

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

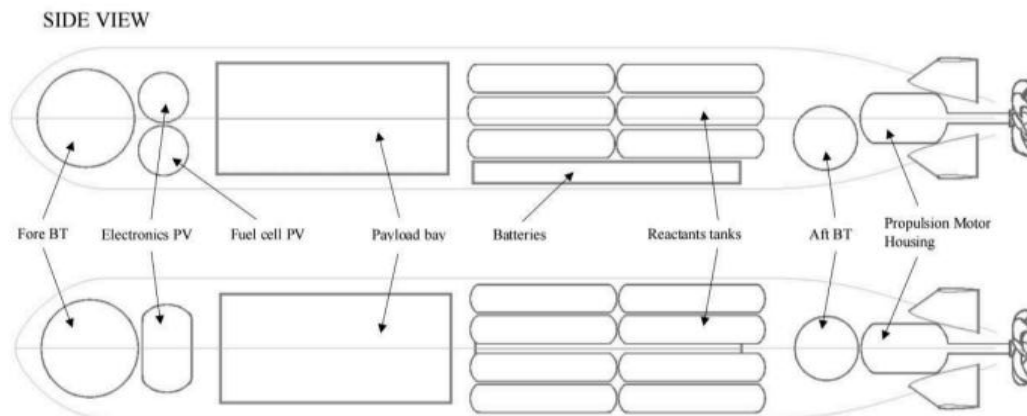
2.1.1 *Unmanned Underwater Vehicles*

Unmanned Underwater Vehicles (UUV) atau kendaraan bawah air tanpa awak adalah teknologi mutakhir yang dirancang untuk menjalankan berbagai tugas eksplorasi, pemantauan, dan operasi bawah laut tanpa keterlibatan manusia secara langsung (Kim et al., 2016). UUV terbagi menjadi dua kategori utama, yaitu *Autonomous Underwater Vehicles* (AUVs) yang beroperasi secara mandiri (Santhakumar & Asokan, 2008) dan *Remotely Operated Vehicles* (ROVs) yang dikendalikan operator dari permukaan (He et al., 2020). Teknologi ini memberikan solusi efisien dalam menjangkau area yang sulit atau berbahaya bagi manusia, terutama untuk keperluan survei dasar laut, inspeksi infrastruktur bawah laut, hingga operasi militer seperti deteksi ranjau (Kim et al., 2016). Menurut Yan et al. (2021), penggunaan UUV dalam survei kelautan memungkinkan pengumpulan data secara lebih efisien dengan akurasi tinggi, memberikan kontribusi signifikan terhadap pemahaman lebih lanjut mengenai ekosistem dan sumber daya laut.



Gambar 2.1 MK 18 MOD Ikan Pedang UUV

Sumber : (*the United States Navy, 2018*)



Gambar 2.2 Susunan dalam Kapal

Sumber : (Franzoso, 2019)

Terdapat beberapa contoh UUV salah satunya adalah XLUUV (*Extra-Large Unmanned Underwater Vehicle*) Orca yang merupakan wahana bawah air tanpa awak yang dirancang untuk mendukung berbagai operasi maritim strategis. Dengan panjang total sekitar 15,5 hingga 25,9 meter dan berat mencapai 50 ton, Orca memiliki kapasitas payload hingga 8 ton. Kapasitas ini memungkinkan wahana membawa berbagai muatan, seperti bahan peledak, torpedo berat, atau sensor canggih untuk misi yang membutuhkan fleksibilitas tinggi (Franzoso, 2019).

Pada sistem ballast XLUUV Orca sendiri menggunakan konfigurasi tangki ganda (fore dan aft) yang dirancang dengan penempatan strategis. Menurut Woods et al. (2012), tangki fore mengontrol trim bagian depan, sementara tangki aft mengatur bagian belakang, memberikan kemampuan kontrol *pitch* yang presisi selama operasi.

2.1.2 Sistem Utama dalam UUV

Dalam *Unmanned Underwater Vehicles* (UUV) terdapat sistem-sistem yang memungkinkan kendaraan bawah air untuk menjalankan misi bawah laut dengan efisien. Setiap sistem dalam UUV memiliki peran yang penting untuk memastikan stabilitas, navigasi, daya tahan, dan kemampuan beradaptasi terhadap kondisi lingkungan bawah laut yang ekstrem. Salah satu sistem utama yang akan ditekankan adalah sistem

ballast, yang memiliki fungsi krusial dalam mengatur daya apung dan kedalaman UUV. Berikut merupakan sistem utama yang ada pada UUV.

2.1.2.1 Sistem Propulsi

Sistem propulsi pada UUV bertanggung jawab untuk menggerakkan kendaraan dan mengontrol arah pergerakannya di bawah air. Sistem ini biasanya terdiri dari motor listrik dan baling-baling yang memungkinkan UUV bergerak maju, mundur, serta berbelok ke kanan atau kiri. Propulsi yang efektif dan efisien sangat penting, terutama karena keterbatasan energi dalam kendaraan bawah air. Beberapa UUV modern juga menggunakan sistem propulsi jet yang memungkinkan pergerakan lebih halus dan responsif di dalam air (Khairan et al., 2011).

