

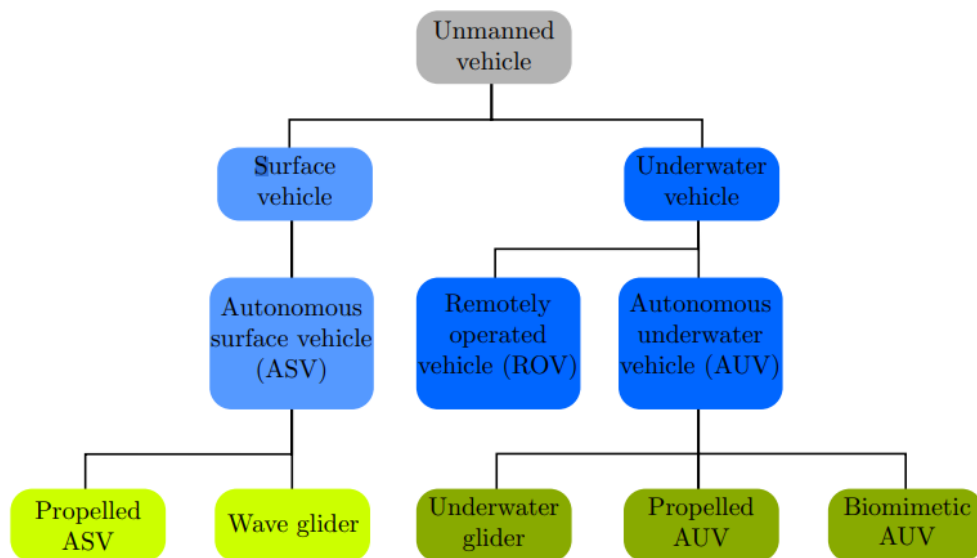
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Landasan Teori

##### 2.1.1 *Unmanned Underwater Vehicle*

*Unmanned Underwater Vehicle* (UUV) adalah semua jenis robot bawah air yang dioperasikan dengan sedikit atau tanpa intervensi dari operator manusia (Budiyono, 2009). UUV termasuk dalam kategori kendaraan tak berawak yang beroperasi di bawah permukaan laut. Berdasarkan Gambar 2.1, kendaraan tak berawak terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu *Autonomous Surface Vehicles* (ASV) yang beroperasi di permukaan air dan *Unmanned Underwater Vehicles* (UUV) yang beroperasi di bawah permukaan air (Hong et al., 2020).



**Gambar 2.1 Klasifikasi Kendaraan Bawah Air**

Sumber : González, 2015

*Remotely Operated Vehicles* (ROV) adalah robot bawah air yang dioperasikan dari jarak jauh oleh manusia dari kapal (Christ & Wernli, 2011). Ciri khas ROV yang membedakannya dari kendaraan bawah air lainnya adalah ketergantungannya pada kabel *tether* (*umbilical*), yang

menghubungkan ROV ke kapal induk. Kabel ini menyediakan daya serta transmisi kontrol dari operator ke ROV, memungkinkan operasinya hingga kedalaman 6000 meter.

Meskipun tidak otonom, suplai daya melalui kabel memungkinkan ROV untuk memiliki daya tahan operasional lebih lama (González, 2015). ROV umumnya dilengkapi dengan beberapa *thruster* hingga 8 unit untuk manuver yang presisi serta satu atau dua lengan manipulatif untuk melakukan tugas di bawah air. Bentuk ROV biasanya tidak aerodinamis dan cenderung kompak, berbentuk persegi panjang untuk menyesuaikan dengan berbagai tugas kerja di bawah air.

Untuk operasi di kedalaman yang lebih besar, ROV menggunakan sistem manajemen kabel yang disebut *Tether Management System* (TMS). Sistem ini membantu mengatur kabel *tether*, mencegah lilitan, dan mengurangi gaya yang ditimbulkan oleh gelombang laut pada kabel. Salah satu contoh ROV yang menggunakan TMS adalah "Quantum ROV" yang dikembangkan oleh perusahaan *Soil Machine Dynamics* (SMD) (Ramberg, 2023).

Berdasarkan Tabel 2.1, ROV dapat dikategorikan berdasarkan kedalaman operasi, daya (*horsepower*), dan ukuran (Patiris, 2015). Beberapa kategori utamanya meliputi:

Tabel 2.1 Kategori ROV

| Class                                               | Type                        | Power (hp) |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------|------------|
| Micro Observation<br>(<100meters)                   | Low Cost Small Electric ROV | <5         |
| Mini Observation<br>(< 300meters)                   | Mini (Small)                | <10        |
| Light/Medium Work Class<br>(<2,000 meters)          | Medium (Electro/Hyd)        | <100       |
| Observation/Light Work Class<br>(< 3,000 meters)    | High Capacity Electric      | <20        |
| Heavy Work Class /Large Pay-load<br>(<3,000 meters) | High Capacity (Electro/Hyd) | <300       |
| Observation /Data Collection<br>(>3,000 meters)     | Ultra-Deep (Electric)       | <25        |
| Heavy Work Class /Large Pay-load<br>(>3,000 meters) | Ultra-Deep (Electro/Hyd)    | <120       |

Sumber : Patiris, 2015

*Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) adalah alat robotik yang diprogram sebelumnya untuk beroperasi di lautan tanpa kendali langsung dari operator secara *real-time* (Budiyono, 2009). Pengembangan AUV dimulai sejak tahun 1950-an, diawali oleh proyek *Special Purpose Underwater Research Vehicle* (SPURV) di Universitas Washington pada tahun 1957. Sejak saat itu, banyak universitas dan institusi yang melanjutkan pengembangan AUV untuk memenuhi kebutuhan baru di berbagai bidang (Von Alt, 2003).

AUV memiliki peran penting dalam menjaga keamanan maritim, terutama melalui berbagai klasifikasi misi yang berkaitan dengan pertahanan dan pengawasan. Beberapa misi utama yang dioperasikan AUV dalam menjaga keamanan maritim meliputi *Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance* (ISR), *Anti-Submarine Warfare* (ASW), *Information Operations* (IO), dan *Time Critical Strike* (TCS) (Franzoso, 2021).

Berdasarkan klasifikasinya, AUV memiliki berbagai kategori yang didasarkan pada sistem, dimensi, dan jenis tugas yang dijalankan. Berdasarkan klasifikasi sistemnya, AUV dapat dibagi menjadi tiga kategori utama:

a. *Propelled AUV*

AUV yang menggunakan sistem pendorong konvensional (*propeller* atau *jet*) untuk bergerak di bawah air. AUV ini dirancang untuk kecepatan dan kemampuan manuver yang baik serta cocok untuk berbagai misi, termasuk survei bawah laut, pemetaan, dan eksplorasi laut dalam (Roberts & Sutton, 2006).

b. *Underwater Gliders*

AUV yang bergerak dengan memanfaatkan perubahan daya apungnya untuk naik dan turun di dalam air. Sistem ini memungkinkan mereka menempuh jarak yang jauh dengan penggunaan energi yang rendah, sehingga cocok untuk misi pengamatan jangka panjang seperti pemantauan iklim atau lingkungan laut (Roberts & Sutton, 2006).

c. *Biomimetic AUV*

AUV yang dirancang dengan meniru gerakan dan bentuk makhluk laut seperti ikan atau cumi-cumi. AUV ini memiliki efisiensi energi yang tinggi dan menghasilkan gangguan minimal terhadap ekosistem laut, menjadikannya ideal untuk misi-misi penelitian ilmiah dan eksplorasi (Marcheseandrew & Onalcagdas, 2014).

Selanjutnya untuk klasifikasi dimensinya, UUV/AUV dapat dibagi menjadi *Extra Large UUV* (XLUUV), *Large UUV* (LUUV), *Mid-Size UUV*, dan *Small-Size UUV*:

a. *Extra Large UUV* (XLUUV)

UUV yang diluncurkan dari dermaga dengan diameter lebih dari 2,13 meter, XLUUV memiliki ukuran terbesar diantara semua klasifikasi UUV (Franzoso, 2021). Dengan dimensi yang besar, XLUUV mampu membawa berbagai peralatan dan muatan yang

berat serta kompleks. UUV jenis ini biasanya digunakan untuk misi yang membutuhkan durasi operasi panjang, jangkauan luas, dan kemampuan membawa sensor atau muatan tambahan yang signifikan. Contoh misi untuk XLUUV termasuk operasi pengawasan dan pengintaian, penyebaran dan pemulihan sensor, serta misi logistik bawah laut. Salah satu contoh XLUUV adalah Echo Voyager yang dikembangkan oleh Boeing, dengan panjang keseluruhan mencapai sekitar 26 meter, dirancang untuk operasi otonom jarak jauh dan membawa muatan besar (Boeing, 2023).



