

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

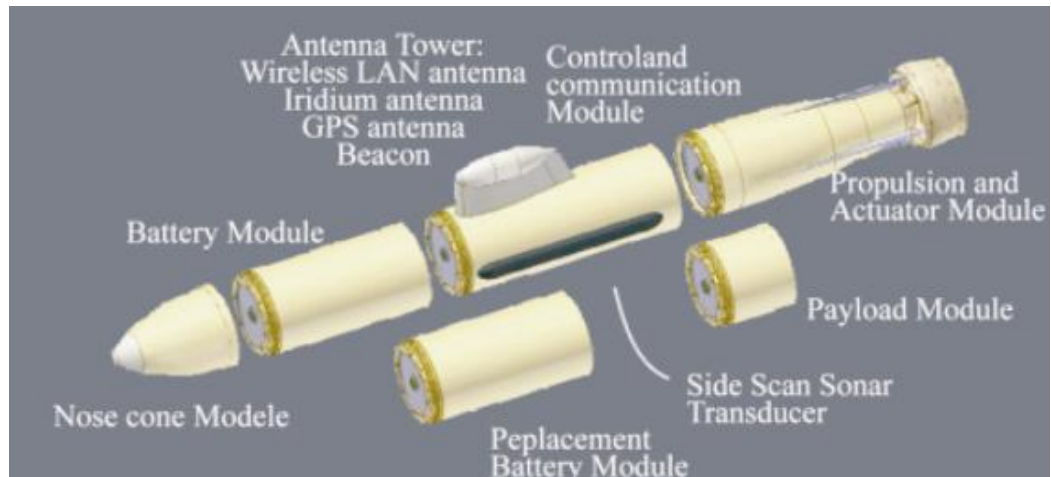
2.1.1 *Unmanned underwater vehicle*

Unmanned Underwater Vehicle (UUV) adalah kendaraan bawah air tanpa awak yang dirancang untuk beroperasi di lingkungan laut tanpa kehadiran manusia. Kendaraan ini menggunakan teknologi canggih untuk menjalankan misi di bawah permukaan air, mulai dari eksplorasi ilmiah hingga operasi militer. UUV dapat berfungsi secara mandiri atau dengan kendali jarak jauh, menjadikannya alat yang penting untuk berbagai aplikasi, termasuk surveilans, pemetaan laut, dan deteksi ranjau. Keunggulan UUV meliputi efisiensi biaya, kemampuan menjangkau area sulit, dan keamanan karena tidak memerlukan kehadiran manusia di lingkungan yang berbahaya (Allard, Y., Shahbazian, E., & Isenor, A, 2014).

UUV terbagi dalam dua kategori utama berdasarkan tingkat kendali dan otonomi. *Remotely Operated Vehicles* (ROVs) adalah kendaraan yang dikendalikan dari jarak jauh melalui kabel, memungkinkan operator untuk memonitor dan mengontrol kendaraan secara langsung. Kendaraan ini banyak digunakan untuk inspeksi bawah laut dan perbaikan infrastruktur. Sebaliknya, *Autonomous Underwater Vehicles* (AUVs) beroperasi secara otonom berdasarkan program yang telah ditentukan sebelumnya. AUVs tidak memerlukan koneksi langsung dengan operator, sehingga ideal untuk operasi di laut dalam atau wilayah berbahaya (Allard, Y., Shahbazian, E., & Isenor, A, 2014).

UUV memiliki berbagai aplikasi yang luas. Dalam *Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance* (ISR), UUV digunakan untuk pemantauan pelabuhan dan pengumpulan data intelijen. Pada misi *Mine Countermeasures* (MCM), UUV mendeteksi dan menetralkan ranjau laut untuk memastikan keamanan jalur kapal. Dalam *Anti-Submarine Warfare* (ASW), UUV melacak dan mengidentifikasi kapal selam musuh

menggunakan sonar aktif dan pasif. UUV juga mendukung penelitian ilmiah, seperti pemetaan dasar laut dan pengukuran arus dalam *oceanography* and *hydrography*. Selain itu, UUV digunakan dalam pengantaran muatan seperti sensor atau logistik di misi *payload delivery* (Robert et al, 2009).