2.1.2.2 Sistem Navigasi dan Sensor

Navigasi adalah salah satu tantangan utama dalam desain UUV karena lingkungan bawah air tidak mendukung penggunaan sinyal *GPS*. Untuk itu, UUV menggunakan sistem navigasi inersial (*INS*), sonar, dan *Doppler Velocity Log (DVL)* yang memungkinkan kendaraan ini menentukan posisi dan bergerak dengan presisi tinggi. Sensor sonar dan optik juga banyak digunakan untuk menghindari rintangan dan memetakan area yang sedang diinspeksi atau dieksplorasi. Sistem ini membantu UUV menjalankan misi dengan aman dan mengurangi risiko tabrakan dengan objek bawah laut (Filter et al., 2022). Dalam penelitian ini digunakan sensor flowmeter untuk mengetahui debit air dalam pipa.

2.1.2.3 Sistem Komunikasi

Sistem komunikasi pada UUV sangat penting untuk mentransfer data antara kendaraan dan operator di permukaan atau pusat kendali. Di bawah air, komunikasi menggunakan sinyal radio tidak efektif karena sinyal ini teredam oleh air. Oleh karena itu, UUV sering menggunakan sinyal akustik atau komunikasi optik dalam jarak dekat (Hasan, 2014). Komunikasi yang stabil memungkinkan data sensor, video, dan informasi

navigasi dikirimkan secara *real-time* ke operator atau disimpan untuk diunduh setelah misi selesai.

2.1.2.4 Sistem Daya dan Manajemen Energi

Manajemen energi adalah elemen krusial dalam desain UUV, mengingat kendaraan ini sering kali harus beroperasi dalam waktu yang lama. Sumber daya yang umum digunakan adalah baterai lithium-ion, yang memiliki daya tahan dan kapasitas energi yang baik (Zhao et al., 2024). Selain itu, beberapa UUV menggunakan fuel cell untuk menyediakan energi yang lebih efisien selama misi panjang (Bagherian Farahabadi et al., 2023). Sistem manajemen energi bertanggung jawab untuk mengatur distribusi daya ke berbagai sistem lain di dalam UUV agar penggunaan daya lebih efisien dan mendukung durasi operasional yang lebih lama (Simorangkir et al., 2022).

2.1.2.5 Sistem Kendali dan Otonomi

Sistem kendali pada UUV berperan dalam mengatur pergerakan, posisi, dan tindakan lain yang diperlukan untuk menjalankan misi. Dalam UUV yang memiliki kemampuan otonom, sistem kendali menggunakan algoritma kecerdasan buatan dan machine learning untuk mengenali kondisi lingkungan dan membuat keputusan secara mandiri. Dengan sistem kendali ini, UUV dapat menyesuaikan jalur atau kedalaman sesuai kondisi lingkungan, seperti adanya rintangan atau perubahan arus bawah laut (Suryadarma, 2023).

Penelitian ini berfokus pada gerakan *heave* (vertikal). Untuk kendali gerakan *heave*, sistem menggunakan kontrol PID dengan *feed-forward*. Filter et al. (2022) menjelaskan bahwa kombinasi ini menghasilkan respons yang lebih cepat dan akurat.

Pengendali PID (*Proportional-Integral-Derivative*) dengan *Feed-Forward* (FF) adalah sistem kontrol yang menggabungkan metode PID klasik dengan komponen *Feed-Forward* untuk meningkatkan kinerja

sistem. Dengan bentuk matematis dari pengendali PID sebagai berikut (Astrom & Hagglund, 2006; Åström & Murray, 2008).

$$u(t) = K_p \cdot e + K_i \int e \cdot dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (2.1)$$

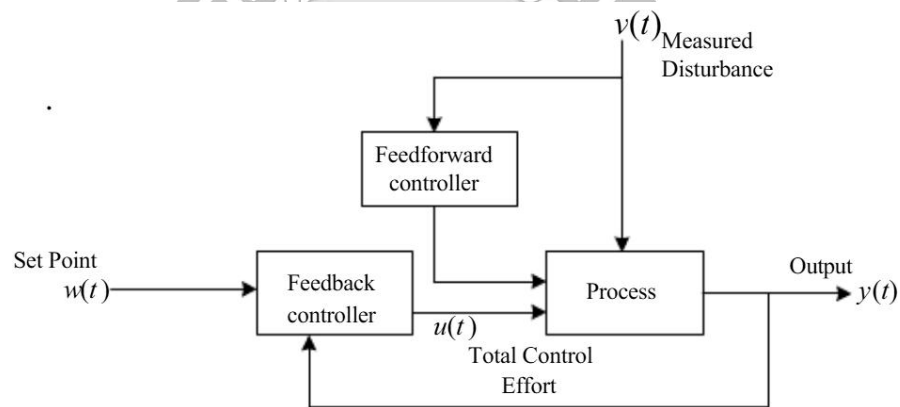
Keterangan :

e : selisih antara kedalaman target dan kedalaman aktual

K_p : konstanta proporsional

K_i : konstanta integral

K_d : konstanta derivatif



Gambar 2.3 Diagram Blok Sistem Kontrol Feed-Forward/Feedback

Sumber : (Abobakr, Saad & Zayed, A.. (2009)

Feed-Forward adalah teknik kontrol yang mengantisipasi perubahan set point atau gangguan sebelum mempengaruhi sistem. Tidak seperti PID yang bekerja berdasarkan *error*, FF bekerja secara proaktif (Seborg et al., 2010). Komponen ini ditambahkan ke output PID.

$$u = u(t) + K_{FF} \cdot z_{target} \quad (2.2)$$

Keterangan :

u : sinyal kontrol keseluruhan (laju aliran air ke tangki ballast)

$u(t)$: fungsi PID

K_{FF} : *gain feed-forward*

z_{target} : kedalaman target

Sistem ini juga menerapkan hysteresis untuk mengurangi osilasi dalam kendali kedalaman. Kim et al. (2023) menjelaskan bahwa integrasi

sistem kendali *heave* dengan sistem ballast menciptakan *closed-loop control system* yang memungkinkan UUV mempertahankan kedalaman dengan lebih stabil dan efisien, terutama saat beroperasi di lingkungan dengan densitas air yang bervariasi.