**Gambar 2.2 XLUUV Boeing Echo Voyager**

Sumber : Boeing, 2023

b. *Large UUV (LUUV)*

LUUV merupakan UUV dengan ukuran besar namun lebih kecil dibandingkan XLUUV, dengan diameter antara 0,53 meter hingga 2,13 meter (Franzoso, 2021). LUUV biasanya digunakan untuk misi yang memerlukan daya tahan lama dan jangkauan luas dengan muatan lebih ringan dibandingkan XLUUV. LUUV sering digunakan dalam operasi militer, termasuk pengintaian, pemetaan dasar laut, dan deteksi ranjau bawah laut. Fleksibilitas

dalam membawa berbagai jenis sensor dan peralatan membuat LUUV sangat berguna dalam berbagai operasi bawah laut. Salah satu contohnya, LUUV yang dikembangkan oleh Ukraina Unmanned Torpedo, seperti TLK-1000 yang memiliki panjang sekitar 4-12 meter, menunjukkan bagaimana desain LUUV dapat disesuaikan untuk misi dengan kebutuhan jangkauan yang luas dan volume muatan yang besar, tanpa mengorbankan kelincahan dan efisiensi operasionalnya (Kushnikov, 2025).



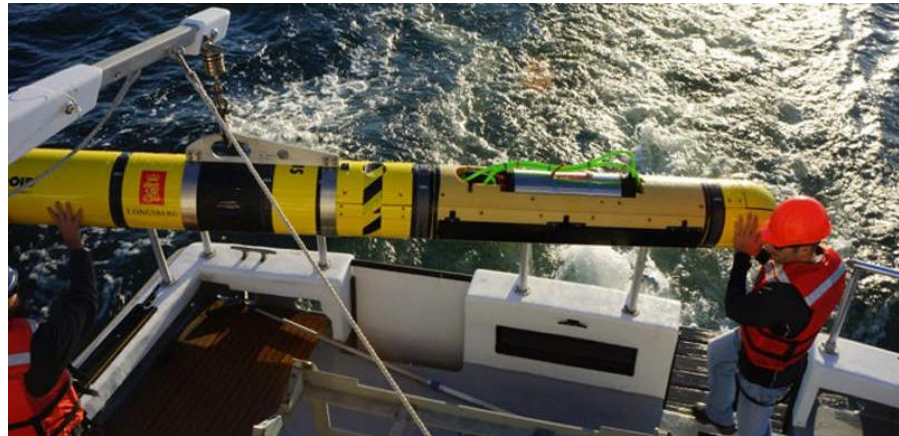
**Gambar 2.3 Ukrainian *Unmanned Torpedo***

Sumber : Kushnikov, 2025

c. *Mid-Size UUV*

*Mid-Size UUV* merupakan UUV dengan ukuran sedang yang menawarkan keseimbangan antara kapasitas muatan dan mobilitas, dengan diameter antara 25 cm hingga 53 cm (Franzoso, 2021). UUV ini sering digunakan dalam operasi yang membutuhkan mobilitas tinggi untuk misi seperti survei lingkungan laut, inspeksi struktur bawah air, dan pengumpulan data ilmiah. Contoh dari kategori ini adalah REMUS 600, yang memiliki panjang antara 2,7 hingga 5,5 meter, tergantung pada konfigurasi muatan dan kebutuhan misi. REMUS 600 dirancang

untuk fleksibilitas tinggi dengan kemampuan operasi hingga kedalaman 600 meter dan waktu jelajah lebih dari 24 jam (Stokey et al., 2005).

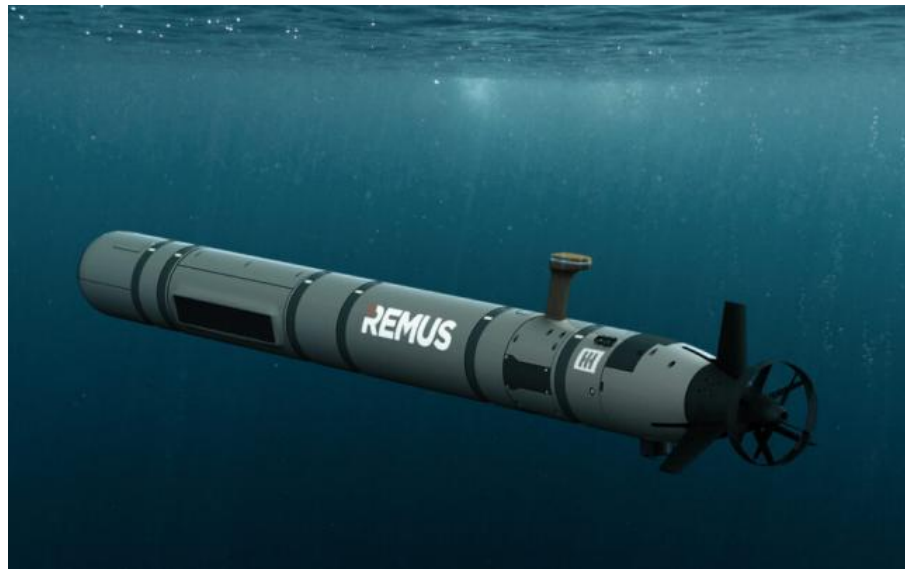


**Gambar 2.4 AUV Remus 600**

Sumber : Kraken Robotics, 2018

d. *Small-Size UUV*

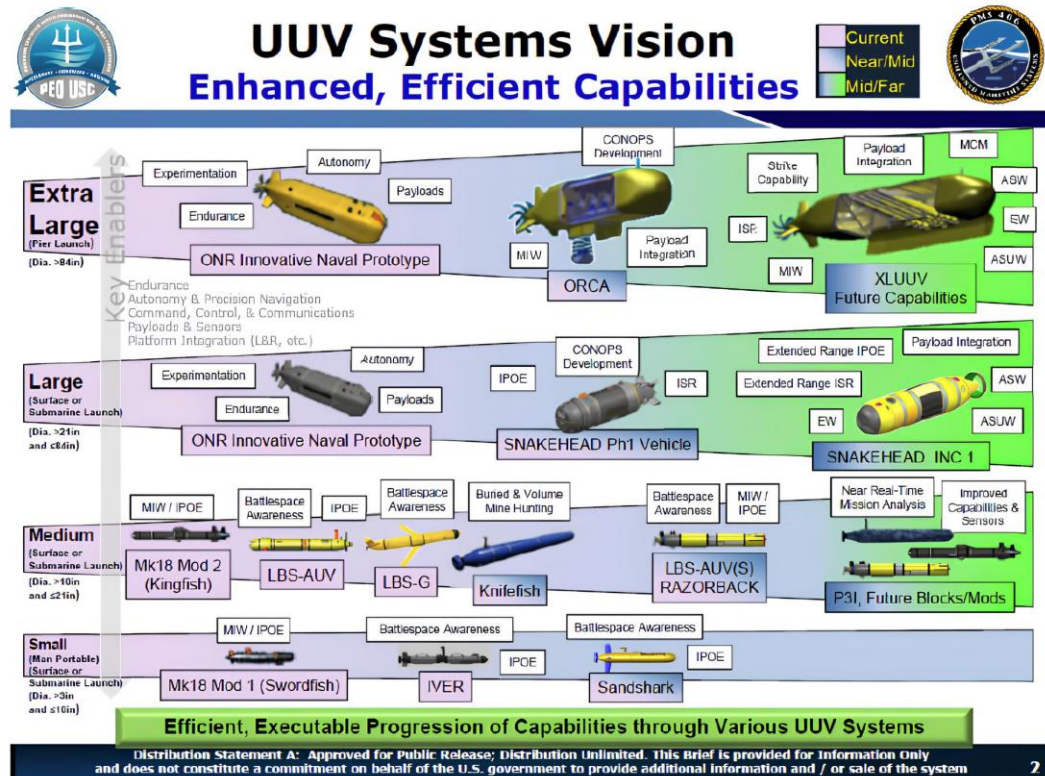
*Small-Size UUV* memiliki ukuran paling kecil, dengan diameter kurang dari 25 cm, yang biasanya digunakan untuk misi yang membutuhkan ketepatan dan kemampuan manuver tinggi (Franzoso, 2021). *Small-Size UUV* sering digunakan di daerah yang sempit atau sulit dijangkau oleh UUV yang lebih besar, dan biasanya dioperasikan dalam misi inspeksi kapal, pemantauan lingkungan lokal, dan tugas-tugas pemeliharaan bawah air. Salah satu contoh umum dari kategori ini adalah REMUS 100, dengan diameter sekitar 19 cm dan panjang total sekitar 1,7 meter, yang dirancang untuk operasi cepat dan ringan dengan durasi misi beberapa jam serta kedalaman operasi hingga 100 meter (Stokey et al., 2005).



