

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Landasan Teori

2.1.1. Unmanned Underwater Vehicle (UUV)

Unmanned Underwater Vehicle (UUV) adalah kendaraan yang dirancang untuk beroperasi di bawah permukaan air tanpa kehadiran manusia di dalamnya. UUV dapat bervariasi dari kendaraan kecil yang digunakan untuk misi pengintaian dan survei di perairan dangkal hingga kendaraan besar yang dilengkapi dengan peralatan canggih untuk misi survei yang rumit di kedalaman laut. UUV dibedakan menjadi dua berdasarkan sistem kendali yang digunakan. Salah satunya *Remotely Operated Vehicle* (ROV), sesuai dengan namanya kendaraan bawah laut ini di kendalikan menggunakan remot dari permukaan. *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) kendaraan bawah laut ini berbeda dengan ROV karena di kendalikan menggunakan program yang memang sudah di rancang dari sebelum kendaraan tersebut beroperasi atau menggunakan *Artificial Intelligence* (AI) (Allard, Y., Shahbazian, E., & Isenor, A, 2014).



Gambar 2.1 *Remotely Operated Vehicle* (ROV)

Sumber : himakelunsoed.com (himakelunsoed, 2022)



Gambar 2.2 Autonomous Underwater Vehicle (AUV)

Sumber : ixblue.com

2.1.2. REMUS

REMUS (*Remote Environmental Monitoring UnitS*) merupakan salah satu jenis *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) yang dikembangkan oleh *Woods Hole Oceanographic Institution* (WHOI) sejak tahun 1999. Sistem ini dirancang untuk melakukan misi pemantauan lingkungan bawah laut secara otomatis tanpa memerlukan operator manusia secara langsung. REMUS awalnya dikembangkan untuk mendukung kegiatan oseanografi, namun dalam perkembangannya, kendaraan ini juga digunakan secara luas dalam bidang militer dan sipil. Keberhasilan REMUS dalam mengintegrasikan teknologi pemantauan bawah laut dengan sistem navigasi yang canggih menjadikannya sebagai salah satu AUV yang paling banyak digunakan di dunia (WHOI, 2001).

Struktur utama REMUS berbentuk torpedo dengan ukuran bervariasi tergantung pada tipe kendaraan, seperti REMUS 100, REMUS 600, dan REMUS 6000, yang masing-masing didesain untuk kedalaman operasi berbeda. Kendaraan ini dilengkapi dengan sistem propulsi listrik, modul navigasi berbasis *Inertial Navigation System* (INS), serta berbagai jenis sensor oseanografi seperti CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*), ADCP (*Acoustic*

Doppler Current Profiler), kamera optik, dan sonar (Allen et al., 2006). Navigasi REMUS mengandalkan sistem *dead-reckoning* yang dikombinasikan dengan pembaruan posisi melalui GPS saat di permukaan serta *Doppler Velocity Log* (DVL) saat berada di bawah laut, memungkinkan akurasi navigasi yang tinggi bahkan dalam misi yang berlangsung lama (Yoerger et al., 2007).

Dalam aplikasi militer, REMUS berperan penting dalam deteksi ranjau laut, pemetaan dasar laut untuk operasi amfibi, serta misi intelijen taktis bawah laut. Departemen Pertahanan Amerika Serikat telah memanfaatkan REMUS dalam berbagai operasi keamanan laut, terutama karena kemampuannya melakukan penyisiran area berisiko secara otomatis dan presisi tinggi (Bellingham & Rajan, 2007). Sementara dalam ranah sipil dan akademis, REMUS digunakan dalam penelitian oseanografi, pemantauan kualitas air, eksplorasi arkeologi bawah laut, serta konservasi lingkungan laut. Data yang diperoleh dari sensor REMUS sangat berharga dalam mendukung studi dinamika kelautan, perubahan iklim, hingga mitigasi bencana alam seperti tsunami dan tumpahan minyak (Jakuba et al., 2008).

Meski REMUS telah terbukti sebagai platform yang andal, tantangan teknis seperti keterbatasan daya tahan baterai dan keterbatasan transmisi data *real-time* di bawah laut masih menjadi perhatian utama. Oleh karena itu, pengembangan teknologi REMUS saat ini difokuskan pada peningkatan efisiensi energi, integrasi algoritma kecerdasan buatan (AI) untuk pengambilan keputusan mandiri, serta pengembangan sistem komunikasi bawah laut berbasis akustik yang lebih cepat dan stabil (Singh et al., 2012). Selain itu, konsep operasi AUV secara berkelompok (*swarm AUVs*) mulai dikembangkan, yang memungkinkan beberapa unit REMUS beroperasi secara terkoordinasi untuk meningkatkan cakupan area survei dan efisiensi waktu misi (Gonzalez et al., 2014).

2.1.3. Dinamika *Unmanned Underwater Vehicle* (UUV)

UUV adalah *drone* bawah laut yang memiliki konsep dasar manuver yang serupa dengan kapal selam. Kapal selam ataupun UUV dapat melakukan manuver pada enam derajat kebebasan atau yang biasa disebut *six Degree Of Freedom* (6-DOF) (Wu, C. J, 2018) seperti pada Gambar 2.3. Notasi keenam derajat kebebasan sesuai standar yang ditetapkan SNAME (*Society of Naval Architect and Marine Engineers*) (Hassan et al, 2018), dijabarkan pada tabel 2.1 dan 2.2.

