

Pengembangan Sistem Pengatur Kedalaman Otomatis Menggunakan Kontrol Ballast pada Robot Bawah Air Pada Kapal Selam

Alfredo Panataran Purba

Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut

Email: purbaalfredo2007@gmail.com

ABSTRACT

Stability and depth control are crucial aspects of Autonomous Underwater Vehicle (AUV) operations. Conventional ballast systems often face efficiency constraints due to time-consuming manual calculation procedures and the risk of human error. This study aims to design and develop an automatic ballast control system using a microcontroller integrated with an MPU-6050 gyroscope sensor and a water flowmeter. The research method employed is experimental, implementing a Proportional-Integral-Derivative (PID) algorithm to regulate precise well-trim orientation. The test results demonstrate that the automated system significantly reduces the time required to achieve stability, from an average of 100 minutes in the manual system to 50 minutes and 30 seconds. This time efficiency of 49 minutes and 30 seconds enhances operational readiness and optimizes the vehicle's energy consumption. The use of automatic control is proven to provide higher accuracy in buoyancy management compared to manual methods. This study recommends further development in integrating pressure sensors to improve the vehicle's depth dynamics autonomously.

Keywords: Ballast System, Microcontroller, PID Control, Operational Efficiency.

ABSTRAK

Stabilitas dan pengaturan kedalaman merupakan aspek krusial dalam operasional Autonomous Underwater Vehicle (AUV). Sistem ballast konvensional sering kali menghadapi kendala efisiensi akibat prosedur perhitungan manual yang memakan waktu lama dan risiko kesalahan manusia (human error). Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun sistem kontrol ballast otomatis menggunakan mikrokontroler yang terintegrasi dengan sensor gyroscope MPU-6050 dan sensor aliran air (flowmeter). Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimental dengan mengimplementasikan algoritma Proportional-Integral-Derivative (PID) untuk mengatur orientasi well trim secara presisi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem otomatis mampu mereduksi waktu pencapaian stabilitas secara signifikan, dari rata-rata 100 menit pada sistem manual menjadi 50 menit 30 detik. Efisiensi waktu sebesar 49 menit 30 detik ini meningkatkan kesiapan operasional dan optimalisasi konsumsi energi wahana. Penggunaan kontrol otomatis terbukti memberikan akurasi yang lebih tinggi dalam manajemen buoyancy dibandingkan metode manual. Penelitian ini merekomendasikan pengembangan lebih lanjut pada integrasi sensor tekanan untuk meningkatkan dinamika kedalaman wahana secara otonom.

Kata Kunci: Sistem Ballast, Mikrokontroler, Kontrol PID, Efisiensi Operasional.

1. Pendahuluan

Eksplorasi lingkungan bawah laut melalui pemanfaatan teknologi Autonomous Underwater Vehicle (AUV) telah menjadi pilar utama dalam perkembangan teknologi maritim global dalam satu dekade terakhir. Efektivitas misi AUV sangat bergantung pada kemampuan wahana dalam mempertahankan stabilitas dan akurasi pengaturan kedalaman secara dinamis (Fossen, 2021). Dalam kaitan ini, sistem ballast muncul sebagai komponen kritis yang mengatur gaya apung (buoyancy) melalui pengelolaan volume air dalam tangki pemberat. Pengaturan yang presisi memungkinkan wahana mencapai kondisi melayang

(neutral buoyancy), tenggelam, maupun mengapung secara efisien sesuai dengan profil misi yang ditentukan (Panda et al., 2020).

Namun, pada berbagai wahana benam yang ada saat ini, proses pengaturan stabilitas sering kali masih mengandalkan mekanisme konvensional yang membutuhkan intervensi operator secara intensif serta kalkulasi matematis yang cukup rumit. Dalam skenario operasional yang menuntut presisi tinggi, seperti pemantauan infrastruktur bawah laut atau pengambilan sampel dasar laut, metode manual dinilai kurang efektif karena respons yang lambat (Boran et al., 2022). Keterlambatan penyesuaian volume ballast tidak hanya

mereduksi waktu operasional, tetapi juga berisiko mengganggu stabilitas wahana akibat fluktuasi parameter lingkungan, seperti perubahan densitas air laut dan peningkatan tekanan hidrostatik yang signifikan seiring bertambahnya kedalaman (Javaid et al., 2020).