**Gambar 2.5 AUV Remus 100**

Sumber : NATO Photo By WO FRAN C.Valverde, 2022

Klasifikasi tersebut membantu dalam menentukan jenis UUV/AUV yang tepat untuk digunakan berdasarkan kebutuhan dan persyaratan misi yang spesifik. Dengan adanya berbagai ukuran dan jenis UUV/AUV seperti Gambar 2.6, setiap misi bawah laut dapat dilaksanakan dengan efisiensi dan efektivitas optimal.



**Gambar 2.6 Program AUV Angkatan Laut AS**

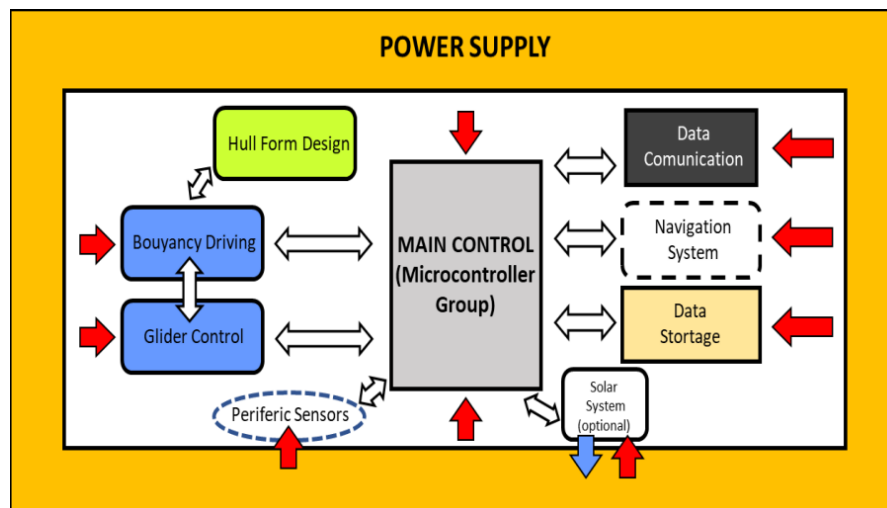
Sumber : Unmanned Maritime Systems Update, 2019

### 2.1.2 Hybrid Autonomous Underwater Vehicle - Torpedo

Torpedo merupakan senjata bawah air yang dirancang untuk menyerang kapal permukaan maupun kapal selam. Dilengkapi dengan sistem propulsi, kendali, dan peledak, torpedo mampu melaju cepat menuju target dengan akurasi tinggi. Beberapa contoh torpedo modern seperti MK 17, MK 23, dan MK 48 memiliki panjang lebih dari 5 meter, tergantung pada kelas dan kapasitas muatannya (Jolie, 1978). Torpedo kelas berat (*heavyweight torpedo*) seperti MK 48, yang umum digunakan oleh kapal selam, memiliki panjang sekitar 5,8 meter, daya ledak besar, serta dilengkapi dengan sistem pencarian target menggunakan sonar aktif/pasif dan pemrosesan sinyal otomatis.

Seiring dengan berkembangnya teknologi bawah laut, muncul inovasi baru berupa *Hybrid Autonomous Underwater Vehicle - Torpedo*, yakni penggabungan antara fungsi observasi dari *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) dengan kemampuan serang dari torpedo. Jika AUV konvensional hanya digunakan untuk pemetaan, pengintaian, dan pengumpulan data, maka *Hybrid AUV-Torpedo* juga mampu melakukan misi penyerangan. Dalam mode serangan, kendaraan ini akan melaju menuju target yang telah terdeteksi dan melakukan peledakan, menjadikannya sistem multifungsi yang efektif dalam operasi maritim modern (Navy, 2004).

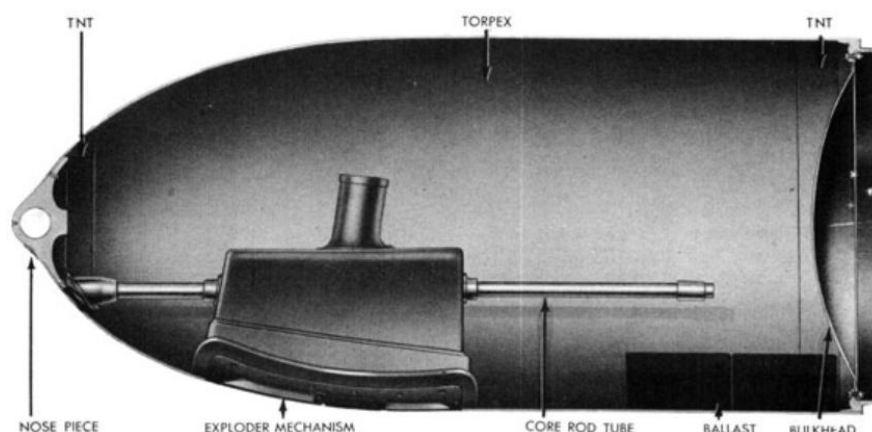
Ketika *Hybrid AUV-Torpedo* berada dalam mode observasi dan pemetaan, sensor seperti sonar, kamera bawah laut, dan sensor akustik yang mampu mendeteksi gerakan serta objek di bawah air akan diaktifkan. Sistem ini memungkinkan *Hybrid AUV-Torpedo* untuk melakukan pengumpulan data dan pengawasan maritim secara mandiri, tanpa memerlukan intervensi manusia. Selain itu, berdasarkan Gambar 2.7, sistem navigasi otomatis berbasis GPS atau *Inertial Navigation System* (INS) memastikan *Hybrid AUV-Torpedo* dapat beroperasi dalam area yang luas dan mengirimkan data secara *real-time* ke pusat kontrol (Sánchez et al., 2020). Hal ini meningkatkan efektivitas misi dan mengurangi risiko human *error* selama operasi di bawah air.



**Gambar 2.7 Diagram Blok Unit Kontrol AUV**

Sumber : Vilwock & Kersten, 2006

Ketika *Hybrid AUV-Torpedo* beralih ke mode serangan, sistem propulsi dan navigasi otomatis akan menyesuaikan untuk mengejar target secara cepat dan akurat, seperti layaknya torpedo. *Hybrid AUV-Torpedo* yang dilengkapi dengan *warhead section* membawa bahan peledak tinggi seperti *Trinitrotoluene* (TNT) atau Torpex, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 (Zhao et al., 2020). Bahan peledak ini ditempatkan dalam wadah khusus yang dirancang untuk memastikan stabilitas selama perjalanan menuju target. Pada saat kontak atau mencapai jarak tertentu dari target, sistem detonasi akan diaktifkan dan memicu ledakan yang dapat menghancurkan target dengan gelombang ledakan yang kuat.



**Gambar 2.8 Warhead MK 16**

Sumber : Ordnance, 1945

*Hybrid AUV-Torpedo* memerlukan struktur yang kuat, modular, dan aerodinamis untuk memenuhi kebutuhan fungsi tersebut. Struktur ini terdiri dari beberapa komponen utama yang mendukung fungsinya sebagai alat observasi sekaligus sebagai torpedo untuk misi penyerangan. Salah satu komponen penting adalah sistem propulsi, yang menggunakan *propeller* untuk menghasilkan dorongan saat kendaraan bergerak di bawah air. *Propeller* ini dirancang agar efisien dalam dua mode operasi: mode pengawasan, yang membutuhkan pergerakan lambat dan stabil, serta mode serangan, yang memerlukan kecepatan tinggi. Untuk lebih meningkatkan efisiensi energi, *propeller* ini juga dilengkapi dengan *duct*, yang berfungsi mengoptimalkan aliran air di sekitarnya, sehingga mengurangi hambatan dinamis (Thompson et al., 2012; Suji, 2021).