2.1.2.6 Sistem Ballast

Fungsi utama sistem ballast pada UUV mencakup penyesuaian daya apung agar kendaraan tetap stabil dan dapat beradaptasi dengan perubahan lingkungan bawah laut. Dalam studi mengenai kendaraan hybrid udara dan bawah air, Zeng et al. (2022) menyoroti bahwa sistem ballast memungkinkan transisi yang mulus antara medium udara dan air, dimana daya apung perlu dikontrol dengan akurat untuk mencegah ketidakstabilan. Pada kendaraan yang dapat berpindah domain seperti ini, sistem ballast memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan selama perubahan tekanan dan lingkungan. Hal ini memungkinkan kendaraan melakukan transisi dengan lancar tanpa mengorbankan stabilitas atau mengakibatkan kerusakan pada struktur kendaraan selama operasi.

Sistem *ballast* juga memainkan peran penting dalam pengendalian otomatis UUV untuk menjaga kedalaman tertentu selama misi. Dengan demikian, desain *sistem ballast* yang baik tidak hanya meningkatkan efisiensi energi dan stabilitas tetapi juga mengurangi risiko operasional, menjadikannya komponen yang vital dalam aplikasi UUV yang membutuhkan presisi tinggi di lingkungan laut yang dinamis.

2.1.3 Komponen dalam Sistem *Ballast*

Sistem *ballast* terdiri dari sejumlah komponen utama yang berfungsi secara terintegrasi untuk mengatur stabilitas kapal secara efektif. Komponen ini meliputi tangki *ballast*, yang berperan dalam menyimpan dan memindahkan air guna menjaga keseimbangan kapal, serta pompa sentrifugal yang bertugas memindahkan air antar tangki secara efisien. Pengendalian aliran air dilakukan oleh katup solenoid, yang dioperasikan

secara otomatis melalui *Controller*. Sensor inklinometer digunakan untuk mendeteksi sudut kemiringan kapal dan mengirimkan data ke *Controller*, yang kemudian menentukan kapan sistem *ballast* perlu diaktifkan. Selain itu, sistem perpipaan menghubungkan tangki *ballast* untuk memungkinkan transfer air, sementara *limit switch* digunakan untuk mendeteksi kondisi tangki, seperti status penuh atau kosong. Seluruh komponen ini didukung oleh sistem kelistrikan yang memastikan kelancaran operasional (Kusuma, 2017). Sistem *ballast* dirancang untuk beroperasi secara otomatis, memungkinkan penyesuaian air *ballast* sesuai kebutuhan stabilitas, serta memberikan respons yang cepat terhadap perubahan kondisi UUV.

Volume tangki ballast (V_{TB}) dihitung berdasarkan daya apung b yang telah didefinisikan pada persamaan 2.14, dengan ρ sebagai massa jenis fluida dan g sebagai percepatan gravitasi.

$$V_{TB} = \frac{b}{\rho} \quad (2.3)$$

Untuk menentukan volume tangki ballast (V_{TB}) yang diperlukan pada kedalaman tertentu, digunakan persamaan berikut (Medvedev et al., 2017).

$$V_{TB} = \left(\frac{\rho_{depth} \times V_{uuv} - m_{uuv}}{\rho_{depth}} \right) \quad (2.4)$$

Keterangan :

ρ_{depth} : densitas air pada kedalaman tertentu

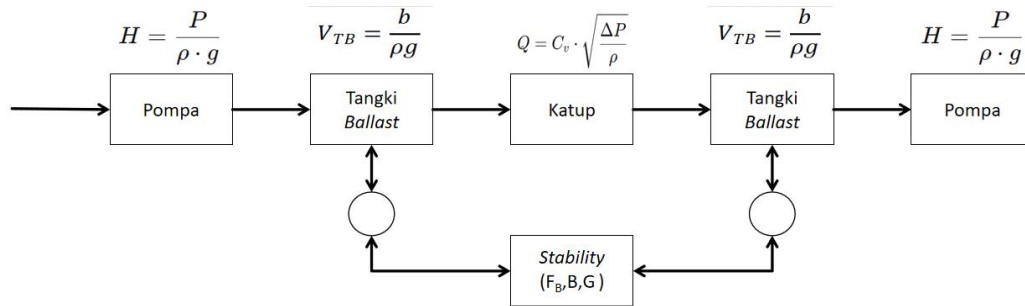
V_{uuv} : massa UUV tanpa air ballast

m_{uuv} : Massa UUV

Untuk mengetahui ρ_{depth} digunakan rumus berikut.

$$\rho_{depth} = \rho_{surface} + (\rho_{surface} \times 10^{-5} \times kedalaman) \quad (2.5)$$

Dimana $\rho_{surface}$ adalah densitas air di permukaan (Leroy & Parthiot, F, 1998).