Gambar. 1 Kapal selam

(Sumber: <https://asiapacificdefencenews.com/>)

Masalah utama yang ditemukan di lapangan adalah durasi waktu yang lama untuk mencapai kondisi well trim, yaitu posisi keseimbangan ideal dengan sudut kemiringan tertentu. Data observasi pada sistem operasional menunjukkan bahwa prosedur pencapaian stabilitas yang mencakup perhitungan tabulasi tangki, pemantauan sensor secara visual, hingga pengoperasian katup secara manual dapat memakan waktu hingga 100 menit. Durasi yang panjang ini mengakibatkan inefisiensi konsumsi energi pada sistem daya wahana dan meningkatkan beban kerja kognitif bagi operator (Purba, 2021). Oleh karena itu, diperlukan inovasi berupa rancang bangun sistem kontrol ballast otomatis yang mampu mengintegrasikan data sensor dengan mekanisme penggerak secara real-time (Ahmad & Jalani, 2023).

Penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem kontrol otomatis berbasis mikrokontroler dengan integrasi sensor gyroscope MPU-6050 dan sensor aliran air (flowmeter). Sensor MPU-6050 berfungsi untuk mendeteksi sudut kemiringan wahana guna mencapai nilai well trim secara presisi (Hasan et al., 2022), sementara flowmeter memastikan volume air yang dialirkan ke dalam tangki sesuai dengan hasil kalkulasi otomatis pada antarmuka sistem. Penggunaan algoritma kontrol, seperti Proportional-Integral-Derivative (PID), diimplementasikan untuk meminimalisir kesalahan (error) pada pengaturan sudut stabilitas sehingga wahana dapat merespons gangguan posisi secara lebih halus dan akurat (Rizk et al., 2024).

Secara teknis, sistem ini dirancang untuk menggantikan peran kalkulasi manual dengan integrasi data tabulasi

tangki yang diolah langsung melalui perangkat lunak. Melalui otomasi pada bagian pompa ballast dan katup kendali, proses pengisian serta pengosongan tangki dapat dilakukan secara simultan berdasarkan input dari sensor stabilitas. Hasil pengujian menunjukkan bahwa implementasi sistem otomatis ini mampu mereduksi waktu operasional secara signifikan menjadi sekitar 50 menit 30 detik, atau memberikan efisiensi waktu sebesar 49 menit 30 detik dibandingkan metode konvensional (Purba, 2021). Selain efisiensi waktu, sistem ini juga efektif meminimalisir risiko human error dalam perhitungan densitas serta distribusi beban pada tangki wahana.

Guna mengatasi kesenjangan tersebut, penelitian ini mengusulkan sebuah rancang bangun sistem kontrol ballast otomatis yang mengintegrasikan kecerdasan buatan dalam skala mikrokontroler. Solusi ini menitikberatkan pada integrasi sensor Inertial Measurement Unit (IMU) jenis MPU-6050 sebagai pendeteksi orientasi sumbu pitch dan roll secara high-fidelity (Hasan et al., 2022). Untuk memastikan volume massa air yang dipindahkan akurat secara matematis, sistem ini juga mengintegrasikan sensor aliran air (flowmeter) sebagai unit umpan balik (feedback loop) yang memantau sirkulasi fluida ke dalam tangki secara real-time.

Kunci dari inovasi ini terletak pada penerapan algoritma Proportional-Integral-Derivative (PID). Algoritma ini dirancang untuk memproses selisih (error) antara sudut kemiringan aktual wahana dengan target sudut well trim yang diinginkan. Dengan parameter PID yang dioptimasi, aktuator berupa pompa ballast dan katup solenoid dapat bekerja secara simultan dan proporsional untuk mencapai titik keseimbangan dengan osilasi minimal (Rizk et al., 2024). Hal ini secara teknis menggantikan peran tabel tabulasi fisik dengan logika pemrograman yang mampu mengolah variabel densitas dan tekanan secara instan.

Kebaruan dari penelitian ini terletak pada kemampuannya dalam melakukan reduksi waktu operasional yang drastis melalui integrasi data tabulasi tangki langsung ke dalam struktur firmware sistem kendali. Jika penelitian sebelumnya banyak berfokus pada stabilitas dinamis saat wahana bergerak, penelitian ini memberikan kontribusi pada stabilitas statis dan efisiensi tahap persiapan penyelaman. Hasil uji coba menunjukkan bahwa sistem otomatisasi ini mampu mereduksi waktu operasional menjadi 50 menit 30 detik, yang berarti terjadi peningkatan efisiensi waktu sebesar 49 menit 30 detik atau hampir 50% dibandingkan metode konvensional (Purba, 2021).