Tabel 2.1 Deskripsi notasi dan derajat kebebasan

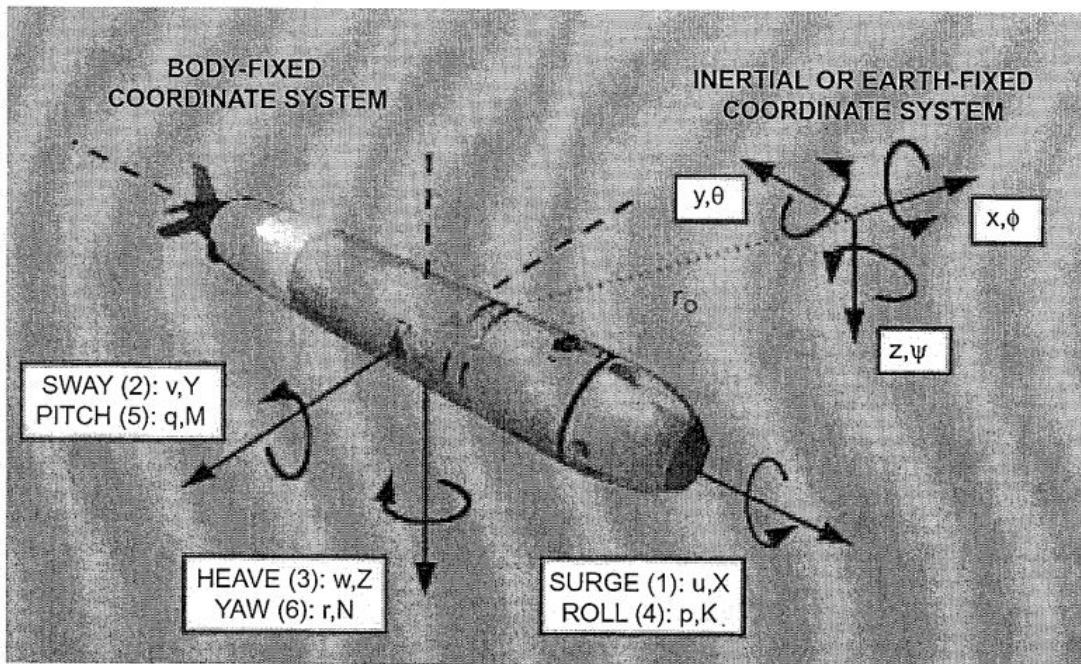
DOF	Keterangan	Gaya	Kecepatan Linear	Posisi
1	Surge	X	u	x
2	Sway	Y	v	y
3	Heave	Z	w	z

Sumber : Hassan, 2018

Tabel 2. 2 Deskripsi notasi dan derajat kebebasan

DOF	Keterangan	Gaya	Kecepatan Linear	Posisi
1	Roll	K	p	ϕ
2	Pitch	M	q	θ
3	Yaw	N	r	ψ

Sumber : Hassan, 2018



Gambar 2. 3 Sistem Kerangka Referensi UUV

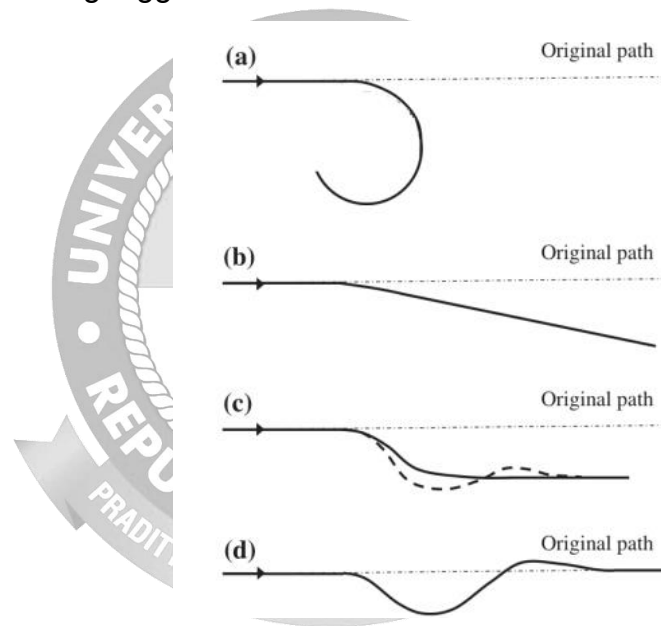
Sumber : (Smith, 2023)

Untuk menganalisis gerakan kendaraan bawah air, diperlukan dua sistem koordinat yaitu *earth-fixed coordinates* dan *body-fixed coordinates*. *Earth-fixed coordinates* digunakan untuk mendeskripsikan posisi dan orientasi kendaraan bawah air dengan sumbu-x mengarah ke utara, sumbu-y mengarah ke timur, dan sumbu-z mengarah ke pusat bumi. Sedangkan *body-fixed coordinates* digunakan untuk mendeskripsikan kecepatan dan percepatan UUV (Vu et al, 2020). Titik pusatnya biasanya di letakkan di pusat gravitasi atau *Center of Gravity* (CG).