Gambar 2.1 General Arrangement of Gavia AUV

Sumber: (Chen, Q., & Liu, J, 2011)

UUV terdiri dari berbagai komponen utama yang mendukung operasinya. Struktur kendaraan dirancang dari bahan tahan korosi dan mampu menahan tekanan tinggi di kedalaman laut. Sistem propulsi menggunakan motor elektrik yang menggerakkan baling-baling. UUV dilengkapi sensor seperti sonar untuk navigasi dan kamera bawah air untuk pemantauan. Sistem navigasi menggunakan *GPS* di permukaan dan sonar *doppler* di bawah air. Selain itu, komunikasi menggunakan gelombang akustik untuk mentransmisikan data, sementara sumber daya energi, seperti baterai lithium-ion, memungkinkan operasi yang panjang (Chen, Q., & Liu, J, 2011).

Desain dari sebuah UUV juga sangat mempengaruhi gerakan dari sebuah UUV, Faktor-faktor seperti bentuk lambung, ukuran, material, dan desain propeler semuanya berkontribusi terhadap performa hidrodinamik dan efisiensi sistem propulsi UUV (Saad, M., Khan, R., & Ahmed, S, 2021). Bentuk lambung dari sebuah UUV mempengaruhi resistansi atau hambatan

dari UUV, dimana ketika UUV bergerak kedepan maka resistansi akan meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan dari UUV. Resistansi ini biasa disebut gaya hambat yang dijelaskan dengan penurunan rumus berikut:

$$F_D = PA_f \quad (2.1)$$

Variabel P mewakili tekanan dari aliran fluida yang diterima oleh UUV, tekanan dari aliran fluida ditentukan oleh kecepatan aliran dari fluida dan densitas fluida. Sehingga digambarkan dengan persamaan berikut:

$$P = \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (2.2)$$

Kemudian persamaan 2.2 disubstitusikan ke persamaan 2.1 sehingga didapatkan rumus:

$$F_D = \frac{1}{2}\rho v^2 A_f \quad (2.3)$$

F_D adalah gaya hambat (N), yakni gaya resistansi total yang melawan gerakan objek akibat aliran fluida. ρ adalah densitas fluida (kg/m^3), yang menggambarkan seberapa padat fluida tersebut. v adalah kecepatan (m/s) relatif objek terhadap fluida, dan gaya hambat meningkat secara kuadratik dengan kecepatan. Jika kecepatan dua kali lipat, gaya hambat meningkat empat kali lipat. A_f adalah luas penampang frontal objek (m^2), yaitu bagian dari objek yang terkena aliran fluida secara langsung; luas yang lebih besar menghasilkan gaya hambat yang lebih besar. Namun dalam kenyataan, gaya yang bekerja pada objek tidak hanya bergantung pada tekanan dinamik fluida, tetapi juga pada bentuk geometris objek dan sifat permukaan. Faktor ini diwakili oleh koefisien hambat (C_D), yang merupakan konstanta non-dimensi tergantung pada aliran fluida (laminar atau turbulen) dan bentuk objek. Nilai C_D bisa dihitung dengan menggunakan rumus:

$$C_D = \frac{C_{sa}\pi A_p}{A_f} \left(1 + 60 \left(\frac{d}{l} \right)^3 + 0,0025 \left(\frac{l}{d} \right) \right) \quad (2.4)$$

Dengan C_{sa} adalah konstanta yang nilainya adalah $3,397 \times 10^{-3}$, d dan l adalah diameter dan lebar dari UUV. Kemudian A_p adalah luas area planar dari UUV. Sehingga rumus akhir dari gaya hambat adalah:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 A_f C_D \quad (2.5)$$