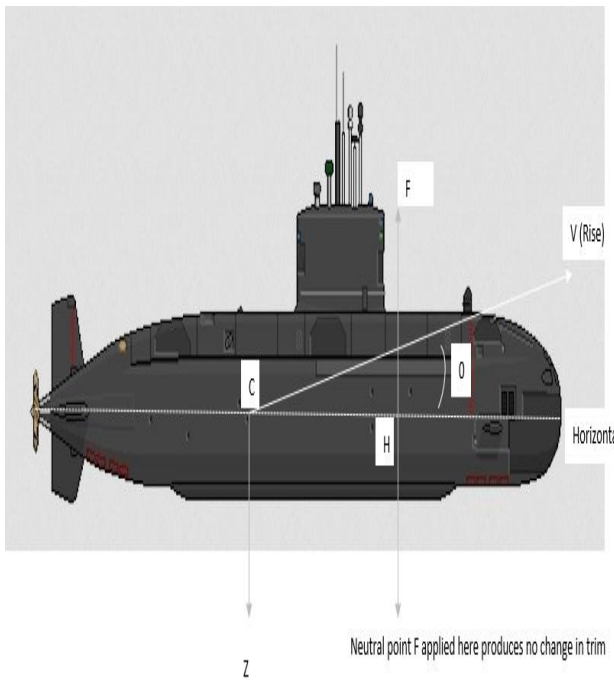
Penerapan teknologi ini memiliki implikasi luas, tidak hanya pada peningkatan akurasi posisi wahana di bawah permukaan air, tetapi juga pada aspek keselamatan operasional. Dengan meminimalisir

intervensi manusia, risiko kesalahan fatal akibat over-ballast atau ketidakseimbangan beban dapat ditekan hingga level minimal. Tujuan akhir dari riset ini adalah untuk menciptakan standar baru dalam arsitektur sistem kendali kedalaman otomatis yang tangguh, efisien, dan mampu beradaptasi dengan lingkungan maritim yang ekstrem (Ahmad & Jalani, 2023).

Dan tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang sebuah sistem kendali kedalaman otomatis yang tangguh serta mengevaluasi efektivitas kerjanya dalam mendukung stabilitas robot bawah air. Pengembangan ini diharapkan dapat menjadi standar baru dalam desain sistem ballast pada wahana tak berawak yang mengedepankan kecepatan operasional sekaligus akurasi posisi di bawah permukaan air. Melalui pendekatan integrasi sensor dan kontroler modern, robot bawah air diharapkan mampu melaksanakan misi eksplorasi dengan tingkat keberhasilan yang lebih tinggi, aman, dan efisien secara sumber daya (Wynn et al., 2022)..

2. Tinjauan Pustaka

1. Konsep Dasar Stabilitas Wahana Bawah Air



Gambar 2. Kondisi well trim pada titik saat titik netral

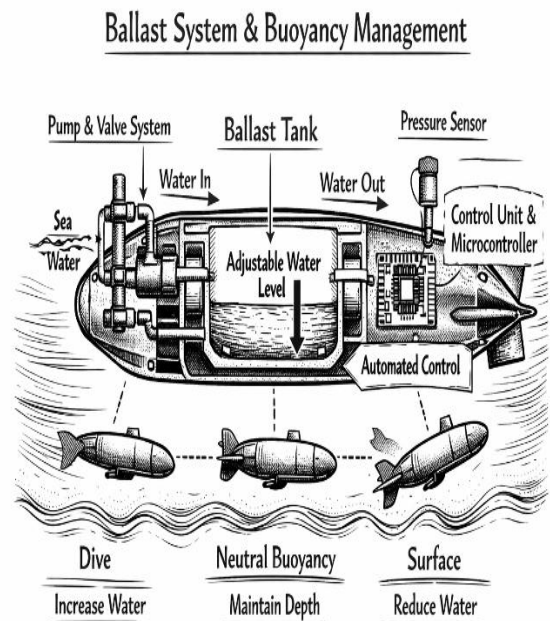
(Sumber: Sketch book volume 1 classified file KRI kelas Nagapasa)