Sama seperti kapal selam, dalam melakukan manuver pada arah sumbu-x terdapat empat tingkat stabilitas gerak, yaitu:

- Tidak Stabil (*Unstable*): Kapal tidak mampu mempertahankan arah maupun *heading* yang diinginkan.
- Stabilitas Garis Lurus (*Straight Line Stability*): Kapal tetap bergerak lurus, tetapi *heading*-nya berubah ketika terkena gangguan.

- c. Stabilitas Direksional (*Directional Stability*): Kapal bergerak lurus dan mempertahankan *heading* awal, namun jalurnya berubah dari jalur semula.
- d. Stabilitas Gerak Posisional (*Positional Motion Stability*): Kapal mampu mempertahankan baik *heading* maupun jalur meskipun terkena gangguan.

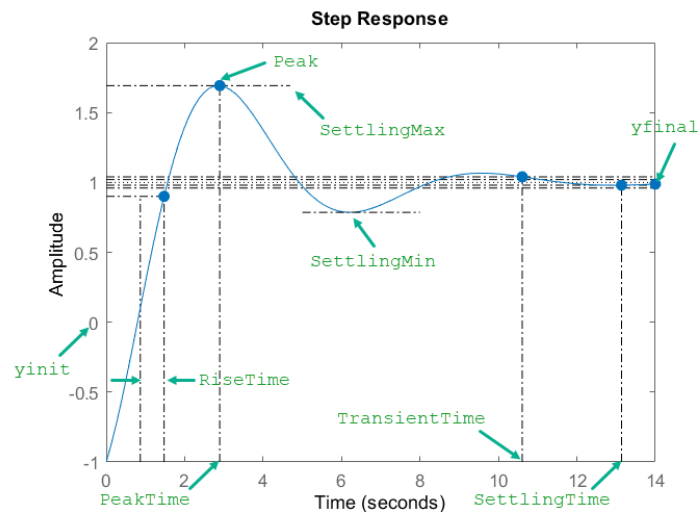


Gambar 2. 4 Tidak Stabil (a), Stabilitas Garis Lurus (b), Stabilitas Direksional (c), Stabilitas Gerak Posisional (d).

Sumber : Renilson (2015)

2.1.4. Parameter Sistem Kendali dalam Analisis Respon Transien

Dalam analisis respons transien sistem kendali, terdapat sejumlah parameter yang digunakan untuk menggambarkan bagaimana sistem merespons input. Beberapa parameter utama yang sering digunakan adalah *Rise Time*, *Settling Time*, *Peak Time*, *Maximum Overshoot*, *Delay Time*, dan *Steady-State Error*. Parameter-parameter ini memberikan gambaran tentang performa dinamis dari sistem dan seberapa cepat dan seberapa akurat sistem dapat menanggapi perubahan input.



Gambar 2.5 Respons langkah sistem kendali *heading* UUV berbasis PID yang menunjukkan parameter performa seperti *Rise Time*, *Peak Time*, *Settling Time*, dan *Steady-State Error*.

Sumber: Mathworks.com

a. *Rise Time*

Rise Time adalah waktu yang diperlukan bagi respons sistem untuk naik dari 10% hingga 90% dari nilai akhirnya setelah diberikan input. Waktu naik yang lebih pendek menunjukkan bahwa sistem tersebut lebih cepat dalam merespons perubahan input. Namun, sistem yang cepat (dengan waktu naik pendek) mungkin lebih rentan terhadap *overshoot* atau ketidakstabilan, yang bisa menyebabkan fluktuasi berlebihan dalam sistem (Ogata, 2010).

b. *Settling Time*

Settling Time adalah waktu yang diperlukan bagi respon sistem untuk berada dalam jarak tertentu dari nilai akhirnya (biasanya 2% atau 5%). Waktu *settling* mengindikasikan seberapa cepat sistem mencapai kestabilan setelah diberikan input. Sistem dengan waktu *settling* yang lebih pendek dapat dianggap lebih stabil dan efisien, karena mencapai

keseimbangan lebih cepat (Nise, 2015). *Settling time* menunjukkan waktu yang diperlukan untuk mencapai 98% dari nilai akhirnya.

c. *Peak Time*

Peak Time adalah waktu yang dibutuhkan bagi respons sistem untuk mencapai nilai maksimum pertama kalinya setelah input diberikan. Ini menunjukkan kecepatan sistem untuk merespons dalam mencapai titik puncak. Waktu puncak yang terlalu lama dapat menunjukkan bahwa sistem membutuhkan waktu lama untuk mencapai puncak responsnya (Ogata, 2010).

d. *Delay Time*

Delay Time adalah waktu yang diperlukan untuk respons sistem mulai merespons setelah diberikan input. Ini sering kali merujuk pada jeda antara penerimaan sinyal dan respons awal dari sistem. Sistem dengan waktu tunda yang lebih pendek akan memberikan respons yang lebih cepat terhadap perubahan input (Nise, 2015). *Delay time* dapat dilihat pada waktu saat 50% nilai input.

e. *Maximum Overshoot*

Maximum Overshoot adalah jumlah maksimum dari respons sistem yang melebihi nilai akhirnya setelah diberikan input. Ini terjadi ketika sistem merespons terlalu berlebihan sebelum akhirnya stabil kembali. *Overshoot* yang besar seringkali menunjukkan bahwa sistem kurang stabil atau memiliki kontrol yang terlalu agresif (Nise, 2015).