Gambar 2.2 Ilustrasi arah gaya hambat terhadap arah gerakan UUV

Sumber: (Saad, M., Khan, R., & Ahmed, S, 2021)

Dari ilustrasi gambar tersebut bisa dilihat jika untuk dapat menggerakkan UUV maka nilai gaya dorong harus lebih besar dari nilai gaya hambat. Hubungan antara gaya dorong dan gaya hambat bisa dilihat dari hukum newton kedua, yaitu sebagai berikut:

$$F_{total} = ma \quad (2.6)$$

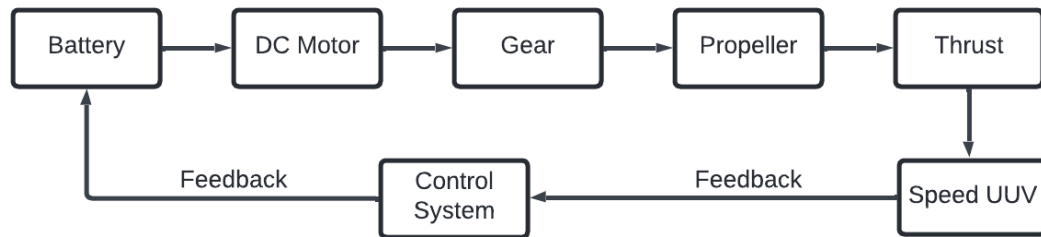
Hukum ini menyatakan bahwa percepatan (a) suatu benda (UUV) bergantung pada jumlah gaya total (F_{total}) yang bekerja padanya, serta massanya (m). Pada UUV yang bergerak lurus dalam air, gaya total adalah hasil dari gaya dorong (T) dikurangi gaya hambat (F_D):

$$F_{total} = T - F_D \quad (2.7)$$

Artinya, Ketika $T > F_D$, UUV akan mengalami peningkatan kecepatan. Sebaliknya, jika $T < F_D$ maka UUV akan melambat. Dan saat $T = F_D$ maka kecepatan UUV akan konstan.

2.1.2 Sistem propulsi Elektrik

Sistem propulsi elektrik adalah mesin penggerak yang menggunakan energi listrik sebagai sumber utama untuk menghasilkan daya dorong. Skema dari sistem propulsi elektrik diilustrasikan oleh gambar dibawah ini:



Gambar 2.3 Skema sistem propulsi elektrik

Sumber: (Aslam et al, 2022)

Pada gambar 2.3 terlihat komponen-komponen utama yang ada pada sebuah sistem propulsi, yang pertama adalah baterai yang menjadi pemasok daya utama dalam sistem ini. Besarnya daya sesaat yang dipakai digambarkan dengan persamaan berikut:

$$Power = VI \quad (2.8)$$

V adalah tegangan sesaat (voltage) yang dihasilkan pada baterai dan I adalah arus sesaat (Ampere) yang mengalir pada baterai (Aslam et al, 2022). Persamaan 2.7 menjelaskan jika semakin tinggi tegangan dan arus yang ada pada baterai akan membuat daya (watt) yang dihasilkan semakin tinggi pula (Saad, M., Khan, R., & Ahmed, S, 2021). Daya yang diteruskan kepada DC Motor akan menghasilkan kecepatan angular dan torsi yang ditunjukkan lewat persamaan berikut:

$$Power = \tau \omega \quad (2.9)$$

τ adalah torsi (Nm) dan ω adalah kecepatan angular (rad/s). Karena semakin besar daya maka semakin besar pula torsi dan kecepatan angular yang dihasilkan, Daya juga dipengaruhi oleh gaya hambat dan kecepatan UUV. Hal ini ditunjukkan oleh persamaan yaitu (Saad, M., Khan, R., & Ahmed, S, 2021) :