Komponen lain yang tidak kalah penting adalah *rudder*, yang berfungsi dalam mengendalikan arah pergerakan kendaraan. *Rudder* ini memastikan navigasi dan manuver yang akurat, baik saat menjalankan misi pengawasan maupun ketika mengejar target dalam mode torpedo (Xia et al., 2022). Semua komponen tersebut terintegrasi dengan *hull* atau lambung, yang dirancang dengan bentuk hidrodinamis guna meminimalkan *drag* atau hambatan air (Alkan, 2020). *Hull* ini terbuat dari material yang kuat namun ringan, untuk memastikan ketahanannya terhadap tekanan bawah air, serta dirancang secara modular agar memungkinkan integrasi berbagai komponen yang diperlukan untuk fungsi pengawasan dan serangan.

### 2.1.3 Prinsip Dasar Desain Lambung

Desain lambung *Hybrid AUV-Torpedo* merupakan aspek penting yang mempengaruhi performa hidrodinamis, khususnya dalam mengoptimalkan operasi multifungsi sebagai alat pengawasan dan torpedo. Prinsip utama dalam desain lambung melibatkan pengurangan gaya hambatan (*drag*) dan memastikan *Hybrid AUV-Torpedo* mampu bergerak dengan daya yang cukup efektif. Pemahaman mengenai faktor-

faktor ini akan mendukung performa efisien, baik dalam kecepatan maupun stabilitas, serta meminimalkan konsumsi energi.

Geometri lambung *Hybrid AUV-Torpedo* terbagi menjadi empat bagian utama: *Nose*, *Mid*, *Transition* dan *Tail*. Bagian *nose*, sebagai ujung depan *Hybrid AUV-Torpedo*, dirancang dengan bentuk *parabolic* dan aerodinamis untuk mengurangi gaya hambatan (*drag*) saat bergerak melalui air (Saghafi & Lavimi, 2020). Pengoptimalan bentuk *nose* sangat penting karena bagian ini yang pertama kali berinteraksi dengan aliran fluida. Pada bagian *nose*, aliran fluida akan cenderung tetap laminar, di mana lapisan-lapisan fluida bergerak secara paralel dan tidak terganggu, menghasilkan *drag* yang lebih rendah. Aliran laminar terjadi pada *Reynolds number* (*Re*) yang lebih rendah, umumnya antara 0 hingga 2.300 (Abraham et al., 2011). Dalam rentang ini, aliran fluida relatif stabil dan teratur. Desain *nose* yang halus dan aerodinamis akan menghindari gangguan awal pada aliran, yang bisa menyebabkan transisi prematur menuju aliran turbulen. Jika desain *nose* tidak memadai, gangguan pada aliran fluida bisa menyebabkan terjadinya transisi yang lebih cepat, memperbesar *drag*, dan mengurangi efisiensi gerak kendaraan. Bentuk *nose* mengikuti Persamaan 2.1, dengan radius pada titik tertentu sepanjang sumbu-X ditentukan sebagai fungsi dari koefisien *nose*  $c_1$  dan  $c_2$  (Alkan, 2020).

$$r_n(x) = c_1\sqrt{x} + \frac{x}{16}c_1(5x^3 - 21x^2 + 53x - 35) + c_2\frac{1}{6}x(x-1)^3 + 1 - (x-1)^4 \quad (2.1)$$

Bagian *mid* dan *tail* lambung *Hybrid AUV-Torpedo* memiliki peran yang saling mendukung dalam menjaga efisiensi dan stabilitas hidrodinamis saat bergerak di dalam air. Bagian *mid* berfungsi sebagai kompartemen utama yang menampung sistem dan peralatan penting, termasuk sensor, baterai, perangkat kontrol, dan bahan peledak, sehingga bentuknya dibuat silindris untuk memastikan kestabilan aliran di sepanjang tubuh kendaraan. Pada bagian *mid*, aliran fluida masih akan cenderung tetap laminar jika kecepatan kendaraan rendah atau viskositas air tinggi,

tetapi seiring dengan adanya gangguan dan peningkatan kecepatan, aliran ini bisa memasuki fase transisi menuju aliran turbulen jika perubahan bentuk antara *mid* dan *tail* tidak dirancang dengan hati-hati. Transisi ini terjadi pada *Reynolds number* antara 2.300 hingga 4.000, dimana aliran mulai mengalami gangguan kecil dan mulai bertransformasi dari laminar menjadi lebih acak dan tidak teratur (Abraham et al., 2011).

Bagian *tail* dirancang dengan bentuk meruncing untuk mengurangi turbulensi atau *wake* di belakang kendaraan, yang jika berlebihan dapat menyebabkan penurunan kecepatan dan kestabilan (Saghafi & Lavimi, 2020). Desain *tail* yang optimal bertujuan untuk menghindari pembentukan aliran turbulen yang berlebihan pada bagian belakang, yang bisa meningkatkan *drag* dan merusak stabilitas gerak. Aliran turbulen terjadi pada *Reynolds number* di atas 4.000, dimana fluida bergerak dengan pola acak dan menyebabkan peningkatan gaya hambat yang signifikan (Abraham et al., 2011). Aliran turbulen pada bagian *tail* ini sangat mempengaruhi gaya *drag* yang dihadapi kendaraan dan bisa mengurangi efisiensi operasional secara keseluruhan.

Bagian *mid* dan *tail Hybrid AUV-Torpedo* dibentuk berdasarkan Persamaan 2.2 dan Persamaan 2.3, yang memberikan fleksibilitas dalam proses optimasi desain lambung *Hybrid AUV-Torpedo* (Alkan, 2020). Bagian *mid* lambung mengikuti Persamaan 2.2:

$$r_m(x) = d \quad (2.2)$$

Sementara itu, bagian *tail* mengikuti Persamaan 2.3:

$$r_t(x) = d - x \left( \frac{d}{l_t} \right) \quad (2.3)$$

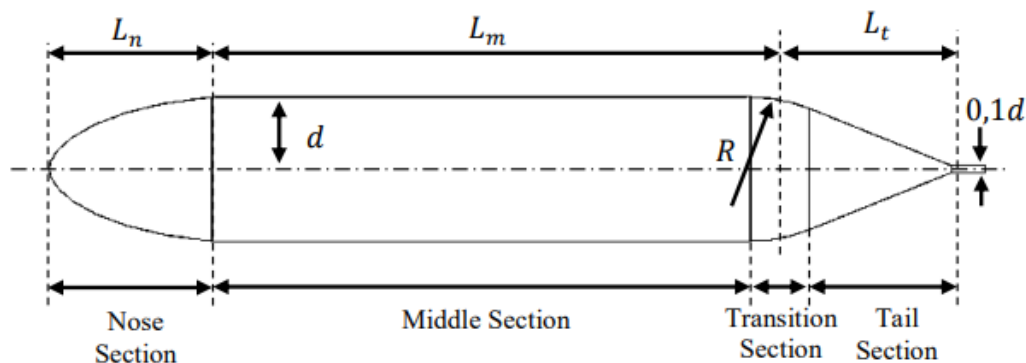
Pada persamaan di atas,  $r_m(x)$  adalah radius pada bagian *mid*;  $r_t(x)$  adalah radius pada bagian *tail*;  $d$  adalah diameter maksimum lambung dan  $l_t$  adalah panjang dari bagian *tail* (Alkan, 2020).

Untuk mengamati kelancaran kurva antara bagian *mid* dan *tail*, digunakan radius sudut ( $R$ ) yang didefinisikan sebagai fungsi dari panjang

*tail* dan koefisien berbobot  $c_3$  (Alkan, 2020). Radius sudut tersebut menghubungkan bagian *mid* dan *tail*, serta berfungsi memastikan perubahan bentuk yang halus dari diameter yang lebih besar di bagian tengah ke diameter yang lebih kecil di bagian *tail*. Bagian ini dirancang agar aliran fluida dapat melewati lambung tanpa gangguan yang signifikan. Tanpa transisi yang optimal, gangguan aliran yang timbul dapat meningkatkan gaya hambatan dan mengganggu stabilitas gerak, yang pada akhirnya menghambat efisiensi hidrodinamis dari *Hybrid AUV-Torpedo*. Sudut transisi ini ditentukan dari Persamaan 2.4:

$$R = c_3 l_t \quad (2.4)$$

Sehingga, berdasarkan Persamaan 2.4, tata letak lambung yang simetris terhadap sumbu dan parameter geometris dari *Hybrid AUV-Torpedo* dapat diilustrasikan dalam Gambar 2.9.