f. *Steady-State Error*

Steady-State Error adalah perbedaan antara nilai yang diinginkan dan nilai sistem pada keadaan *steady-state* (setelah transien mereda). Ini mengukur seberapa akurat sistem dapat mencapai nilai akhir yang diinginkan setelah periode respons transien (Nise, 2015). Cara menghitung *error* dapat menggunakan persamaan dibawah:

$$\frac{Output-Input}{Input} \times 100\% = \%error \quad (2.1)$$

2.1.5. Pemodelan Dinamika UUV

Persamaan dasar yang digunakan untuk memodelkan dinamika kapal selam tanpa awak atau UUV adalah berdasarkan hukum kedua Newton, yang menyatakan bahwa:

$$F = m \cdot a \quad (2.2)$$

Pada gerak UUV berkaitan dengan enam derajat kebebasan atau 6-DOF dapat dibagi menjadi tiga subsistem yang tidak saling berpengaruh satu sama lain yaitu, sistem kendali kecepatan, kendali arah, dan kendali kedalaman. Pemodelan sistem kendali pada UUV membutuhkan pertimbangan gerakan linear sepanjang sumbu x dan y serta gerakan rotasi searah sumbu z. Persamaan umum manuver kapal dengan enam derajat kebebasan ditunjukkan pada persamaan 2.2:

$$M\dot{v} + Dv = \tau \quad (2.3)$$

Persamaan ini merupakan bentuk umum dari hukum Newton kedua ($F = m \cdot a$) yang diterapkan pada sistem dinamika kapal selam. Matriks M mencakup massa dan inersia, sedangkan D mencakup efek redaman akibat gesekan fluida. $\tau = ?$.

Heading (ψ) adalah sudut yang menentukan orientasi kapal dalam bidang horizontal. Kendali *heading* didasarkan pada dinamika gerakan *sway* (gerakan lateral) dan *yaw* (rotasi sekitar sumbu vertikal). Persamaan dasar Newton untuk gerakan *sway*, hukum Newton $F = m \cdot a$ dalam lateral (sumbu-y) menunjukkan bahwa gaya total dalam arah y sama dengan massa dikali dengan percepatan dalam arah y:

$$F_y = m \cdot a_y \quad (2.4)$$

Percepatan kapal dalam arah lateral (*sway*) adalah turunan dari kecepatan lateral v dan percepatan gravitasi:

$$a_y = \dot{v} + x_g \dot{v} + u_o r \quad (2.5)$$

Sehingga persamaan dasar Newton dalam arah lateral menjadi :

$$F_y = m(\dot{v} + x_g \dot{v} + u_o r) \quad (2.6)$$

Gaya total yang bekerja pada gerakan sway terdiri dari beberapa komponen yaitu gaya hidrodinamik yang dipengaruhi oleh kecepatan dan percepatan. Gerakan sway adalah gerakan translasi sepanjang sumbu-y, yang dipengaruhi oleh gaya hidrodinamik, gaya kontrol, dan gaya akibat massa tambahan. Gaya hidrodinamik adalah gaya yang dihasilkan oleh interaksi kapal selam dengan air dipengaruhi oleh kecepatan dan percepatan lateral. Gaya hidrodinamik dalam arah sway dapat dinyatakan sebagai:

$$F_{hidrodinamik} = Y_v v + Y_r r + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} \quad (2.7)$$

Gaya kontrol adalah gaya yang dihasilkan oleh defleksi kemudi atau alat kontrol lainnya pada UUV ini di gunakan *rudder*. Gaya kontrol dalam arah sway dihasilkan oleh defleksi *rudder* (δ_R):

$$F_{kontrol} = Y_R \delta_R \quad (2.8)$$

Gaya akibat massa tambahan muncul saat kendaraan bergerak dalam fluida, massa efektifnya lebih besar daripada massa aslinya karena fluida yang ikut bergerak bersama kendaraan. Dengan Menggabungkan semua gaya di atas ke dalam Hukum Newton kedua, maka gaya total:

$$Y_R \delta_R + Y_v v + Y_r r + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} = m(\dot{v} + x_g \dot{v} + u_o r) \quad (2.9)$$

Persamaan gerak yaw pada UUV merujuk kepada Hukum Newton untuk gerakan berotasi atau persamaan momen seperti dibawah:

$$\sum M = I \alpha \quad (2.10)$$

Ditunjukkan dalam *body-fixed coordinate*, persamaan momen yaw adalah:

$$N = I_z \dot{r} \quad (2.11)$$

Gaya yang mempengaruhi adalah gaya akibat massa tambahan, gaya hidrodinamik, dan gaya kontrol. Sehingga persamaan umum yaw menjadi:

$$N_v v + N_r r + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} - I_z \dot{r} = m(x_g \dot{v} + x_g u_o r) \quad (2.12)$$

Persamaan 2.8 dan 2.11 di ubah ke dalam bentuk matriks persamaan 2.2 dan menghasilkan persamaan 2.12 dibawah.

$$\begin{bmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \\ 0 \end{bmatrix} \delta_R = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Y_v & mu_0 - Y_r & 0 \\ -N_v & mx_G u_0 - N_r & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Persamaan 2.12 diatas di ubah menjadi model *state-space*, dimana bentuk *state-space* nya dinyatakan pada persamaan dibawah ini

$$\dot{x} = Ax + B\delta_R \quad (2.14)$$

$$y = C^T x \quad (2.15)$$

Dengan

$$x = [v \quad r \quad \psi]^T \quad (2.16)$$

$$y = \psi \quad (2.17)$$

Representasi bentuk *state-space* pada persamaan 2.12 dinyatakan dengan bentuk matriks yang di tunjukkan di persamaan 2.17.