$$Power = F_D v \quad (2.10)$$

Dimana v adalah kecepatan dari UUV, berhubungan dengan itu kecepatan UUV juga bergantung pada putaran propeler yang dihasilkan. Putaran propeler bergantung pada rasio *gear* antara propeler dan DC Motor (Aslam et al, 2022), digambarkan lewat persamaan berikut:

$$rpm_{propeller} = rpm_{motor} \left(\frac{R_m}{R_p} \right) \quad (2.11)$$

$$rpm_{motor} = \frac{\omega}{2\pi} (60) \quad (2.12)$$

R_m dan R_p masing masing merepresentasikan ratio *gear* antara motor dan propeler, kemudian nilai dari $rpm_{propeler}$ bersama dengan nilai *pitch* propeler (p) yang mana adalah sudut kemiringan atau posisi bilah propeler yang mempengaruhi seberapa jauh propeler dapat mendorong fluida saat berputar akan mempengaruhi nilai dari kecepatan UUV lewat persamaan pada (Aslam et al, 2022) yang sebagai berikut:

$$v = \frac{rpm_{propeller}}{1852} (60p) \quad (2.13)$$

Angka 60 pada persamaan 2.12 ada untuk mengubah satuan $rpm_{propeler}$ yang dalam menit menjadi detik, p mewakili nilai *pitch* propeler dalam meter, sedangkan 1852 adalah konstanta yang digunakan untuk mengubah satuan m/s menjadi knot. Untuk mencari jarak tempuh dari sebuah UUV bisa dicari dengan menggunakan persamaan berikut:

$$S = vt \quad (2.14)$$

Dengan S adalah jarak tempuh, v adalah kecepatan UUV, dan t adalah durasi UUV bergerak. Untuk menghitung energi (konsumsi daya) yang dipakai oleh sebuah sistem propulsi selama waktu tertentu digunakan rumus berikut:

$$E = Power \times t_h \quad (2.15)$$

Dengan t_h mewakili waktu (jam) operasi yang dilakukan UUV.

2.1.3 Pemodelan

Pemodelan adalah proses menyederhanakan sistem atau fenomena nyata menjadi representasi abstrak, seperti model matematis, diagram, atau simulasi komputer, untuk memahami dan menganalisis perilakunya. Model dirancang untuk menangkap elemen-elemen penting dari sistem sambil mengabaikan detail yang tidak relevan, sehingga memungkinkan analisis, prediksi, dan evaluasi skenario secara efisien. Meskipun model tidak sepenuhnya merepresentasikan realitas, pemodelan

menjadi alat penting untuk mengeksplorasi sistem yang kompleks dengan cara yang aman dan terstruktur (Bossel, H, 2018). Pada penelitian ini pemodelan dengan pendekatan OOM akan dilakukan dengan menggunakan *OpenModelica*.

2.1.3.1 *Object Oriented Modeling*

Object-Oriented Modeling (OOM) adalah pendekatan pemodelan sistem yang berbasis pada konsep *objects* atau objek, yaitu entitas yang menggabungkan data (*attributes*) dan perilaku (*methods*) ke dalam satu kesatuan. Dalam OOM, sistem direpresentasikan sebagai kumpulan objek yang saling berinteraksi untuk mencapai tujuan tertentu (Mattsson, S. E., Andersson, M., & Åström, K. J, 2020). Pendekatan ini didasarkan pada prinsip-prinsip pemrograman berorientasi objek (*object-oriented programming*) yaitu:

- a. *Encapsulation* (Pembungkusan)
Encapsulation adalah konsep penggabungan data (*attributes*) dan fungsi atau perilaku (*methods*) ke dalam satu entitas yang disebut objek. Objek menyembunyikan detail internalnya dari dunia luar dan hanya menyediakan akses melalui antarmuka tertentu, biasanya berupa *methods* (fungsi). Prinsip ini meningkatkan modularitas dan keamanan karena data internal tidak dapat diakses atau dimodifikasi secara langsung tanpa kontrol.
- b. *Inheritance* (Pewarisan)
Inheritance memungkinkan sebuah kelas (*class*) atau tipe objek untuk mewarisi sifat dan perilaku dari kelas lain. Dengan cara ini, kita dapat mendefinisikan kelas baru berdasarkan kelas yang sudah ada tanpa harus menulis ulang semua atribut dan metode. Pewarisan memfasilitasi penggunaan ulang kode (*code reuse*) dan hierarki yang lebih terstruktur.
- c. *Polymorphism* (Polimorfisme)