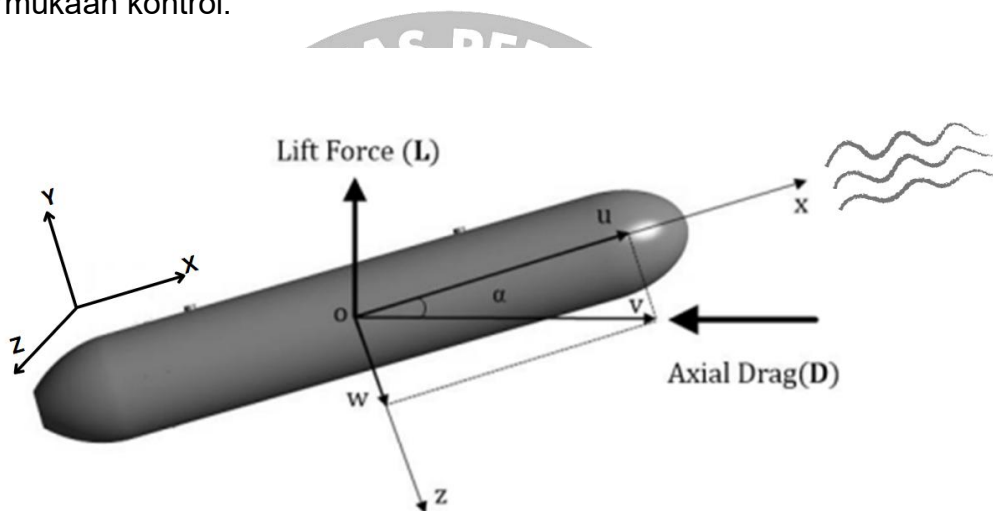


**Gambar 2.9 Parameterisasi Geometri Lambung**

Sumber : Alkan, 2020

Lambung *Hybrid AUV-Torpedo* dengan geometri tertentu memerlukan analisis terhadap *drag*. Gaya hambat (*drag*) adalah gaya yang muncul akibat resistensi terhadap aliran udara atau air saat bergerak melintasi permukaan objek (Hoerner, 1965). Pada *Hybrid AUV-Torpedo*, *drag* merupakan hambatan yang dihadapi ketika bergerak di dalam air. Saat air berinteraksi dengan lambung *Hybrid AUV-Torpedo*, gesekan yang dihasilkan dapat mengurangi performa hidrodinamisnya.

*Drag* terbagi menjadi dua jenis utama (Hoerner, 1965). *Drag parasite* yang dihasilkan dari interaksi antara permukaan objek dan fluida, yang mencakup *friction drag* (gesekan fluida dengan permukaan benda) dan *form drag* (hambatan akibat perbedaan tekanan di bagian depan dan belakang objek). Jenis *drag* lainnya adalah *induced drag*, yang terjadi akibat pembangkitan gaya *lift* pada benda yang memiliki sayap atau permukaan kontrol.



**Gambar 2.10 Gaya Hambat dan Gaya Angkat pada Bidang x-z yang Bekerja pada Lambung AUV**

Sumber : Javanmard et al., 2020

Dari Gambar 2.10, dapat dilihat bahwa gaya hambat (*drag*) yang bekerja pada lambung *Hybrid AUV-Torpedo* berada pada bidang x-z dan bekerja sejajar dengan aliran fluida. Gaya hambat ini dapat diuraikan menggunakan Persamaan 2.5 (Javanmard et al., 2020):

$$X = L \sin(\alpha) - D \cos(\alpha) \quad (2.5)$$

Dengan  $D$  sebagai gaya hambat (*drag*) dan  $\alpha$  sebagai sudut serang (*angle of attack*). Jika sudut serang kecil, dapat dibuat beberapa asumsi untuk menyederhanakan persamaannya, dengan (Javanmard et al., 2020):

$$\sin \alpha \approx \tan \alpha = \alpha = \frac{w}{u} \quad (2.6)$$

$$\cos \alpha \approx 1 - \frac{\alpha^2}{2} \quad (2.7)$$

Sehingga, persamaan  $X$  menjadi :

$$X = L\alpha - D \left(1 - \frac{\alpha^2}{2}\right) \quad (2.8)$$

Gaya *drag* dihitung berdasarkan karakteristik aliran fluida dan geometri lambung *Hybrid AUV-Torpedo*. Perumusan dasar untuk *drag* dan *lift* adalah (Hoerner, 1965 dan 1985):

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D A_f V^2 \quad (2.9)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho C_L A_f V^2 \quad (2.10)$$

Dimana  $\rho$  dan  $V$  adalah densitas dan kecepatan fluida,  $A_f$  adalah luas frontal dari lambung *Hybrid AUV-Torpedo*,  $C_D$  dan  $C_L$  adalah koefisien *drag* dan *lift*.

Kemudian, dengan menuliskan vektor kecepatan masing-masing komponen dalam bidang x-z,  $V^2 = u^2 + w^2$ . Maka dengan mengkombinasikan Persamaan 2.5 sampai Persamaan 2.10, maka gaya  $X$  dapat dirumuskan sebagai (Javanmard et al., 2020):

$$\begin{aligned} X &= L\alpha - D \left(1 - \frac{\alpha^2}{2}\right) \\ &= \frac{1}{2} \rho C_L A_f (u^2 + w^2) \alpha^2 - \frac{1}{2} \rho C_D A_f (u^2 + w^2) \left(1 - \frac{\alpha^2}{2}\right) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Dengan memanfaatkan nilai performa hidrodinamis dari lambung *Hybrid AUV-Torpedo*, gaya hambat total (*drag*) dapat digunakan sebagai dasar untuk menganalisis daya efektif yang dibutuhkan selama operasi. *Effective Horsepower* (EHP) didefinisikan sebagai daya yang diperlukan untuk mengatasi total gaya hambat ketika *Hybrid AUV-Torpedo* bergerak melalui air. EHP dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.12 (Franzoso, 2021):

$$EHP = \frac{D \times V}{735,5} \quad (2.12)$$

Dimana  $D$  sebagai total gaya hambat,  $V$  sebagai kecepatan kendaraan dan faktor 735,5 digunakan untuk mengonversi satuan daya dalam *horsepower*.

EHP memainkan peran penting dalam menentukan kebutuhan energi selama operasi. Penurunan *drag* secara langsung akan mengurangi nilai EHP, yang berdampak positif pada efisiensi konsumsi energi serta meningkatkan ketahanan operasional *Hybrid AUV-Torpedo*. Oleh karena itu, optimalisasi desain lambung yang mampu meminimalkan *drag* akan mendukung performa yang lebih efisien dan berkelanjutan.

#### 2.1.4 *Computational Fluid Dynamics (CFD)*

*Computational Fluid Dynamics (CFD)* adalah teknik yang digunakan untuk mempelajari aliran fluida, perpindahan panas, serta fenomena terkait lainnya seperti reaksi kimia melalui simulasi berbasis komputer (Veersteeg, 2007). CFD melibatkan simulasi perilaku fluida berdasarkan persamaan matematika yang berasal dari prinsip dasar mekanika dan termodinamika. Teknik ini banyak digunakan di berbagai industri, termasuk kedirgantaraan, otomotif, dan produksi energi. Penggunaan CFD memungkinkan untuk menangani berbagai jenis aliran fluida, mulai dari aliran laminar hingga turbulen, sehingga sangat penting untuk merancang sistem yang efisien dan mengoptimalkan proses.

Dalam CFD, persamaan *Navier-Stokes* yang mengatur perilaku fluida diselesaikan secara numerik untuk mendapatkan distribusi kecepatan, tekanan, dan parameter lain yang relevan. Persamaan *Navier-Stokes* merupakan sistem persamaan yang menjelaskan perilaku aliran fluida (baik cair maupun gas) berdasarkan hukum kekekalan massa (massa tidak dapat diciptakan atau dihancurkan), kekekalan momentum (Hukum Kedua Newton), dan kekekalan energi (Hukum Pertama Termodinamika) (Bartolomeu, 2016). Persamaan ini sangat penting dalam mekanika fluida karena memungkinkan perhitungan distribusi kecepatan, tekanan, suhu, dan variabel lainnya dalam aliran fluida.

Hukum kekekalan massa atau persamaan kontinuitas dapat dijelaskan sebagai aliran dengan massa melalui permukaan yang

mengelilingi volume harus sama dengan laju perubahan massa di dalam volume kontrol. Bentuk diferensial dari persamaan kontinuitas (dalam bentuk vektor) diberikan oleh Persamaan 2.13:

$$\frac{D\rho}{dt} + \rho \cdot (\nabla \cdot \mathbf{q}) = 0 \quad (2.13)$$

Dimana  $t$  adalah waktu,  $\mathbf{q}$  adalah vektor kecepatan fluida ( $u, v, w$ ), dan  $\frac{D}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{q} \cdot \nabla$  adalah *material derivative* yang merepresentasikan laju perubahan yang mengikuti partikel fluida (Katz, 2001).