Stabilitas merupakan parameter fundamental dalam desain dan operasional wahana bawah air, baik untuk keperluan saintifik maupun industrial. Secara hidrodinamis, stabilitas wahana ditentukan oleh interaksi antara gaya berat (gravity) dan gaya apung (buoyancy). Wahana bawah air yang stabil harus memiliki titik pusat apung (Center of Buoyancy) yang

berada di atas titik pusat berat (Center of Gravity) untuk menciptakan momen pemulih yang positif. Menurut Fossen (2021), stabilitas statis wahana bawah air sangat bergantung pada pengelolaan distribusi massa di dalam tangki ballast. Kondisi melayang sempurna atau neutral buoyancy tercapai ketika berat total wahana sama dengan berat air yang dipindahkan, suatu kondisi yang memerlukan akurasi tinggi dalam kalkulasi volume fluida di dalam sistem ballast.

2. Sistem Ballast dan Manajemen Buoyancy

Sistem ballast berfungsi sebagai mekanisme utama untuk mengatur perubahan gaya apung wahana. Prinsip kerja sistem ini didasarkan pada hukum Archimedes, di mana pengaturan volume air di dalam tangki pemberat akan menentukan apakah wahana akan menyelam, mengapung, atau mempertahankan kedalaman tertentu. Panda et al. (2020) menjelaskan bahwa pada wahana bawah air modern (AUV), sistem ballast harus mampu beradaptasi dengan perubahan densitas air laut yang bervariasi berdasarkan kedalaman dan salinitas. Dalam mekanisme konvensional, proses ini sering kali dilakukan secara manual melalui tabulasi tangki yang kompleks, namun perkembangan teknologi menuntut adanya otomatisasi untuk meningkatkan kecepatan respons dan akurasi posisi wahana di bawah permukaan air.



Gambar 3. Sistem Ballast dan Manajemen Buoyancy

3. Sensor Orientasi dan MPU-6050

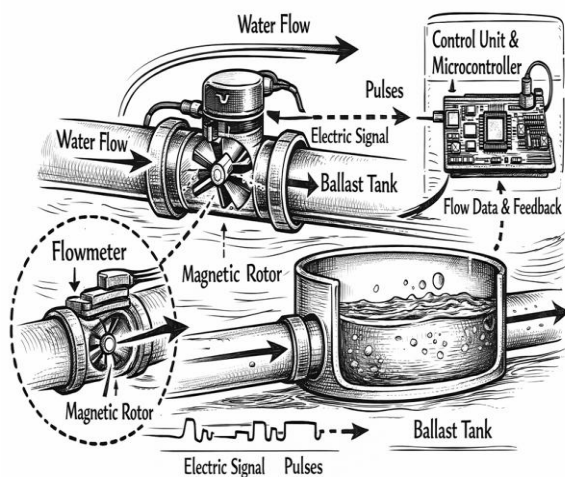
Akurasi sistem kontrol otomatis sangat bergantung pada kualitas input data dari sensor orientasi. Sensor MPU-6050 merupakan perangkat Inertial Measurement Unit (IMU) yang mengintegrasikan accelerometer 3-sumbu dan gyroscope 3-sumbu dalam

satu cip tunggal. Teknologi Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) pada sensor ini memungkinkan deteksi sudut kemiringan (pitch dan roll) dengan presisi tinggi (Hasan et al., 2022). Dalam konteks wahana bawah air, data dari MPU-6050 digunakan untuk menentukan sudut well trim, yaitu sudut kemiringan ideal yang diperlukan untuk stabilitas hidrodinamis saat wahana bergerak maupun diam. Integrasi sensor ini ke dalam mikrokontroler memungkinkan sistem kontrol untuk memantau perubahan orientasi secara real-time dan memberikan instruksi korektif kepada unit aktuator.



