisien dalam hal konsumsi daya dan tidak benar-benar cocok pada kedalaman yang luar biasa.

Untuk mengurangi ukuran tangki pemberat atau gaya yang dibutuhkan pendorong untuk proses perendaman, ROV biasanya dirancang sedemikian rupa sehingga memiliki daya apung residual. Artinya, bobot kendaraan dibuat kurang lebih sama dengan gaya apung.

2.4.4. Tenaga Listrik

Tenaga listrik umumnya disediakan melalui baterai yang disegel. Pengaturan baterai yang ideal adalah menyambungkannya secara paralel dengan dioda di antara masing-masing untuk memungkinkan pengeluaran yang merata dan untuk mencegah aliran arus antar baterai. Sekering atau perangkat pelindung lainnya juga harus digunakan untuk mencegah aliran arus berlebih jika terjadi korsleting atau komponen tidak berfungsi.

Sifat daya yang terbatas pada ROV memengaruhi jenis komponen dan peralatan yang dapat digunakan. Komponen dan peralatan harus dipilih sehingga dapat menarik daya sesedikit mungkin agar baterai dapat menyediakan lebih dari cukup waktu bagi kendaraan untuk menyelesaikan misinya [7].

2.5. Sistem Koordinat Definisi Kinematika, dan Posisi ROV

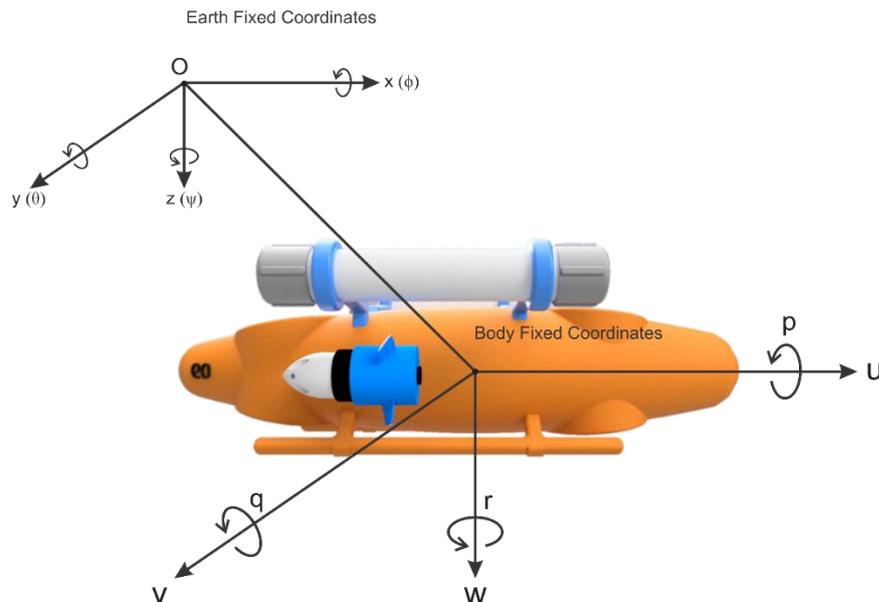
Sistem koordinat penting untuk menjelaskan pergerakan kendaraan bawah laut dalam enam derajat kebebasan (DOF) dan untuk menentukan posisi dan orientasi dalam volume dan waktu tiga dimensi. Gerakan 6 DOF digambarkan sebagai posisi dan kecepatan translasi di mana X , Y , Z , dan ϕ , θ , ψ masing-masing untuk orientasi dan kecepatan rotasi. Untuk robot bawah air, variabel-variabel gerak tersebut disebut sebagai lonjakan, goyangan, angkat, guling, lempar, dan yaw. Posisi atau gerakan translasi dan orientasi atau gerakan rotasi dari benda tegar (benda yang posisi relatif semua titiknya konstan) dapat dijelaskan sehubungan dengan posisi referensi. Untuk tujuan ini, beberapa set sumbu koordinat ortogonal dipilih dan diasumsikan secara kaku terhubung ke asal benda yang sewenang-wenang untuk membangun kerangka referensi.

Gaya dan momen yang bekerja di kendaraan bawah air harus dirujuk ke frame yang sama dengan variabel gerakan. Notasi yang digunakan untuk menjelaskan 6 derajat kebebasan (DOF) dirangkum dalam Tabel 1. Perhatikan bahwa konvensi simbol untuk kendaraan bawah air adalah: x sebagai arah positif di depan, y sebagai arah positif di tangan kanan, z sebagai positif arah di bagian bawah dan aturan tangan kanan digunakan untuk sudut.