Persamaan kekekalan momentum yang direpresentasikan pada Persamaan 2.14, menyatakan bahwa gaya yang bekerja pada suatu sistem harus sama dengan laju perubahan momentum sistem.

$$\rho \frac{Dq_i}{Dt} = \rho f_i + \frac{\delta \tau_{ij}}{\delta x_j} \quad (2.14)$$

Dimana  $f_i$  adalah komponen gaya massa per satuan massa per detik pada arah  $i$ ,  $\tau_{ij}$  adalah komponen tegangan, dan  $i, j = (1, 2, 3)$ , yaitu matriks 3x3 komponen tegangan. Dengan mengasumsikan fluida *Newtonian* (dimana komponen tegangan berbanding lurus dengan turunan), hubungan antara medan kecepatan dan komponen tegangan dapat dibuat menjadi (Katz, 2001):

$$\tau_{ij} = \left( -p - \frac{2}{3} \mu \frac{\delta q_k}{\delta x_k} \right) \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\delta q_i}{\delta x_j} + \frac{\delta q_j}{\delta x_i} \right) \quad (2.15)$$

Dimana  $\rho$  adalah koefisien viskositas,  $\delta_{ij}$  adalah fungsi *delta Kronecker*,  $p$  adalah tekanan, dan  $k$  adalah variabel *dummy* yang dijumlahkan dari 1 hingga 3. Dengan menggantikan komponen tegangan dari Persamaan 2.15 ke dalam Persamaan 2.14, persamaan *Navier-Stokes* dapat diperoleh.

$$\rho \left( \frac{\delta q_i}{\delta t} + \mathbf{q} \cdot \nabla q_i \right) = \rho f_i - \frac{\delta}{\delta x_i} \left( p + \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \mathbf{q} \right) + \frac{\delta}{\delta x_j} \mu \left( \frac{\delta q_i}{\delta x_j} + \frac{\delta q_j}{\delta x_i} \right) \quad (2.16)$$

Selanjutnya, untuk melengkapi sistem persamaan *Navier-Stokes*, digunakan persamaan kekekalan energi yang merepresentasikan Hukum Pertama Termodinamika. Hukum ini menyatakan bahwa jumlah kerja dan

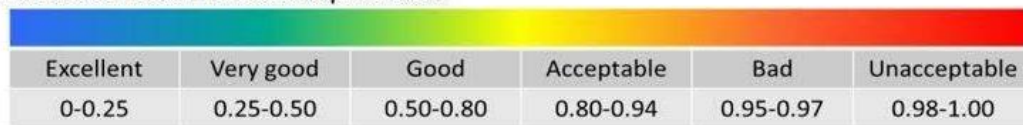
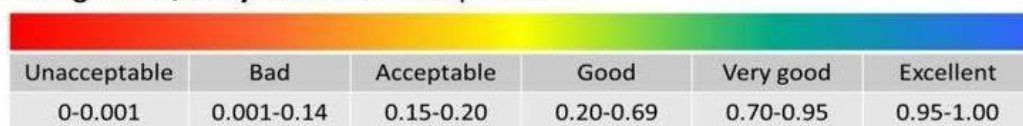
panas yang diberikan kepada sistem akan sama dengan perubahan energi internal sistem tersebut (Bartolomeu, 2016). Dengan demikian, persamaan kekekalan energi dapat dirumuskan dengan Persamaan 2.17.

$$\frac{D\rho(e+\frac{1}{2}V^2)}{Dt} = \nabla \cdot (K\nabla T) - \text{div}w \quad (2.17)$$

Dimana  $K$  adalah koefisien konduktivitas termal,  $e$  adalah energi internal per satuan massa,  $T$  adalah gradien suhu,  $w$  adalah vektor kerja yang terkait dengan setiap volume kontrol, dan  $-\text{div}w = W$  adalah kerja yang dilakukan pada sistem (Brandão, 2015).

Setelah memahami konsep dasar CFD, penting untuk memahami langkah-langkah dalam mengoperasikan teknik ini (Versteeg, 2007). Langkah pertama adalah memformulasikan model masalah secara matematis untuk menentukan perilaku fluida yang akan disimulasikan. Kemudian dilakukan pembuatan *domain* fluida yang merepresentasikan ruang fisik tempat aliran terjadi. Dalam tahap ini, digunakan juga *body of influence* sebagai daerah yang memungkinkan pengaturan lokal kerapatan *mesh* di sekitar objek utama, seperti permukaan lambung kendaraan bawah air, untuk meningkatkan akurasi simulasi di area-area penting (Robert et al., 2025).

Setelah domain selesai dibuat, proses dilanjutkan ke *mesh generation*, yaitu pembagian domain menjadi elemen-elemen kecil yang memungkinkan representasi numerik dari variabel seperti kecepatan, tekanan, dan suhu. Kualitas *mesh* menjadi aspek krusial dalam simulasi CFD karena dapat mempengaruhi akurasi dan stabilitas numerik. Dua parameter penting dalam menilai kualitas *mesh* adalah *skewness* dan *orthogonal quality* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11 (Fatchurrohman & Chia, 2017).

**Skewness mesh metrics spectrum****Orthogonal Quality mesh metrics spectrum**

**Gambar 2.11 Spektrum Metrik Mesh Skewness dan Orthogonal Quality**

Sumber : Fatchurrohman & Chia, 2017

Pada spektrum *skewness*, semakin rendah nilai *skewness* (0-0.25, ditunjukkan dengan warna biru), semakin baik kualitas *mesh*, menghasilkan elemen yang lebih teratur dan lebih akurat untuk simulasi. Sementara itu, pada spektrum *orthogonal quality*, semakin tinggi nilai (0.95-1.00, ditunjukkan dengan warna hijau terang), semakin baik kualitas *mesh*, yang menghasilkan simulasi yang lebih stabil dan akurat. Kualitas *mesh* yang buruk (dengan nilai *skewness* lebih tinggi dan nilai *orthogonal quality* rendah) dapat mengganggu hasil simulasi, meningkatkan kesalahan numerik, dan menurunkan akurasi model.

Setelah kualitas *mesh* dipastikan, langkah berikutnya adalah penerapan kondisi batas (*boundary conditions*) untuk mencerminkan interaksi fluida dengan lingkungannya, seperti karakteristik fluida masuk dan keluar domain serta interaksi dengan dinding padat. Kemudian, persamaan diferensial yang telah diturunkan, seperti Navier-Stokes dan hukum kekekalan lainnya, didiskritisasi menjadi sistem persamaan aljabar menggunakan metode numerik yang sesuai. Sistem persamaan ini kemudian diselesaikan oleh komputer untuk menghasilkan solusi numerik pada setiap titik *mesh*.

Tahap akhir adalah *post-processing*, yaitu analisis dan interpretasi hasil simulasi. Pada tahap ini dilakukan visualisasi distribusi tekanan, medan

kecepatan, dan parameter fluida lainnya yang memungkinkan pengguna memahami pola aliran dan mengambil keputusan desain atau optimasi yang diperlukan berdasarkan hasil simulasi.

#### **2.1.5 Response Surface Methodology (RSM)**

*Response Surface Methodology* (RSM) adalah pendekatan yang terkenal untuk membangun model perkiraan berdasarkan eksperimen fisik, eksperimen komputer (Box et al., 1978), dan eksperimen pengamatan. RSM menggunakan metode pendekatan statistik yang digunakan untuk memodelkan dan menganalisis masalah dimana respons *output* dipengaruhi oleh beberapa variabel *input*. Tujuan utama RSM adalah mengoptimalkan respons tersebut dengan merumuskan hubungan antara variabel-variabel *input* dan *output* dalam bentuk persamaan matematik yang dikenal sebagai permukaan respons (Lamidi et al., 2022).

Secara konsep, RSM digunakan untuk menetapkan hubungan fungsional eksplisit antara variabel acak *input* dan respons *output* melalui analisis regresi, serta memungkinkan dilakukan analisis probabilitas. RSM melibatkan kombinasi antara *metamodeling*, yaitu regresi, dan prosedur berurutan yang mencakup optimasi iteratif. Dalam prosedur desain RSM, terdapat beberapa tahapan yang perlu dilakukan (Raissi & Farsani, 2009):

- a. Merancang serangkaian eksperimen yang memadai untuk pengukuran respons yang diinginkan.
- b. Mengembangkan model matematika permukaan respons dengan pendekatan orde kedua.
- c. Menemukan parameter eksperimen optimal yang menghasilkan nilai maksimum atau minimum dari respons.
- d. Menggambarkan efek langsung dan interaktif dari parameter proses melalui plot dua dan tiga dimensi.