Polymorphism adalah kemampuan untuk menggunakan metode yang sama pada objek-objek berbeda, tetapi dengan perilaku yang spesifik sesuai dengan objek tersebut. *Polymorphism* mendukung fleksibilitas dan ekspansi sistem tanpa mengubah logika dasar.

OOM digunakan untuk mempermudah pemahaman, desain, dan pengembangan sistem dengan membagi sistem menjadi komponen-komponen yang dapat dipahami secara modular. Setiap objek dalam model memiliki keadaan, perilaku, dan identitas unik yang memungkinkan interaksi antar objek mencerminkan perilaku sistem nyata secara lebih alami. Pendekatan ini sering digunakan dalam pengembangan perangkat lunak, simulasi, dan pemodelan sistem kompleks seperti pada bidang rekayasa, bisnis, dan teknologi (Mattsson, S. E., Andersson, M., & Åström, K. J, 2020).

2.1.3.2 Pemodelan lingkungan bawah laut

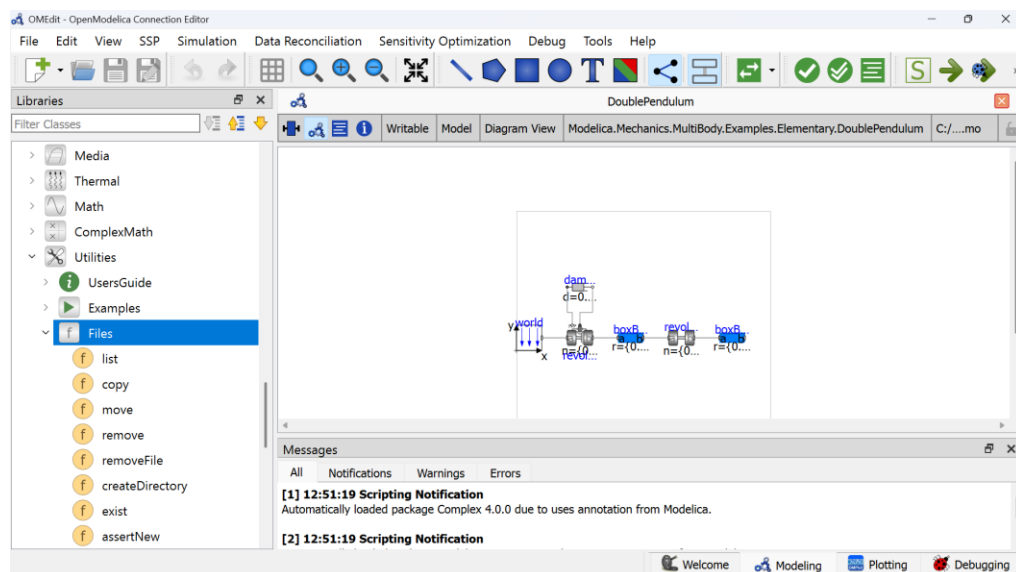
Pemodelan lingkungan bawah laut adalah proses menciptakan representasi yang akurat dari kondisi fisik yang akan dihadapi oleh UUV selama operasinya. Kondisi ini meliputi densitas fluida dan fenomena bawah air lainnya yang dapat mempengaruhi performa dan perilaku UUV. Dalam pemodelan ini, model lingkungan dirancang secara terpisah (modular) dari model dinamika UUV, sehingga memberikan fleksibilitas untuk memodelkan berbagai kondisi lingkungan tanpa mempengaruhi secara langsung dinamika atau kinerja sistem lain. Pemodelan ini juga bertujuan untuk mendukung pemahaman perilaku UUV yang penting untuk perencanaan operasi dan pengujian sistem. Selain itu, pemodelan lingkungan bawah laut diintegrasikan ke dalam platform simulasi, baik sebagai simulasi mandiri maupun dalam bentuk *hardware-in-the-loop* (HIL). Hal ini memungkinkan pengujian yang realistis terhadap kinerja UUV dalam kondisi yang menyerupai lingkungan bawah laut nyata, sehingga