Tabel 1. Notasi gerakan standar.

DOF	Gerakan	Gaya dan Momen	Kecepatan Linier dan Sudut	Posisi dan Orientasi
1	Surge	X	u	x
2	Sway	Y	v	y
3	Heave	Z	w	z
4	Roll	K	p	ϕ
5	Pitch	M	q	θ
6	Yaw	N	r	ψ

Pada **Gambar 7** menunjukkan penentuan sistem koordinat *fixed-body* dan sistem koordinat *fixed-earth* yang digunakan sebagai gerak standar seperti yang telah dirangkum dalam table.



Gambar 7. Sistem koordinat fixed-fix dan earth-fixed.

2.6. Pemodelan Dinamis ROV

Pemodelan matematika dari dinamika gerak kendaraan akan disajikan dalam uraian berikut ini.

2.6.1. Model Kinematika dari ROV

Kinematika adalah bagian dari dinamika, yang mempelajari tentang gerak benda tanpa memperhatikan kekuatan yang mempengaruhi gerak benda. Deskripsi kinematika dari ROV didasarkan pada dua jenis referensi, yaitu, sistem koordinat tetap-tubuh dan sistem koordinat tetap-bumi. Sistem koordinat *Earth-fixed* digunakan sebagai referensi inersia dengan asumsi bahwa bumi dangkal dan gerakannya diabaikan. Untuk objek yang bergerak dalam tiga dimensi, variabel yang harus dipertimbangkan dalam model kinematik adalah:

$$\eta_1 = [x \ y \ z]^T \quad (5)$$

$$\eta_2 = [\phi \ \theta \ \psi]^T \quad (6)$$

$$v_1 = [u \ v \ w]^T \quad (7)$$

$$v_2 = [p \ q \ r]^T \quad (8)$$

$$\tau_1 = [X \ Y \ Z]^T \quad (9)$$

$$\tau_2 = [K \ M \ N]^T \quad (10)$$

Vektor η adalah koordinat posisi dan orientasi tentang ROV dalam referensi sistem koordinat tetap bumi, sedangkan vektor v adalah vektor kecepatan, dan masing-masing τ masing-masing mewakili vektor gaya eksternal dan vektor momen eksternal yang bekerja pada body ROV. Untuk mendapatkan ekspresi kinematik dari ROV, formulasi harus ditransformasikan dari sistem koordinat *fixed-body* ke sistem koordinat *fixed-earth*. Matriks transformasi biasanya ditulis sebagai berikut:

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2) v_1 \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = J_1(\eta_2) \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi s\theta c\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\phi + s\psi s\theta c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$(J_1(\eta_2))^{-1} = (J_1(\eta_2))^T \quad (14)$$

$$\dot{x} = u c\psi c\theta + v(-s\psi c\theta + c\psi s\theta s\phi) + w(s\psi s\phi + c\psi s\theta c\phi) \quad (15)$$

$$\dot{y} = u s\psi c\theta + v(c\psi c\theta + s\psi s\theta s\phi) + w(-c\psi s\phi + s\psi s\theta c\phi) \quad (16)$$

$$\dot{z} = u(-s\theta) + v(c\theta s\phi) + w(c\theta c\phi) \quad (17)$$

Transformasi ke sistem koordinat *fixed earth*:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_2(\eta_2) \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & \frac{s\phi}{c\theta} & \frac{c\phi}{c\theta} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\dot{\phi} = p + q(s\phi t\theta) + r(c\phi t\theta) \quad (20)$$

$$\dot{\theta} = q c\phi - r s\phi \quad (21)$$

$$\dot{\psi} = q s\phi / c\theta + r c\phi / c\theta \quad (22)$$

2.6.2. Model Dinamis dari ROV

Berdasarkan hukum kedua Newton, derivasi persamaan gerak akan menghasilkan persamaan kaku tiga dimensi, enam derajat kebebasan (DOF) yang mengatur persamaan, yang akan bekerja melalui derivasi persamaan dinamis dari bentuk umum $F = m \cdot a$, di mana F adalah kekuatan eksternal yang bekerja pada pusat massa benda (N), sedangkan $m \cdot a$ adalah produk dari massa (kg) dan akselerasi (m/s^2). Kekuatan eksternal terdiri dari kekuatan yang dipicu oleh radiasi, lingkungan, dan daya dorong. Gaya radiasi disebabkan oleh gaya redaman hidrodinamika dan gaya restorasi.