Gambar 2.4 Skema Tangki *Ballast* secara Umum

(Sumber : Diolah oleh peneliti)

Selain itu, dalam sistem kendali gerakan *heave*, pengukuran kedalaman dapat dilakukan menggunakan persamaan 2.6 hingga 2.9 yang berfungsi seperti sensor dalam sistem. Dimana massa tambahan adalah massa yang timbul karena efek hidrodinamis. Berikut adalah persamaan pengukuran kedalaman yang digunakan.

$$a = \left(\frac{F_B - F_G - F_D}{m + m_{Ballast} + massa\ tambahan} \right) \quad (2.6)$$

$$\dot{v} = a \quad (2.7)$$

$$\dot{z} = v \quad (2.8)$$

$$F_D = 0,5 \times \rho_{depth} \times Cd \times Awp \times |v| \times v \quad (2.9)$$

Keterangan :

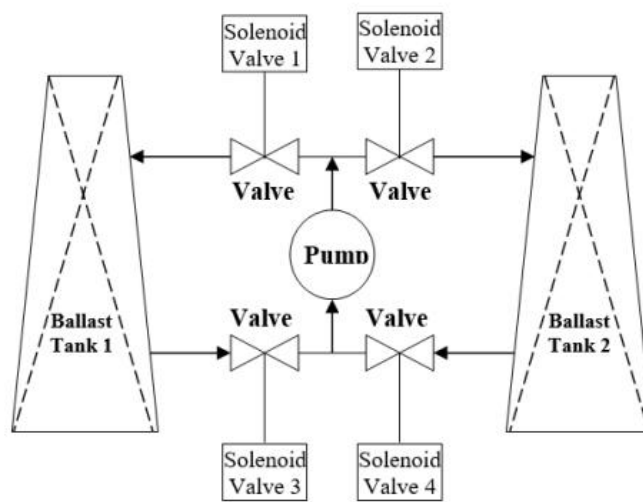
- a : percepatan vertikal
- F_B : gaya apung
- F_G : gaya gravitasi
- F_D : gaya hambat
- $\dot{v}$: turunan pertama kecepatan
- $\dot{z}$: turunan pertama kedalaman
- Cd : koefisien hambat (1,35)
- Awp : luas permukaan basah
- $|v|$: nilai absolut kecepatan

2.1.3.1 Pemodelan Sistem *Ballast*

Pemodelan sistem ballast bertujuan untuk mensimulasikan dan menganalisis kinerja sistem dalam kondisi tertentu. Dengan pemodelan

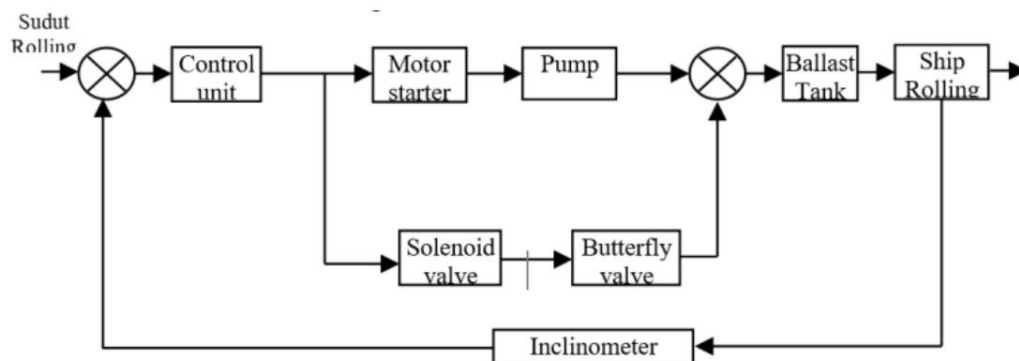
yang tepat, parameter desain seperti volume tangki, diameter katup, dan efisiensi sistem dapat diuji untuk meminimalkan kegagalan.

Dalam penelitian mengenai desain dan simulasi automatic ballast system, Kusuma (2017) menampilkan desain sistem ballast yang ada pada Gambar 2.5 dan diagram blok kontrol pada Gambar 2.6.



Gambar 2.5 Desain Sistem Kontrol Ballast

Sumber : (Kusuma, 2017)

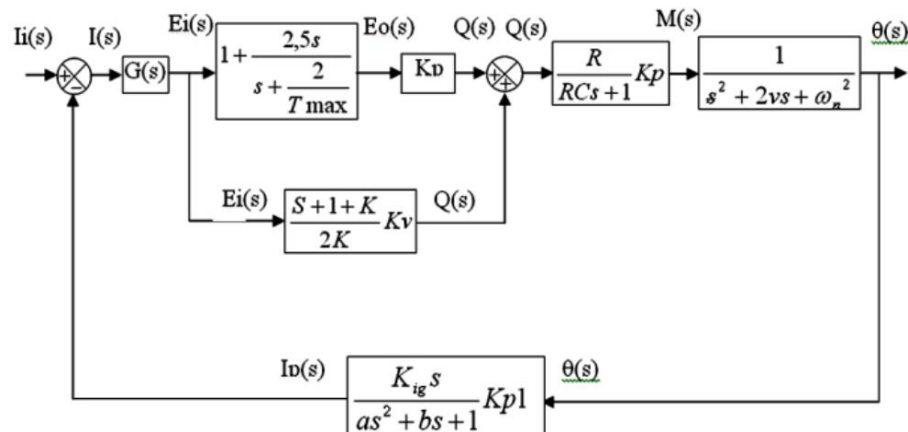


Gambar 2.6 Diagram Blok Sistem Kontrol Ballast

Sumber : (Kusuma, 2017)