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Y_v & mu_0 - Y_r & 0 \\ -N_v & mx_G u_0 - N_r & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \\ 0 \end{bmatrix} \delta_R \quad (2.18)$$

Nilai koefisien hidrodinamika pada persamaan *heading* dapat diperoleh dengan pendekatan rumus empiris. Perhitungan koefisien ini meliputi komponen *hull*, *appendage*, dan permukaan kendali (*control surface*).

2.1.6. Sistem Kendali

Sistem kendali merupakan sekumpulan komponen fisik yang saling terhubung untuk mengatur, mengarahkan, atau mempertahankan performa suatu sistem agar sesuai dengan referensi yang diinginkan. Sistem ini terdiri atas subsistem dan proses (*plant*) yang dirancang untuk menghasilkan keluaran sesuai input yang ditetapkan (Ogata, 2010).

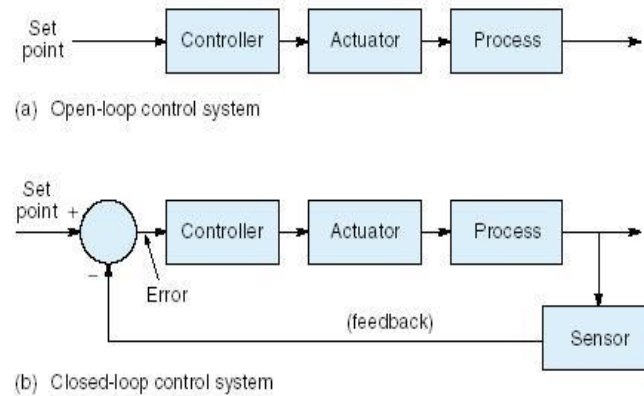
Dalam konteks kendaraan bawah air tanpa awak (*Unmanned Underwater Vehicle* atau UUV), pemodelan sistem kendali sangat krusial. Tiga

pendekatan umum dalam pemodelan sistem kendali UUV adalah *open loop*, *closed loop*, dan *closed loop multi-sensor* (Gao et al., 2016). UUV memiliki sistem kendali serupa dengan kapal selam dan dibagi menjadi dua subsistem utama, yaitu sistem kendali *heading* dan *diving*. Sistem kendali *heading* mengatur arah agar tetap stabil dan menuju target, sedangkan *diving* menjaga kedalaman operasi (Khalil et al., 2019).

Untuk mendukung kedua subsistem tersebut, UUV dilengkapi dengan aktuator seperti propeller, tangki ballast, tangki kompensasi, tangki trim, *rudder*, *stern*, dan *hydroplane*. Kombinasi aktuator ini memungkinkan UUV bermanuver secara presisi dalam lingkungan bawah laut yang kompleks (Ridao et al., 2004). Dalam pengendalian arah (*heading*), *rudder* menjadi komponen utama. Sudut *rudder* kecil memberikan perubahan arah yang stabil tetapi lambat, sementara sudut besar menghasilkan perubahan cepat dengan risiko *overshoot* atau osilasi. Penggunaan algoritma seperti PID, pembatasan sudut maksimum, serta sistem umpan balik dari sensor *heading* digunakan untuk menjaga kestabilan (Zhao et al., 2018).

Pemodelan *open loop* digunakan pada tahap awal untuk memahami respons dasar sistem tanpa umpan balik, di mana sinyal masukan langsung diteruskan ke aktuator. Pemodelan ini berguna untuk mengidentifikasi karakteristik awal sistem (Thakur et al., 2020). Selanjutnya, pendekatan *closed loop* digunakan dengan sensor sebagai umpan balik untuk membandingkan keluaran aktual dengan *input*, sehingga sistem dapat menyesuaikan secara

otomatis terhadap gangguan dan mempertahankan performa (Karras & Ghabcheloo, 2012).



Gambar 2. 6 Model Open-Loop dan Closed-Loop Sistem Kendali

Sumber: (Industrial Instrumentation Solutions, 2018)

Pendekatan yang lebih maju adalah *closed loop multi-sensor*, yang mengintegrasikan data dari berbagai sensor untuk meningkatkan akurasi pengukuran sistem. Misalnya, dalam kendali UUV, sensor *heading*, kedalaman, dan kecepatan vertikal digunakan secara bersamaan untuk menghasilkan sistem kendali yang lebih presisi. Dalam penelitian ini, penggunaan multi-sensor tidak hanya meningkatkan keakuratan navigasi UUV, tetapi juga memastikan ketahanan terhadap kondisi lingkungan yang tidak terduga, seperti perubahan arus bawah laut atau tekanan air. Dengan kombinasi pemodelan ini, sistem kendali pada UUV mampu menghadirkan stabilitas, respons yang cepat, serta keandalan tinggi. Hal ini menjadikannya solusi ideal untuk berbagai misi bawah air, termasuk eksplorasi, penelitian, hingga operasi militer.