mengurangi kebutuhan uji coba di laut secara langsung dan meningkatkan efisiensi pengujian (Song, F., An, P. E., & Folleco, A, 2003).

2.1.3.3 *OpenModelica*

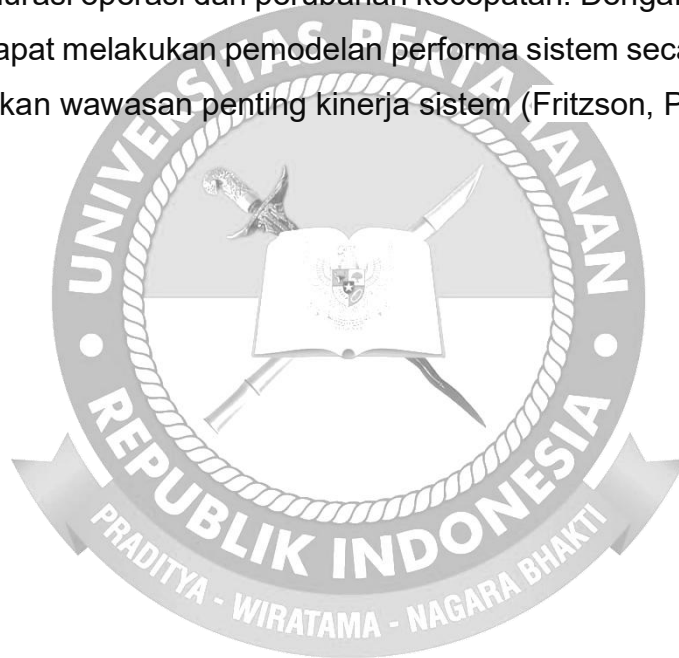
OpenModelica, adalah *platform* pemodelan berbasis bahasa Modelica berbasis *open-source* yang menggunakan pendekatan OOM, transformasi simbolik, *solver numeric*, dan integrasi antarmuka scripting untuk pemodelan, simulasi, optimasi, dan pengembangan berbasis model (Fritzson et al, 2022). *OpenModelica* memungkinkan pemodelan berbagai sistem, termasuk sistem propulsi elektrik yang akan menjadi fokus dalam penelitian ini.

Pada *OpenModelica* juga terdapat *OMEdit* (*OpenModelica* Connection Editor), yang mana adalah antarmuka grafis yang disediakan oleh *OpenModelica* untuk membantu pemodelan dan simulasi sistem. *OMEdit* memiliki berbagai *toolbox* yang memungkinkan pengguna untuk memodelkan komponen mekanik, elektrik, dan termal. Kemampuan untuk menggambar dan menghubungkan komponen secara visual memudahkan pemodelan sistem yang kompleks (Fritzson et al, 2022).



Gambar 2.4 Tampilan OMEdit saat digunakan untuk pemodelan
Sumber: (<https://OpenModelica.org>)

Dalam penelitian ini, *OpenModelica* digunakan untuk memodelkan sistem propulsi elektrik yang melibatkan interaksi antara berbagai komponen mulai dari sistem elektrik, DC Motor, Propeler, Karakteristik fisik UUV dan sistem kontrol yang digunakan untuk menganalisis kinerja sistem propulsi elektrik. Hal ini mencakup analisis perilaku sistem selama berbagai skenario durasi operasi dan perubahan kecepatan. Dengan *OpenModelica*, insinyur dapat melakukan pemodelan performa sistem secara real-time dan mendapatkan wawasan penting kinerja sistem (Fritzson, P., 2011).