Pada penelitian Kusuma (2017), pendekatan pemodelan sistem ballast melibatkan berbagai metode matematis dan simulasi berbasis kontrol. Secara matematis, persamaan diferensial dan domain frekuensi digunakan untuk menggambarkan dinamika komponen kontrol sistem ballast, seperti kapasitas aliran fluida, momen kemiringan, dan sudut

kemiringan kapal. Simulasi berbasis kontrol, seperti penggunaan algoritma *PID* (*Proportional-Integral-Derivative*), memungkinkan optimalisasi respons sistem terhadap gangguan seperti kemiringan kapal akibat ombak atau perubahan beban. Selain itu, *Programmable Logic Controller* (*PLC*) digunakan untuk mengotomasi pengendalian katup solenoid dan pompa, yang menghasilkan respons lebih cepat dibandingkan kontrol manual.



Gambar 2.7 Diagram Blok Sistem Kontrol Ballast

Sumber : (Kusuma, 2017)

Keterangan :

$G(s)$: control unit

$I_i(s)$: arus yang dikonversi dari sudut yang diinginkan adalah 0°

$\Theta(s)$: sudut aktual kemiringan kapal

$E_i(s)$: tegangan dari output unit kontrol

$E_o(s)$: tegangan yang keluar dari motor starter

$Q(s)$: kapasitas pompa yang sama dengan katup butterfly

$M(s)$: gerakan rolling yang disebabkan oleh gerakan kapal itu sendiri

$I_p(s)$: arus yang dikonversi dari sensor inklinometer

MacLeod, M., & Bryant, M. (2016) membahas mengenai konsep *multidomain* dari *unmanned vehicle*. Dalam pemodelan yang dilakukan pengujian pada stabilitas, efisiensi energi, dan kemampuan manuver melalui kontrol daya apung. Pemodelan matematis menggunakan pendekatan hukum kontinuitas massa dan persamaan Bernoulli

membantu menganalisis dinamika fluida dalam sistem ballast, termasuk parameter seperti aliran fluida, tekanan dalam tangki, dan gaya aktuasi.

Persamaan hidrodinamika yang digunakan untuk menggambarkan sistem fluida di dalam tangki *ballast* ditunjukkan pada persamaan 2.10.

$$P_o + \frac{\rho}{2} \left(\frac{\dot{V}}{A_p} \right)^2 = P_g \quad (2.10)$$

Keterangan :

- P_o : tekanan fluida pada keluaran pompa
- ρ : massa jenis fluida
- $\dot{V}$: laju aliran volumetrik fluida
- A_p : luas penampang pada keluaran pompa
- P_g : tekanan udara di dalam tangki

2.1.4 Daya Apung dan Stabilitas

2.1.4.1 Daya Apung

Daya apung adalah sifat suatu benda yang memungkinkannya untuk mengapung di permukaan cairan atau di dalam cairan. Apabila daya apung dikaitkan dengan UUV, daya apung dapat diartikan dengan gaya ke atas yang berkerja pada benda yang tenggelam atau mengapung oleh fluida yang menopangnya. Dalam konsep ini, volume dianggap sudah dapat menentukan daya apung suatu benda, dan bahwa gaya ke atas yang diberikan pada benda sama dengan berat fluida yang dipindahkan (*volume displacement*) (Maritime Park Association, 2013).

$$F_B = \rho g V_D \quad (2.13)$$

Keterangan :

- F_B : gaya apung
- V_D : berat fluida yang dipindahkan

Gaya apung ini bekerja vertikal ke atas melalui pusat volume fluida yang dipindahkan, yang disebut sebagai pusat daya apung (centre of buoyancy, B). Jika gaya apung sama dengan berat benda, maka benda akan melayang di fluida. Jika berat benda lebih besar, benda akan tenggelam.

Sebaliknya, jika gaya apung lebih besar, benda akan naik ke permukaan (Paine et al., 1994).

Daya apung sendiri dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$b = \frac{\rho g V_D - m_T g}{g} \quad (2.14)$$

Keterangan :

b : daya apung

V_D : berat fluida yang dipindahkan

m_T : massa benda total

Dalam kasus kapal selam, cairan yang dipindahkan adalah air laut. Tiga keadaan daya apung dipertimbangkan: daya apung positif, daya apung netral, dan daya apung negatif (Paine et al., 1994). Dimana W_D adalah berat fluida yang dipindahkan oleh benda dan W_T adalah berat benda total.