2.1.7. Sistem Kendali PID (*Proportional, Integral, and Derivative*)

Sistem kendali PID (*Proportional-Integral-Derivative*) adalah jenis sistem kendali berbasis *feedback* yang paling umum digunakan dalam

berbagai bidang, seperti industri, maritim, hingga otomasi. Sistem ini memiliki keunggulan dalam memberikan respons yang cepat, desain sederhana, biaya implementasi rendah, serta fleksibilitas dalam berbagai aplikasi, meskipun model matematis dari plant tidak diketahui secara pasti. Hal ini menjadikan PID sebagai pilihan yang populer untuk mengontrol berbagai jenis *plant* (Mendes, 2017).

Dibandingkan dengan metode lain seperti kontrol ON/OFF yang kurang presisi atau *Model Predictive Control* (MPC) yang lebih canggih, PID lebih hemat biaya dan mudah diimplementasikan. Namun, PID kurang optimal untuk sistem non-linear yang kompleks atau memiliki waktu tunda besar, di mana metode seperti MPC atau kontrol adaptif lebih efektif karena mampu memprediksi dan menyesuaikan kendali secara dinamis berdasarkan perubahan sistem (Yuldashev, 2024).

Pengendali PID bekerja dengan memanfaatkan tiga elemen utama, yaitu:

a. Proportional (P):

Elemen ini menghasilkan sinyal kendali yang proporsional terhadap *error* ($e(t)$) yang terjadi pada sistem. Semakin besar *error*, semakin besar sinyal kendali yang diberikan. Penambahan *gain* proportional (K_p) meningkatkan responsivitas sistem, namun dapat menyebabkan ketidakstabilan jika nilainya terlalu besar.

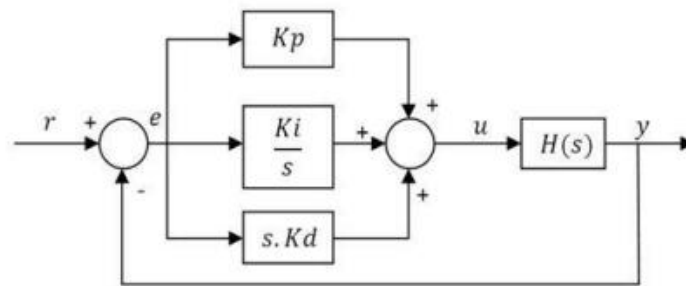
b. Integral (I):

Komponen integral menghitung akumulasi *error* dari waktu ke waktu. Fungsi ini bertujuan untuk mengurangi *error steady-state* (e_{ss}) hingga mendekati nol. Namun, gain integral (K_i) yang terlalu besar dapat menyebabkan *overshoot* pada sistem.

c. Derivative (D):

Komponen derivative memperhitungkan laju perubahan *error*. Elemen ini membantu menambah damping pada sistem sehingga dapat mengurangi *overshoot* dan meningkatkan stabilitas.

Kombinasi ketiga komponen ini bertujuan untuk mengatasi kekurangan dari masing-masing elemen kendali secara terpisah. Kombinasi proportional dan integral dapat mengeliminasi *error steady-state*, namun sering kali menimbulkan *overshoot*. Penambahan elemen derivative membantu meredam *overshoot* tersebut sekaligus meningkatkan kestabilan sistem (Johnson, M. A., & Moradi, M. H, 2005). Gambar 2.7 merupakan skema pengendali PID.



Gambar 2. 7 Skema Pengendali PID

Sumber: (Wangready, 2012)

2.1.7. *OpenModelica*

OpenModelica adalah *software* berbasis *open-source* yang digunakan untuk pemodelan, simulasi, dan analisis sistem yang kompleks, terutama yang berkaitan dengan sistem fisis dan hibrida, seperti sistem termal, mekanik, dan hidrolik. *OpenModelica* dikembangkan oleh *Open Source Modelica Consortium* (OSMC) sebagai alat yang mendukung pemodelan Modelica (Fritzson et al, 2022).

OpenModelica memiliki beberapa keunggulan yang membuatnya populer di kalangan teknisi dan peneliti. Sebagai perangkat lunak *open-source*,

OpenModelica dapat diakses dan dimodifikasi secara gratis, memungkinkan pengguna untuk mengembangkan dan menyesuaikan perangkat lunak ini sesuai kebutuhan mereka. Kompatibilitasnya dengan Modelica memungkinkan pemodelan sistem multidomain, sehingga pengguna dapat mengintegrasikan berbagai model fisik seperti sistem termal, hidrolik, dan mekanik dalam satu lingkungan simulasi. Dukungan komunitas yang kuat dari *Open Source Modelica Consortium* (OSMC) juga menjadi keunggulan tersendiri, karena pengguna memiliki akses ke dokumentasi tambahan, tutorial, serta pembaharuan yang berkelanjutan. Selain itu, *OpenModelica* memiliki fleksibilitas tinggi untuk diintegrasikan dengan perangkat lain melalui dukungan API untuk Python dan MATLAB, yang sangat bermanfaat untuk kebutuhan otomatisasi dan analisis data lebih lanjut. Kombinasi fleksibilitas, akses terbuka, serta dukungan komunitas menjadikan *OpenModelica* alat yang ideal untuk penelitian, desain, dan pengembangan prototipe di berbagai bidang (Fritzson et al, 2022).