2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

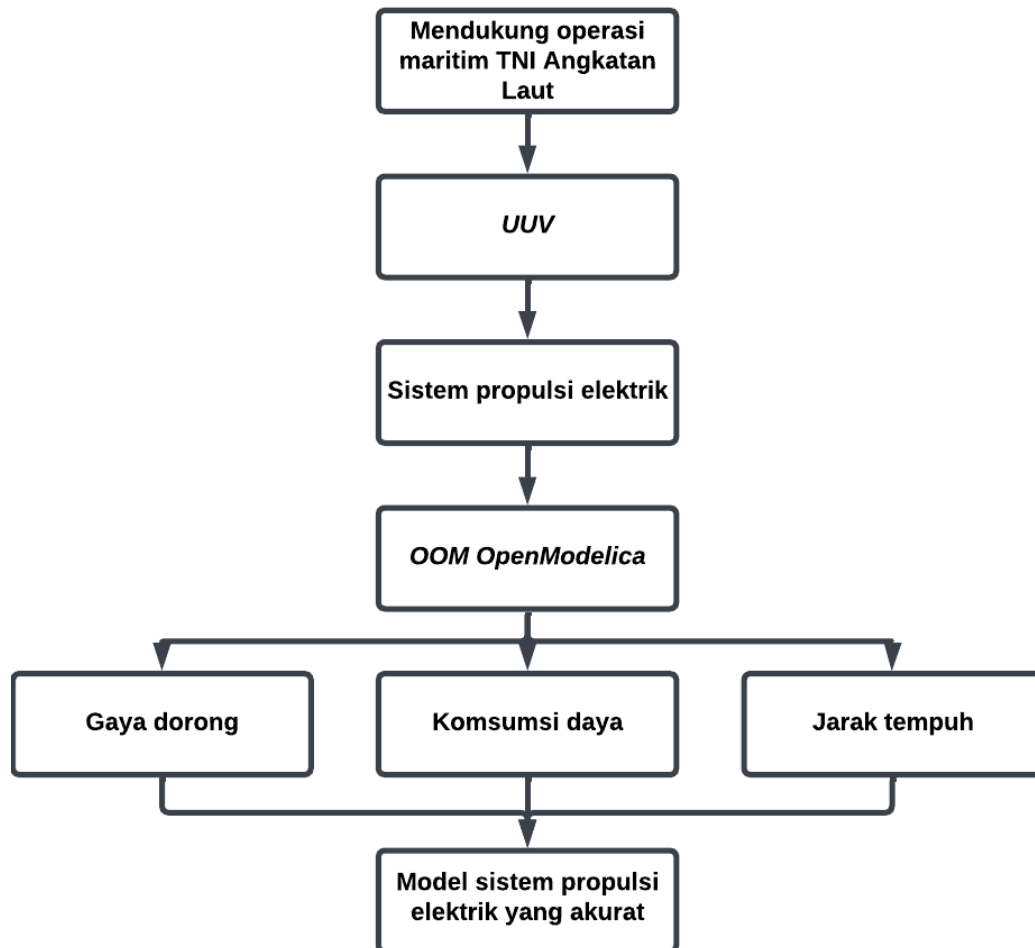
Tabel 2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