1. Daya apung positif terjadi ketika berat benda lebih kecil daripada berat zat cair yang dipindahkan dengan volume yang sama.

$$W_D > W_T \quad (2.15)$$

2. Daya apung netral terjadi ketika berat benda sama dengan berat volume fluida yang dipindahkan. Benda dalam keadaan ini tetap melayang, tidak naik maupun tenggelam, kecuali ada gaya luar yang bekerja padanya.

$$W_D = W_T \quad (2.16)$$

3. Daya apung negatif terjadi ketika berat benda lebih besar daripada berat cairan bervolume sama yang dipindahkan dan benda tersebut tenggelam.

$$W_D < W_T \quad (2.17)$$

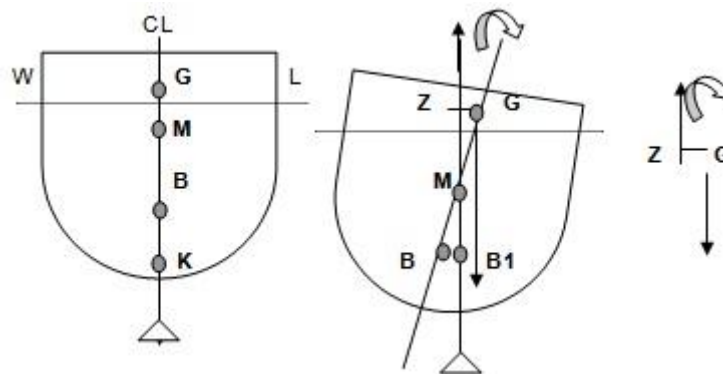
Secara teori, kapal selam dirancang dengan tangki *ballast* utamanya yang volumenya sedemikian rupa sehingga saat tangki tersebut dibanjiri, kapal berada dalam kondisi daya apung netral. Daya apung negatif diperoleh dengan membanjiri tangki *ballast* (Maritime Park Association, 2013).

2.1.4.2 Stabilitas

Stabilitas adalah sifat benda yang memungkinkan benda kembali ke kondisi keseimbangan setelah terganggu oleh gaya atau momen luar (Maritime Park Association, 2013). Dalam kapal selam, stabilitas dibagi menjadi dua jenis, yaitu stabilitas statis dan stabilitas dinamis. Stabilitas statis mengacu pada kemampuan kapal untuk kembali ke posisi awal setelah terganggu oleh gaya luar, sedangkan stabilitas dinamis berkaitan dengan kemampuan kapal untuk mempertahankan arah dan kecepatan tanpa kontrol berlebihan.

Stabilitas kapal selam sangat bergantung pada pusat apung (*center of buoyancy*, B), pusat gravitasi (*center of gravity*, G), dan tinggi metasentrik (*metacentric height*, GM) (Amran et al., 2023). Pusat apung (B) atau titik di mana gaya apung bekerja pada kapal selam, biasanya terletak di tengah volume air yang dipindahkan oleh kapal selam. Pusat gravitasi (G) adalah titik di mana seluruh massa kapal berpusat, yang posisinya harus berada di bawah B untuk memastikan stabilitas. Lalu GM atau tinggi metasentrik merupakan jarak antara pusat gravitasi dengan metasentrum (titik temu garis vertikal B dan sumbu tengah kapal ketika miring dari posisi awal). GM positif menunjukkan stabilitas yang baik, GM negatif menunjukkan ketidakstabilan, dan GM nol menunjukkan kondisi keseimbangan netral.

Distribusi bobot sepanjang sumbu *longitudinal* kapal juga memengaruhi stabilitas longitudinal kapal selam. Pusat apung *longitudinal* (LCB) dan pusat gravitasi *longitudinal* (LCG) menjadi faktor penting dalam menentukan *longitudinal moment arm* (LMA), yang memengaruhi trim kapal. LCB sendiri dapat diartikan sebagai titik di sepanjang sumbu longitudinal tempat gaya apung terdistribusi dan untuk LCG merupakan titik di sepanjang sumbu longitudinal tempat massa kapal terpusat. Sebagai contoh, LMA positif menghasilkan trim buritan ke atas, sementara LMA negatif menghasilkan trim buritan ke bawah.



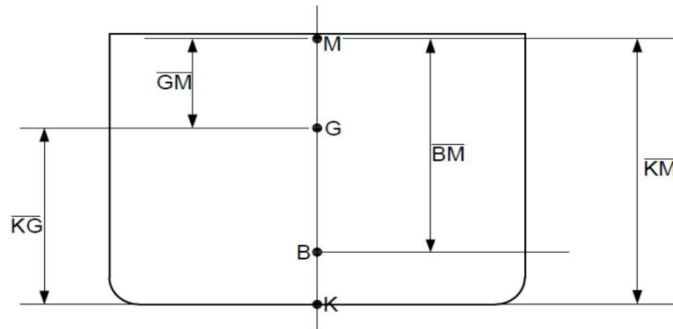
Gambar 2.8 Longitudinal Moment Arm

Sumber : (Pelaut.xyz, 2018)

Untuk mengontrol stabilitas dan trim, kapal selam dilengkapi dengan sistem tangki ballast serta permukaan kendali seperti bidang selam (*diving planes*) dan kemudi (*rudder*). Sistem tangki ballast berfungsi untuk mengatur kerapatan dan daya apung kapal selam dengan mengontrol jumlah air atau udara di dalam tangki. Sementara itu, permukaan kendali digunakan untuk mengatur kedalaman, trim, dan arah kapal selama operasi di bawah air.

Operasi kapal selam bergantung pada interaksi gaya vertikal, termasuk gaya ke atas (gaya apung dan gaya angkat) serta gaya ke bawah (gaya gravitasi dan gaya hambat). Saat menyelam, tangki ballast diisi air untuk meningkatkan kerapatan dan mengurangi daya apung. Sebaliknya, untuk kembali ke permukaan, air dikeluarkan dengan udara terkompresi untuk meningkatkan daya apung.