Kemudian, untuk mencapai prosedur tersebut, RSM melibatkan beberapa langkah dengan mengasumsikan semua variabel *input* dan

*output* dapat diukur, sehingga permukaan respons dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.18 (Raissi & Farsani, 2009).

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (2.18)$$

Untuk mengoptimalkan variabel respons  $y$ , diasumsikan bahwa variabel-variabel independen bersifat kontinu dan dapat dikontrol dalam eksperimen, dengan kesalahan yang diabaikan. Dalam hal ini, diperlukan aproksimasi yang sesuai untuk menggambarkan hubungan fungsional antara variabel bebas dan permukaan respons. Biasanya, model orde kedua digunakan dalam RSM, yang memiliki bentuk umum seperti Persamaan 2.19 (Lamidi et al., 2022).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2.19)$$

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$  adalah koefisien regresi yang ditentukan melalui analisis data dan  $\epsilon$  adalah *error*.

Persamaan 2.19 mengilustrasikan hubungan antara variabel *input* dan *output* yang dipelajari melalui eksperimen yang sistematis, sebuah pendekatan yang berasal dari metode *Design of Experiment* (DOE).

RSM sebagai pengembangan dari DOE, memanfaatkan metode statistik untuk tidak hanya merancang eksperimen, tetapi juga mengoptimalkan hubungan antara variabel-variabel tersebut melalui model matematika yang dihasilkan (Lamidi et al., 2022). Melalui pengembangan tersebut, berbagai kombinasi variabel *input* dapat dieksplorasi untuk memperoleh informasi penting tentang interaksi antar faktor serta bagaimana faktor-faktor tersebut mempengaruhi respons.

Dalam praktiknya, ada beberapa desain eksperimen yang sering digunakan dalam RSM, di antaranya adalah *Central Composite Design* (CCD) dan *Box-Behnken Design* (BBD). Kedua jenis eksperimen ini berguna dalam mengeksplorasi ruang desain dan membangun model permukaan respons (Lamidi et al., 2022).

a. *Central Composite Design* (CCD)

Desain eksperimen yang sangat populer dalam RSM. CCD

menggunakan kombinasi titik-titik pusat dan titik ekstrim untuk menghasilkan model permukaan respons yang lebih akurat. CCD biasanya digunakan ketika eksperimen melibatkan dua atau lebih variabel dan memungkinkan untuk mendeteksi pengaruh linier, kuadratik, dan interaksi antar faktor. CCD sering dianggap sebagai desain yang "*rotatable*", yang berarti ketelitian prediksi tetap konstan di seluruh ruang faktor (Alkan, 2020).

b. *Box-Behnken Design* (BBD)

BBD adalah alternatif lain yang digunakan dalam RSM. Tidak seperti CCD, BBD tidak memerlukan eksperimen pada titik-titik ekstrem, sehingga dapat lebih hemat biaya atau lebih aman untuk dijalankan jika kondisi ekstrim tidak praktis. BBD ideal untuk mengembangkan model kuadratik yang dapat memodelkan interaksi dan pengaruh kuadratik dari variabel *input* tanpa memerlukan eksperimen di titik sudut (Hou et al., 2022).

Dengan menggunakan kombinasi antara analisis statistik dan pendekatan eksperimental yang terstruktur, RSM dapat memberikan solusi yang lebih tepat dan hemat biaya untuk berbagai masalah optimasi di bidang teknik.

## 2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

Tabel 2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

| No | Penulis, Tahun           | Judul                                                                                                                            | Permasalahan                                                                                                        | Metode                                                                                                                                                                                                                                       | Hasil                                                                                                              | Persamaan                                                                                                                                                         | Perbedaan                                                                                                                                 |
|----|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | (Javanmard et al., 2020) | <i>Determination of Drag and Lift Related Coefficients of an AUV Using Computational and Experimental Fluid Dynamics Methods</i> | Penelitian ini berfokus pada penentuan koefisien hidrodinamik, yaitu <i>drag</i> dan <i>lift</i> , dari sebuah AUV. | Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah kombinasi eksperimen dan simulasi numerik. Eksperimen dilakukan di kolam tarik ( <i>towing tank</i> ) menggunakan model skala dari bentuk torpedo, sementara simulasi dilakukan dengan CFD | Koefisien hidrodinamik yang diperoleh dari simulasi CFD menunjukkan kesesuaian yang dekat dengan hasil eksperimen. | Penelitian ini meneliti AUV dan pentingnya koefisien hidrodinamik untuk memprediksi perilaku dinamis dan metode penelitian yang digunakan menggunakan teknik CFD. | Penelitian ini hanya berfokus untuk menentukan koefisien hidrodinamik dan penelitian ini tidak melibatkan metode RSM untuk pengoptimalan. |

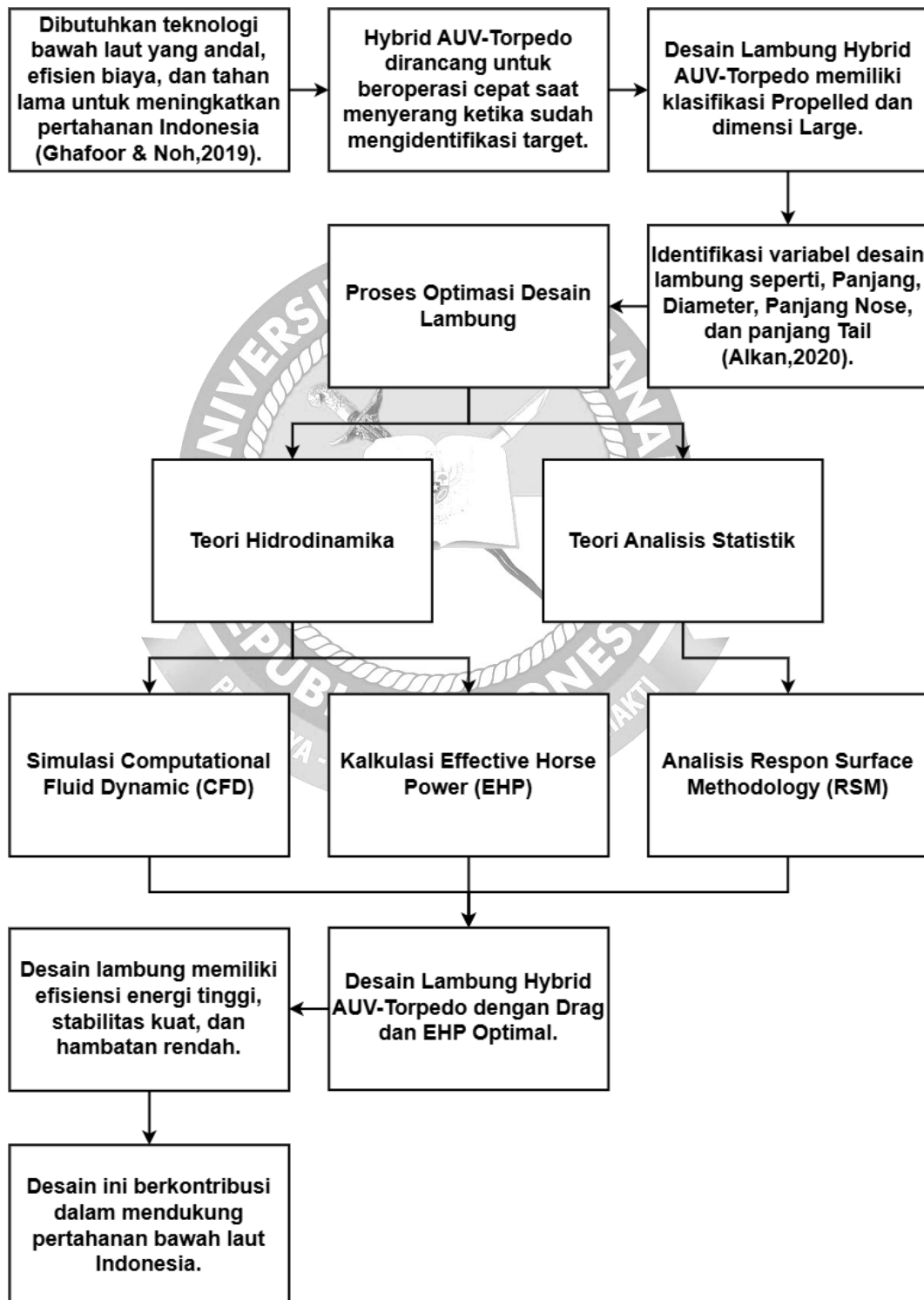
|   |                      |                                                                                                                                    |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                           |                                                                                                                 |                                                                                                                                                 |
|---|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2 | (Alkan, 2020)        | <i>Hydrodynamic Design Optimization of an Autonomous Underwater Vehicle based on Response Surface Methodology</i>                  | Penelitian ini mengoptimalkan hambatan lambung dengan menggunakan metode CFD dan RSM untuk meningkatkan efisiensi hidrodinamik AUV.                 | Penelitian ini menggunakan metode simulasi CFD dengan solver ANSYS CFX™. Dan optimalisasi menggunakan metode RSM dengan kalkulasi ANOVA.                         | Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa optimasi bentuk lambung AUV dalam desain konseptual dimungkinkan melalui simulasi numerik menggunakan CFD dan RSM. | Penelitian ini berfokus pada optimalisasi performa lambung dengan menggunakan metode CFD dan RSM.               | Penelitian ini berfokus ke optimalisasi lambung AUV yang hanya memiliki misi pengawasan dan metode kalkulasi RSM yang digunakan berbasis ANOVA. |
| 3 | (Liang et al., 2020) | <i>Energy-saving optimization for spacing configurations of a pair of self-propelled AUV based on hull form uncertainty design</i> | Penelitian ini mengidentifikasi ketidakpastian variabel desain, pemanfaatan energi yang belum optimal, serta interaksi antara <i>propeller</i> AUV. | Penelitian ini menggabungkan berbagai metodologi, seperti <i>Design for Six Sigma</i> (DFSS), analisis reliabilitas menggunakan FORM, model gaya tubuh RANS, dan | Penelitian ini menunjukkan bahwa optimasi konfigurasi jarak AUV, penerapan DFSS, dan analisis reliabilitas dapat mengurangi drag,                         | Penelitian ini berfokus pada optimalisasi energi lambung AUV dengan <i>propeller</i> sebagai sistem propulsinya | Penelitian ini menggabungkan beberapa metode dan juga mengidentifikasi ketidakpastian variabel                                                  |