No	Penulis, Tahun	Judul	Metode	Hasil	Kelebihan	Kekurangan	Relevansi
1	Saad, M., Khan, R., & Ahmed, S, 2021	<i>Modeling and Simulation of Propulsion Train relating drag and power with operational and physical parameters of UUVs</i>	Menggunakan model matematis dan simulasi <i>MATLAB</i> . dengan sistem propulsi elektrik berbasis motor <i>BLDC</i> .	Gaya hambat meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan, panjang dan diameter memengaruhi gaya hambat, <i>efisiensi</i> motor <i>BLDC</i> tinggi	Efisiensi tinggi motor <i>BLDC</i> (90%), adaptabilitas sistem untuk desain UUV berbeda, dan baterai lithium-ion tahan kondisi bawah air.	Simplifikasi parameter, tanpa validasi fisik, ketergantungan pada simulasi <i>MATLAB</i> , dan kontrol motor <i>BLDC</i> yang relatif mahal.	Desain UUV yang digunakan pada artikel ini akan dipakai untuk penelitian ini.
2	Aslam et al, 2022	<i>Design and Simulation of Electrical Propulsion</i>	Menggunakan <i>MATLAB GUI</i> untuk menganalisis gaya	Menunjukkan hubungan kecepatan untuk gaya hambat dan	<i>EPS</i> efisien, <i>BLDC</i> memiliki torsi tinggi, serta	Hasil tanpa validasi eksperimen pendekatan	Hasil yang didapatkan menunjukkan hubungan

		<i>System of Unmanned Underwater Vehicle Using MATLAB GUI</i>	hambat, daya, kecepatan, torsi, dan parameter fisik untuk efisiensi optimal.	daya.peningkatan kecepatan memerlukan lebih banyak daya.	menyediakan <i>GUI</i> interaktif.	desain memiliki keterbatasan.	antara kecepatan dengan gaya hambat dan daya UUV.
3	Zhou et al, 2018	<i>Modeling and simulation of a distributed electric propulsion aircraft by modelica</i>	Memodelkan sistem propulsi listrik terdistribusi (<i>DEP</i>) menggunakan <i>Modelica</i> , melibatkan subsistem sumber daya, propulsi listrik, penyimpanan energi.	Model berhasil mensimulasikan misi penerbangan, menunjukkan dorongan maksimum 190 kN, efisiensi tinggi melalui pengelolaan daya.	<i>DEP</i> meningkatkan efisiensi aerodinamika, mengurangi emisi dan kebisingan, fleksibel dalam pengelolaan daya, sementara <i>Modelica</i> mempermudah pemodelan multi-domain.	Model menyederhanakan komponen dan kondisi lingkungan, serta masih menghadapi kendala teknologi penyimpanan energi seperti baterai superkonduktor.	Memberikan gambaran model sistem propulsi oleh <i>modelica</i> meskipun aplikasinya pada pesawat.

4	Song, F., An, P. E., & Folleco, A, 2003	Modeling and simulation of autonomous underwater vehicles: design and implementation	Menggunakan metode pemodelan fisika berbasis modular untuk mendeskripsikan dinamika AUV, sensor, dan lingkungan. Simulasi mencakup konfigurasi stand-alone dan hardware-in-the-loop (HIL).	Hasil simulasi memungkinkan pengujian misi secara realistis tanpa uji lapangan mahal. Pendekatan ini memberikan data respons AUV terhadap kondisi lingkungan serta meningkatkan akurasi.	Efisiensi biaya, fleksibilitas model modular, akurasi simulasi real-time dengan HIL, serta portabilitas lintas platform berbasis POSIX, mendukung pengujian perangkat lunak dan perencanaan misi.	Kompleksitas sistem HIL, keterbatasan realisme model hidrodinamika, kurangnya faktor lingkungan spesifik.	Memberikan gambaran pemodelan lingkungan penting untuk penelitian ini.
---	---	--	--	--	---	---	--

2.3 Kerangka Berfikir



Gambar 2.5 Diagram alir kerangka berfikir penelitian

Sumber: Diolah oleh peneliti

2.4 Hipotesis

- Pengaruh antara gaya dorong, jarak tempuh dan konsumsi daya terhadap variasi nilai *input* kecepatan UUV dan durasi operasi UUV dapat direpresentasikan dengan akurat di *OpenModelica*.
- Akurasi pemodelan sistem propulsi elektrik dengan *software OpenModelica* dan pendekatan OOM lebih tinggi dari pendekatan lainnya.