❖ Persamaan gaya aksial (*surge*):

$$\sum X_{ext} = m [\dot{u} + wq - vr - x_G(q^2 + r^2) + z_G(pr + \dot{q})] \quad (23)$$

❖ Persamaan gaya lateral (*sway*):

$$\sum Y_{ext} = m [\dot{v} - wp + ur + x_G(pq + \dot{r}) + z_G(qr - \dot{p})] \quad (24)$$

❖ Persamaan gaya normal (*heave*):

$$\sum Z_{ext} = m [\dot{w} - uq + vp + x_G(pr - \dot{q}) - z_G(q^2 + p^2)] \quad (25)$$

❖ Persamaan momen *rolling*:

$$\sum K_{ext} = I_{xx} \dot{p} - I_{xy} + (I_{zz} - I_{yy})qr - m[Z_G(\dot{v} + ur - wp)] \quad (26)$$

❖ Persamaan momen *pitching*:

$$\sum M_{ext} = I_{yy} \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})pr + m[Z_G(\dot{u} + wq - vr)] - x_G(\dot{w} + vp - uq) \quad (27)$$

❖ Persamaan momen *yaw*:

$$\sum N_{ext} = I_{zz} \dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m[Z_G(\dot{v} + ur - wp)] \quad (28)$$

2.6.3. Menambahkan Massa

Massa tambahan dipahami sebagai kekuatan dan momen yang diinduksi tekanan karena gerakan paksa tubuh yang sebanding dengan akselerasi tubuh. Untuk kendaraan yang benar-benar tenggelam, koefisien massa yang ditambahkan diasumsikan konstan dan dengan demikian tidak tergantung pada frekuensi lingkaran gelombang. Perawatan lebih lanjut tentang masalah penambahan massa dapat ditemukan di Newman. Penambahan kekuatan massa dan persamaan momen dapat diekspresikan dalam bentuk *Marine dan Underwater Sci. dan Tech.*, 2015, Vol. 1, No. 1.

$$F_j = \dot{U}_i m_{ji} - \varepsilon_{jkl} U_i \Omega_k m_{li} \quad (29)$$

$$M_j = -\dot{U}_i m_{j+3,i} - \varepsilon_{jkl} U_i \Omega_k m_{l+3i} - \varepsilon_{jkl} U_i U_k m_{li} \quad (30)$$

di mana j, k, l , nilai 1, 2, dan 3, sedangkan i digunakan sebagai komponen enam kecepatan.

U_i adalah tiga komponen kecepatan translasi (lonjakan, goyangan, angkat) dan $\Omega_1=U_4, \Omega_2=U_5, \Omega_3=U_6$, adalah tiga komponen kecepatan rotasi (*roll, pitch, yaw*), tensor bergantian +1 jika indeksnya sama dengan urutan siklik (123, 231, 312) sama dengan -1 jika indeks asiklik (132, 213, 321) dan nol jika indeks yang sama.

Karena bidang xz bidang simetris (simetri sisi kanan / kiri), maka matriks massa tambahan adalah sebagai berikut:

$$M_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (31)$$

Karena posisi inspeksi titik tengah ROV, massa yang tidak ditambahkan nol dapat direduksi menjadi matriks yang lebih sederhana, persamaan matriks untuk mendapatkan massa tambahan yang tidak nol untuk ROV. Asumsi desain simetri ROV pada penampang sisi kiri dan kanan sebagai berikut:

$$M_A = - \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & m_{13} & 0 & m_{15} & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 & m_{24} & 0 & m_{26} \\ m_{31} & 0 & m_{33} & 0 & m_{35} & 0 \\ 0 & m_{42} & 0 & m_{44} & 0 & m_{46} \\ m_{51} & 0 & m_{53} & 0 & m_{55} & 0 \\ 0 & m_{62} & 0 & m_{64} & 0 & m_{66} \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$M_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & X_{\dot{w}} & 0 & X_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & Y_{\dot{p}} & 0 & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & Z_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & K_{\dot{v}} & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & 0 & M_{\dot{w}} & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & N_{\dot{v}} & 0 & N_{\dot{p}} & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Karena simetri pada koordinat xz (simetri thruster kanan / sisi kiri). Substitusi (33) ke dalam notasi dari Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME) untuk mendapatkan persamaan gaya dan momen pada massa yang ditambahkan:

❖ Menambahkan kekuatan massa (*surge*):

$$X_A = X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{\dot{w}}(\dot{w} + uq) + X_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{\dot{w}}wq + Z_{\dot{q}}q^2 - Y_{\dot{v}}vr - Y_{\dot{p}}rp - Y_{\dot{r}}r^2 \quad (34)$$

❖ Menambahkan kekuatan massa (*sway*):

$$Y_A = Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{p}} + Y_{\dot{r}}\dot{r} - X_{\dot{w}}(up + wr) + X_{\dot{u}}ur - Z_{\dot{w}}wp + Z_{\dot{q}}pq - X_{\dot{q}}qr \quad (35)$$

❖ Menambahkan kekuatan massa (*heave*):

$$Z_A = X_{\dot{w}}(\dot{u} - wq)Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} - X_{\dot{u}}uq - X_{\dot{q}}q^2 + Y_{\dot{v}}vp + Y_{\dot{r}}rp + Y_{\dot{p}}p^2 \quad (36)$$

❖ Menambahkan kekuatan massa (*roll*):

$$K_A = Y_{\dot{p}}\dot{v} + K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{\dot{r}}\dot{r} + X_{\dot{w}}uv - (Y_{\dot{v}} - Z_{\dot{w}})vw - (Y_{\dot{r}} + Z_{\dot{q}})wr - Y_{\dot{p}}wp - X_{\dot{q}}ur + (Y_{\dot{r}} + Z_{\dot{q}})vq + K_{\dot{r}}pq - (M_{\dot{q}} - N_{\dot{r}})qr \quad (37)$$

❖ Menambahkan kekuatan massa (*pitch*):

$$M_A = X_{\dot{q}}(\dot{u} + wq) + Z_{\dot{q}}(\dot{w} - uq) + M_{\dot{q}}\dot{q} - X_{\dot{w}}(u^2 - w^2) - (Z_{\dot{w}} - X_{\dot{u}})uw + Y_{\dot{p}}vr - Y_{\dot{r}}vp - K_{\dot{r}}(p^2 - r^2) + (K_{\dot{p}} - N_{\dot{r}})rp \quad (38)$$

❖ Menambahkan kekuatan massa (*yaw*):

$$N_A = Y_{\dot{r}}\dot{v} + K_{\dot{r}}\dot{p} + N_{\dot{r}}\dot{r} - (X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}})uv - X_{\dot{w}}uw + (X_{\dot{q}} + Y_{\dot{p}})up + Y_{\dot{r}}ur + Z_{\dot{q}}wp - (X_{\dot{q}} + Y_{\dot{p}})vq - (K_{\dot{p}} - M_{\dot{q}})pq - K_{\dot{r}}qr \quad (39)$$

Koefisien massa tambahan dapat diperkirakan dengan menggunakan berbagai teknik seperti teori tubuh langsing atau teori strip. Geometri aktual dari ROV yang sangat kompleks seperti sistem kabel, baling-baling. Untuk keperluan pemodelan, ROV diasumsikan memiliki bentuk sederhana seperti tabung, bola, dan pelat. Teori strip digunakan untuk menghitung koefisien massa tambahan karena teknik ini cocok untuk bentuk sederhana yang diasumsikan oleh ROV.

2.6.4. Gaya dan Momen Motor Pendorong

F_{rst} , F_{lst} , F_{fwdt} , F_{aftt} adalah kekuatan motor pendorong. Kekuatan motor pendorong juga dapat diperoleh dari perusahaan pembuat motor pendorong atau dengan percobaan. Momen motor pendorong adalah penggandaan gaya dengan jarak dari titik pusat ke ROV pendorong [11]. Ada juga yang perlu menghitung reaksi torsi pendorong. Untuk menjadi gaya penggerak dan momen yang tepat pada ROV, tiga sumbu koordinat, yaitu, X_p , Y_p , Z_p , K_p , M_p , N_p , di mana:

$$X_p = F_{rst} + F_{lst} \quad (40)$$

$$Y_p = 0 \quad (41)$$

$$Z_p = F_{fwdt} + F_{aftt} \quad (42)$$

$$K_p = 0 \quad (43)$$

$$M_p = (F_{rst} + F_{lst})z_p + F_{aftt}x_{p_{aft}} - F_{fwdt}x_{p_{fwd}} \quad (44)$$

$$N_p = (F_{rst} + F_{lst})y_p \quad (45)$$