2.2. Hasil Penelitian Terdahulu

Tabel 2.3 Hasil Penelitian Terdahulu

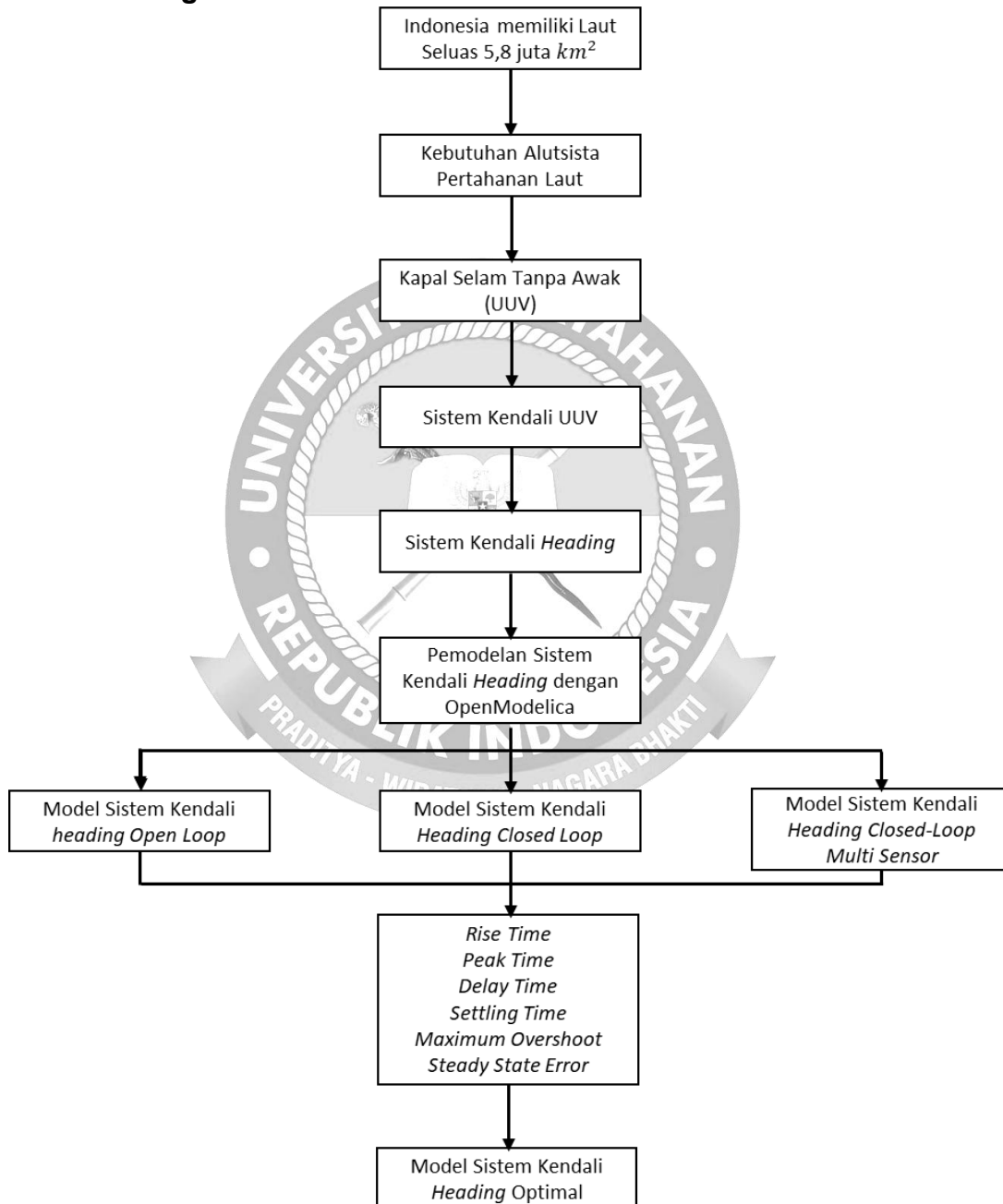
Penulis dan Tahun	Judul Penelitian	Permasalahan	Metode Penelitian	Hasil Penelitian	Perbedaan dengan Penelitian
Pradana Rachim dkk, 2012	Desain Sistem Kendali pada Ular (UUV) <i>Unmanned Underwater Vehicle</i>	Sistem kendali yang efektif dan efisien untuk Kendaraan Bawah Air Tanpa Awak (UUV) dapat dirancang dengan menerapkan strategi kendali guna menangani gangguan lingkungan dan ketidakpastian pada model.	Metode kendali terpisah digunakan untuk merancang sistem kendali pada UUV (<i>Unmanned Underwater Vehicle</i>) dengan 6 DOF (<i>Degrees of Freedom</i>). Pendekatan ini membagi sistem UUV menjadi tiga subsistem utama: sistem kecepatan, sistem kemudi, dan sistem penyelaman. Setiap subsistem dikendalikan menggunakan metode kendali yang berbeda sesuai dengan karakteristiknya. Sistem kendali yang	Kesimpulannya, sistem pergerakan lintasan dapat dikembangkan lebih lanjut untuk memprediksi pergerakan <i>Unmanned Underwater Vehicle</i> (UUV) secara lebih akurat. Selain itu, penambahan kontrol kaskade pada sistem ini juga bisa dilakukan untuk memungkinkan analisis yang lebih mendalam terkait pergerakan UUV. Di sisi lain, sistem kontrol lain, seperti kontrol optimal atau kontrol <i>robust</i> H-tak teringga, dapat	Penelitian ini hanya fokus pada <i>heading</i> , menggunakan OpenModelica, dan membandingkan <i>open loop</i> , <i>closed loop</i> , serta <i>multi-sensor</i> , bukan hanya sistem kendali umum.