Dalam operasi, Stabilitas kapal selam sangat penting untuk memastikan operasi yang aman dan efisien di bawah air. Desain stabilitas memerlukan perhitungan parameter yang cermat serta pemantauan dan penyesuaian yang terus-menerus. Tantangan utama bagi para insinyur kelautan adalah memastikan kapal selam mampu beroperasi dengan aman di bawah pengaruh berbagai gaya dan kondisi lingkungan (Superyacht Shipyard, 2023).



Gambar 2.9 Ilustrasi Titik Stabilitas pada Penampang Melintang Kapal

Sumber : (Rivanto, n.d.)

Untuk menghitung stabilitas dapat digunakan persamaan 2.18.

$$BG = B - G = F_B \cdot GM \quad (2.18)$$

Keterangan :

GM : jarak antara pusat gravitasi dan metacentrum (m)

BG : jarak antara pusat apung dan pusat gravitasi (m)

F_B : gaya apung

G : titik pusat gravitasi

B : titik pusat apung

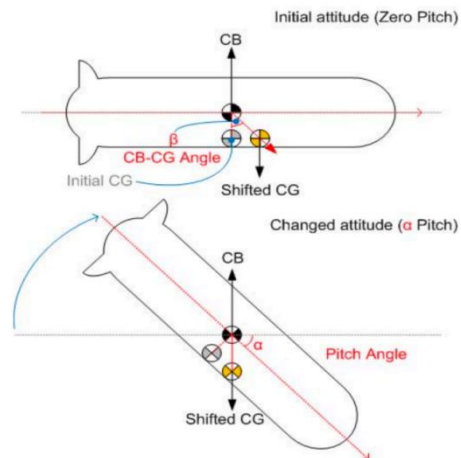
Untuk menghitung metasentrik atau nilai GM dapat menggunakan persamaan 2.19.

$$GM = BM - BG \quad (2.19)$$

Keterangan :

BM : jarak antara pusat apung dan metacentrum (m)

BG : jarak antara pusat apung dan pusat gravitasi (m)



Gambar 2.10 Perpindahan LCG

Sumber : (Adiwilaga et al., 2017)

Untuk menghitung *longitudinal moment arm* (LMA) dapat menggunakan persamaan 2.20.

$$\text{LMA} = \text{LCB} - \text{LCG} \quad (2.20)$$

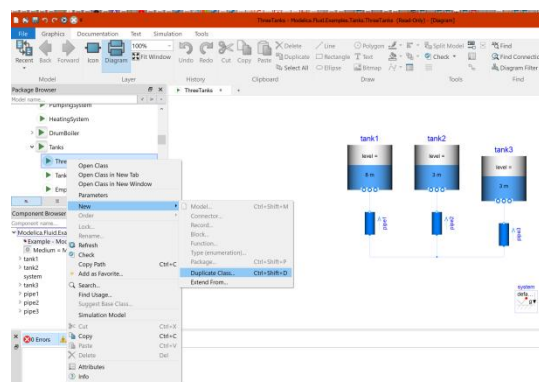
Keterangan :

LMA : *longitudinal moment arm* (m)

LCB : pusat apung *longitudinal* (m)

LCG : pusat gravitasi *longitudinal* (m)

2.1.5 OpenModelica



Gambar 2.11 OpenModelica

Sumber : (Stack Overflow, 2023)

OpenModelica adalah platform pemodelan dan simulasi berbasis *open-source* yang dirancang untuk sistem fisika kompleks seperti sistem

ballast pada *Unmanned Underwater Vehicles* (UUV) (Tundis et al., 2017). Berbasis pada bahasa pemrograman Modelica, OpenModelica memungkinkan pemodelan berbasis objek, di mana persamaan matematis digunakan untuk mendeskripsikan hubungan dinamis antara variabel sistem. Fitur ini memberikan fleksibilitas tinggi dalam memodelkan sistem *ballast*, karena perubahan parameter seperti densitas fluida atau volume kapal selam dapat dianalisis secara langsung melalui simulasi (Fritzson et al., 2018). Dengan pendekatan hierarkis dan modular, platform ini mendukung pengembangan model yang dapat digunakan kembali, menjadikannya alat yang efisien untuk pengembangan sistem *ballast*.

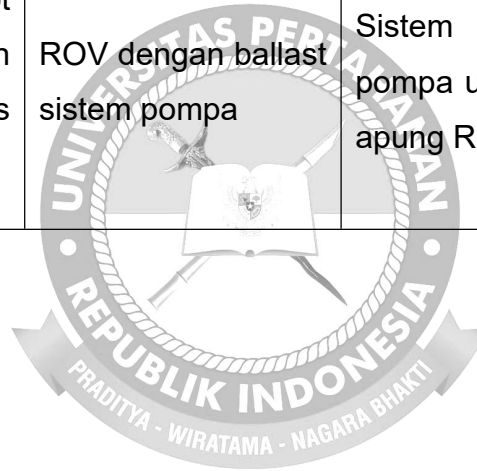
Keunggulan dari OpenModelica adalah visualisasi dinamika sistem dan kemampuan debugging (Fritzson et al., 2022). Visualisasi 3D memungkinkan pemahaman yang lebih baik mengenai perubahan daya apung kapal selam selama simulasi, sementara fitur debugging mendeteksi dan menyelesaikan inkonsistensi dalam persamaan sistem. Dengan demikian, platform ini memberikan solusi lengkap untuk merancang, memvalidasi, dan mengoptimalkan sistem ballast sebelum implementasi fisik (Buffoni et al., 2021). Hal ini tidak hanya mengurangi biaya dan waktu pengembangan tetapi juga meningkatkan kehandalan sistem ballast dalam operasi nyata. Oleh karena itu, OpenModelica menjadi alat yang sangat berguna untuk penelitian dan pengembangan sistem ballast pada UUV.