|   |              |                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                        |                                                                                                     |
|---|--------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |              |                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                               | simulasi<br><i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD).                                                                                                                                                                             | meningkatkan efisiensi, dan kualitas desain AUV untuk misi bawah air yang lebih hemat energi dan andal.                                                                                                                                        |                                                                                                                                        |                                                                                                     |
| 4 | (Suqi, 2021) | <i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation Around Mk 48 ADCAP Torpedoes</i> | Fokus utama penelitian ini adalah untuk mengeksplorasi dan memahami karakteristik aliran turbulen di sekitar torpedo MK 48 yang memiliki ukuran panjang 5,8 m dengan diameter sebesar 0,53 m, khususnya wake dan turbulensi yang berkaitan, dengan tujuan untuk mengurangi noise hidrodinamik | Penelitian ini menggunakan CFD dengan studi mencakup konvergensi mesh, validasi solusi steady-state, dan simulasi unsteady flow untuk mendeteksi vortex shedding. Model turbulen k- $\omega$ dan DES digunakan untuk membandingkan | Penelitian ini menunjukkan bahwa simulasi steady-state dengan model k- $\omega$ dan DES cukup akurat untuk analisis dasar aliran di sekitar torpedo, namun simulasi transient gagal merepresentasikan aliran tidak beraturan secara realistis. | Penelitian ini menggunakan metode CFD dengan software ANSYS dan geometri yang diinputkan adalah torpedo dengan dimensi mendekati large | Penelitian ini berfokus dalam eksplorasi karakteristik aliran turbulent dan juga pengaturan meshing |

|   |                                   |                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                              |                                                                                           |                                                                                                                                                                                      |
|---|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                                   |                                                                                                                                                                                     | yang dihasilkan oleh torpedo tersebut.                                                                                                                             | karakteristik aliran steady dan unsteady.                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                              |                                                                                           |                                                                                                                                                                                      |
| 5 | (Mansoorza deh & Javanmard, 2014) | <i>An investigation of free surface effects on drag and lift coefficients of an autonomous underwater vehicle (AUV) using computational and experimental fluid dynamics methods</i> | Penelitian ini membahas pengaruh permukaan bebas ( <i>free surface</i> ) dan variasi kedalaman penyelaman terhadap koefisien <i>drag</i> dan <i>lift</i> dari AUV. | Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah kombinasi eksperimen dan simulasi numerik. Eksperimen dilakukan di kolam tarik ( <i>towing tank</i> ) menggunakan model skala dari bentuk torpedo, sementara simulasi dilakukan dengan metode CFD. | Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa koefisien <i>drag</i> dan <i>lift</i> AUV sangat sensitif terhadap kecepatan AUV, serta variasi kedalaman penyelaman. | Penelitian ini berfokus pada optimalisasi performa lambung dengan menggunakan metode CFD. | Penelitian ini lebih fokus pada pengaruh kedalaman penyelaman dan permukaan bebas terhadap koefisien <i>drag</i> dan <i>lift</i> serta tidak melakukan pengoptimalan menggunakan RSM |

Sumber: diolah oleh peneliti

### 2.3 Kerangka Berpikir



**Gambar 2.12 Kerangka Berpikir Penelitian**

Sumber: diolah oleh peneliti

Dalam upaya meningkatkan kemampuan pertahanan bawah laut Indonesia, dibutuhkan teknologi yang mampu melaksanakan pengawasan dan penyerangan secara andal, efisien, dan tahan lama (Ghafoor & Noh, 2019). Salah satu solusi inovatif yang dikembangkan adalah *Hybrid AUV-Torpedo*, kendaraan bawah air yang dirancang untuk menjalankan fungsi ganda, yaitu bergerak cepat saat menyerang dan memiliki daya tahan tinggi selama misi pengawasan. Agar kendaraan ini dapat bekerja secara optimal dalam kedua fungsi tersebut, desain lambung yang efisien dan efektif menjadi elemen kunci yang harus diperhatikan. Desain lambung ini harus mampu memberikan efisiensi energi tinggi, stabilitas yang baik, kecepatan memadai, dan hambatan hidrodinamik yang rendah (Bartolomeu, 2016).

Proses pengembangan desain lambung dimulai dengan mengidentifikasi variabel utama yang memengaruhi performa hidrodinamik (Hoerner, 1965 dan 1985). Variabel ini mencakup panjang, diameter, panjang *nose*, dan panjang *tail*, yang masing-masing memiliki peran penting dalam menentukan distribusi gaya hidrodinamik pada kendaraan (Alkan, 2020). Pemahaman tentang pengaruh bentuk dan ukuran lambung terhadap gaya-gaya yang bekerja di bawah air sangat diperlukan untuk memastikan efisiensi energi. Selain itu, desain yang optimal akan membantu meminimalkan hambatan hidrodinamik yang dapat mengurangi performa kendaraan.

Tahap selanjutnya adalah proses optimasi desain dengan memanfaatkan teori hidrodinamika dan analisis statistik. Simulasi berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) digunakan untuk mengkaji interaksi antara fluida dan permukaan lambung, serta mengukur parameter kinerja seperti hambatan dan stabilitas (Bartolomeu, 2016) dan Kalkulasi *Effective Horsepower* (EHP) digunakan Untuk menghitung daya yang dibutuhkan dalam mengatasi gaya hambat total pada lambung *Hybrid AUV-Torpedo*. Analisis menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) diterapkan untuk mengeksplorasi hubungan antara variabel desain dan menentukan kombinasi terbaik yang memenuhi kriteria efisiensi energi (Lamidi et al.,

2022).

Penelitian ini diharapkan menghasilkan desain lambung *Hybrid AUV-Torpedo* yang optimal, dengan efisiensi energi tinggi dan hambatan hidrodinamik rendah. Desain yang dihasilkan akan meningkatkan performa kendaraan, baik dalam misi pengawasan jangka panjang maupun penyerangan cepat di bawah air. Dengan desain yang optimal, *Hybrid AUV-Torpedo* diharapkan dapat memberikan kontribusi yang signifikan bagi upaya memperkuat pertahanan bawah laut Indonesia secara keseluruhan.

#### 2.4 Hipotesis

- a. Variasi geometri lambung mengakibatkan Performa Hidrodinamik lambung *Hybrid AUV-Torpedo* menghasilkan nilai yang optimal.
- b. Variasi geometri lambung mengakibatkan *Effective Horsepower* (EHP) lambung *Hybrid AUV-Torpedo* menghasilkan nilai yang optimal.