			dirancang kemudian diimplementasikan dan disimulasikan menggunakan MATLAB 2009a.	dieksplorasi untuk menangani kompleksitas sistem UUV yang bersifat non-linier.	
Hongjja dkk, 2019	<i>Fuzzy Optimized MFAC Based on ADRC in AUV Heading Control</i>	Permasalahan yang dihadapi dalam meningkatkan kinerja kontrol kendaraan bawah air otonom (AUV) adalah memastikan pengendalian arah (<i>heading control</i>) yang efektif dalam menghadapi tantangan keterkaitan yang kuat, fitur yang berubah seiring waktu, serta gangguan dari arus dan gelombang laut.	Kontrol adaptif bebas model yang dioptimalkan <i>fuzzy</i> (MFAC) berbasis kontrol penolakan gangguan otomatis (ADRC) digunakan untuk mengendalikan arah AUV. MFAC membantu mengatasi kesulitan dalam penetapan model matematika yang tepat, sementara ADRC menangani gangguan arus dan gelombang. Kontrol <i>fuzzy</i> ditambahkan untuk meningkatkan adaptabilitas AUV terhadap lingkungan laut.	Penelitian ini menyimpulkan bahwa MFAC teroptimasi <i>fuzzy</i> berbasis ADRC untuk pengendalian arah AUV memiliki kinerja, ketahanan, dan kemampuan anti-interferensi yang lebih baik dibandingkan dengan PID, MFAC, dan MFAC berbasis ADRC.	Penelitian ini menggunakan PID klasik, namun diuji pada sistem dengan konfigurasi <i>open loop</i> , <i>closed loop</i> , dan <i>multi-sensor</i> serta input manuver, bukan hanya simulasi algoritma adaptif.

Muchammad Rifki Abdillah, 2020	Desain Sistem Kendali <i>Heading</i> dan <i>Diving</i> pada Kapal Selam Menggunakan Sistem Kontrol PID (<i>Proportional, Integral, and Derivative</i>)	Penelitian ini membahas desain sistem kendali <i>heading</i> dan diving pada kapal selam menggunakan kontrol PID. Masalah utama yang dihadapi adalah kebutuhan akan manuver yang akurat, yang sangat dipengaruhi oleh model matematis dan koefisien hidrodinamis kapal selam.	Penelitian ini menggunakan metode simulasi CFD untuk memperoleh koefisien hidrodinamis, merancang sistem kendali berbasis <i>closed-loop multi-sensor</i> , dan menganalisis performa melalui simulasi.	Hasil menunjukkan bahwa sistem kendali <i>heading</i> mencapai <i>settling time</i> 177 detik tanpa <i>overshoot</i> dan <i>steady state error</i> , sementara sistem kendali diving dengan kedalaman 50 meter memiliki <i>settling time</i> 225,45 detik, <i>overshoot</i> 56,9 meter, dan <i>steady state error</i> 0,6%.	Penelitian ini hanya fokus pada heading UUV, menggunakan data REMUS, disimulasikan di OpenModelica, dan melibatkan pengujian zig-zag serta <i>multi-sensor</i> .
--------------------------------	--	---	---	---	--

Sumber: diolah oleh peneliti

2.3. Kerangka Berfikir



Gambar 2. 8 Diagram Alir Kerangka Berfikir Penelitian

Sumber: diolah oleh peneliti

Pada gambar 2.8 menggambarkan alur logis penelitian yang diawali dari kondisi geografis Indonesia sebagai negara kepulauan dengan luas laut mencapai 5,8 juta km², sehingga diperlukan penguatan alutsista pertahanan laut. Salah satu solusi yang dikembangkan adalah kapal selam tanpa awak (UUV) yang membutuhkan sistem kendali navigasi presisi, khususnya pada sistem kendali *heading*. Untuk mendukung hal tersebut, dilakukan pemodelan sistem kendali *heading* menggunakan OpenModelica dengan membandingkan tiga jenis konfigurasi sistem: *open loop*, *closed loop*, dan *closed loop multi sensor*. Ketiga model ini dianalisis berdasarkan parameter performa sistem seperti *rise time*, *peak time*, *delay time*, *settling time*, *maximum overshoot*, dan *steady state error*. Hasil analisis digunakan untuk menentukan model sistem kendali *heading* yang paling optimal dalam menjaga kestabilan arah UUV secara responsif dan akurat.

2.4. Hipotesis

- a. Sistem kendali *heading* UUV yang dirancang menggunakan sistem kendali PID yang disimulasikan menggunakan OpenModelica mampu menghasilkan performa yang stabil dan responsif terhadap waktu.
- b. Model *closed loop multi sensor* memiliki kinerja sistem kendali *heading* yang lebih baik dalam menjaga kestabilan arah dibandingkan model *open loop* dan *closed loop*.