2.2 Penelitian Terdahulu

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

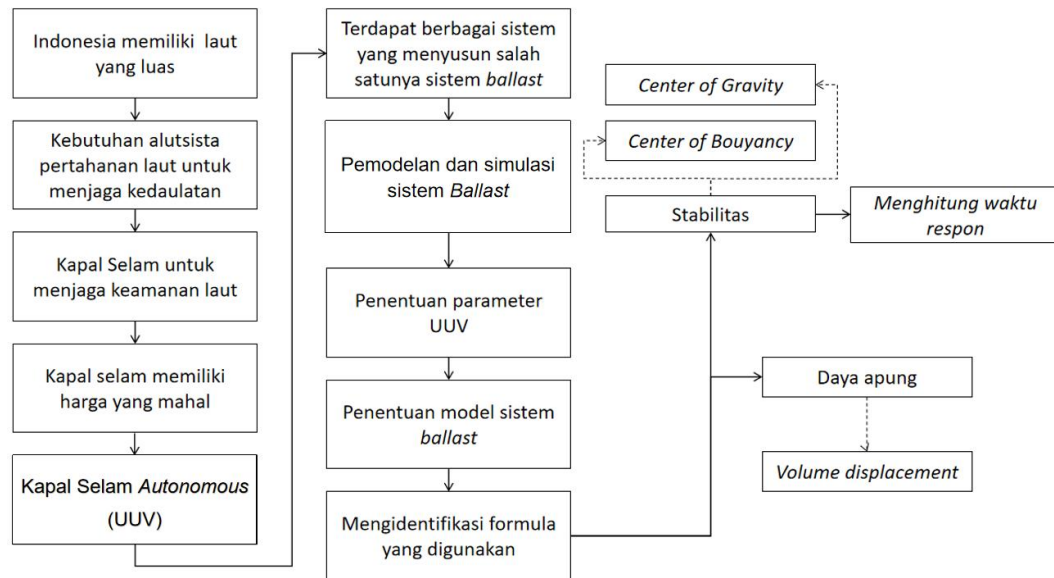
No	Penulis dan Tahun	Judul	Hasil Penelitian		
			Domain	Penelitian Terdahulu	Perbedaan
1.	MacLeod, M., & Bryant, M. (2017)	Dynamic Modeling, Analysis, and Testing of a Variable Buoyancy System for Unmanned Multidomain Vehicles	Sistem buoyancy variabel	Sistem buoyancy variabel memberikan Keterbatasan aplikasi untuk lingkungan yang sangat dinamis.	Melakukan validasi data dengan eksperimen langsung.
2.	Medvedev, A. V., Kostenko, V. V., & Tolstonogov, A. Y. (2017)	Depth control methods of variable buoyancy AUV	Kontrol kedalaman AUV dengan buoyancy variabel	Metode kontrol kedalaman menggunakan sistem buoyancy variabel pada AUV meningkatkan efisiensi dan stabilitas operasi.	Fokus pada algoritmas kontrol.
3.	Kusuma, I. R. (2017)	Design and Simulation of Automatic sistem ballast on Catamaran Ship	Sistem ballast otomatis	Penggunaan PLC meningkatkan efisiensi kontrol ballast pada kapal	Objek analisis berbeda, yaitu pada kapal

		Based on Programmable Logic Control		catamaran.	catamaran.
4.	Edi Mulyana et al. (2016)	Rancang Bangun Robot Bawah Air Menggunakan Sistem Ballast Berbasis ROV	ROV dengan ballast sistem pompa	Sistem ballast berbasis pompa untuk mengatur daya apung ROV.	Fokus pada wireless control dan pengujian jangkauan efektif sistem ballast.



2.3 Kerangka Berpikir

Dalam penelitian ini dilakukan dengan kerangka berpikir sebagai berikut.



Gambar 2.11 Kerangka Berpikir

Sumber : data diolah peneliti

Hal pertama yang dilakukan dalam penelitian ini adalah melakukan identifikasi masalah, yaitu bentuk negar Indonesia yang kepulauan dan memiliki wilayah laut yang besar sehingga membutuhkan alutsista untuk membantu TNI dalam menjaga keamanan maupun pertahanan laut Indonesia. Salah satu alutsista yang digunakan adalah kapal selam, akan tetapi jumlah kapal selam yang dimiliki Indonesia belum memenuhi jumlah ideal, yaitu 12. Maka dari itu dibutuhkan solusi untuk menggantikan peran kapal selam, yaitu dengan UUV. Dalam UUV terdapat beberapa sistem penyusun utama, salah satunya adalah sistem kendali yang didalamnya ada sistem *ballast*.

2.4 Hipotesis

1. Penambahan massa beban pada UUV berbanding terbalik dengan kapasitas tangki *ballast* yang diperlukan untuk mencapai keadaan netral (*neutral buoyancy*), dimana semakin besar massa beban yang ditambahkan maka semakin kecil volume tangki *ballast* yang dibutuhkan.
2. Simulasi sistem tangki *ballast* menggunakan OpenModelica mampu menganalisis dan mengevaluasi daya apung serta stabilitas sistem dalam kondisi variasi beban.