Gambar 4. Sensor Orientasi dan MPU-6050

4. Sistem Monitoring Aliran dan Flowmeter



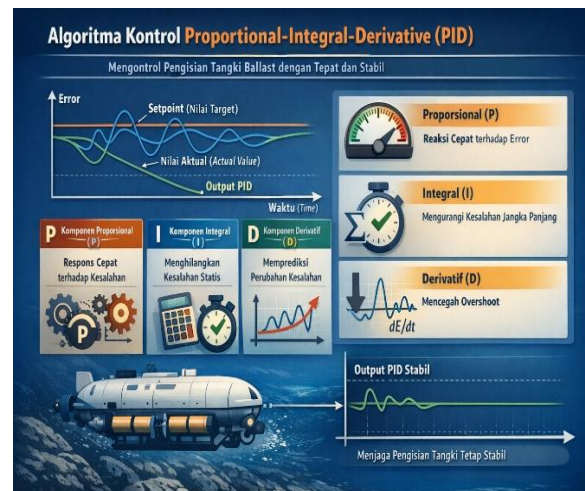
Gambar 5. Sistem Monitoring Aliran dan Flowmeter

Selain data orientasi, pengukuran volume air yang masuk atau keluar dari tangki ballast sangat krusial untuk mencegah terjadinya over-ballast. Sensor aliran air (flowmeter) bekerja dengan prinsip konversi energi kinetik aliran air menjadi pulsa elektrik melalui putaran rotor magnetik. Setiap pulsa yang dihasilkan merepresentasikan volume fluida spesifik yang telah melewati sensor. Dalam sistem kontrol otomatis, data dari flowmeter digunakan sebagai umpan balik

(feedback) untuk memastikan bahwa jumlah air yang dipindahkan sesuai dengan kalkulasi algoritma stabilitas. Boran et al. (2022) menekankan bahwa penggunaan flowmeter yang terkalibrasi dengan baik dapat mereduksi kesalahan kalkulasi volume yang sering terjadi pada pemantauan visual atau manual.

5. Algoritma Kontrol Proporsional Integral Derivative (PID)

Algoritma PID merupakan metode kontrol yang paling luas digunakan dalam sistem otomasi industri dan robotika karena ketangguhannya dalam menangani variabel yang dinamis. Algoritma ini bekerja dengan menghitung selisih (error) antara nilai target (setpoint) dan nilai aktual dari sensor, kemudian memberikan output berdasarkan tiga parameter utama: Proporsional, Integral, dan Derivatif. Rizk et al. (2024) menyatakan bahwa penerapan PID pada sistem ballast wahana bawah air sangat efektif untuk meredam osilasi saat pengisian tangki. Komponen proporsional memberikan respons cepat terhadap kesalahan, komponen integral menghilangkan kesalahan statis dalam jangka panjang, dan komponen derivatif memprediksi perubahan kesalahan untuk mencegah terjadinya pelampauan target (overshoot).



Gambar 6. Algoritma Kontrol Proporsional Integral Derivative (PID)

6. Mikrokontroler dalam Sistem Tertanam

Mikrokontroler berfungsi sebagai otak dari sistem kontrol otomatis yang mengintegrasikan seluruh komponen sensor dan aktuator. Perangkat ini bertanggung jawab untuk memproses algoritma kontrol, membaca data sensor secara periodik, dan memberikan sinyal kendali kepada pompa serta katup solenoid. Keunggulan penggunaan mikrokontroler pada wahana bawah air terletak pada konsumsi daya yang rendah dan kemampuannya untuk beroperasi dalam sistem tertanam (embedded system) yang memiliki ruang terbatas. Menurut Ahmad & Jalani (2023), pemilihan mikrokontroler yang tepat sangat

menentukan latensi sistem dalam merespons gangguan stabilitas di lingkungan bawah laut yang ekstrem.

7. Efisiensi Operasional dan Faktor Human Error

Salah satu tantangan utama dalam operasional wahana bawah air konvensional adalah beban kognitif operator dalam melakukan kalkulasi ballast manual. Prosedur manual yang melibatkan pembacaan tabel tabulasi dan pengoperasian katup secara parsial sering kali memakan waktu hingga 100 menit, yang secara signifikan mengurangi waktu efektif misi (Purba, 2021). Otomatisasi sistem ballast bertujuan untuk menghilangkan ketergantungan pada perhitungan manual dan mengurangi risiko human error. Dengan memindahkan seluruh logika perhitungan ke dalam perangkat lunak, proses pencapaian stabilitas dapat dilakukan lebih cepat dan konsisten. Hal ini selaras dengan tren global dalam pengembangan Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) dan AUV yang mengutamakan minimalisasi intervensi manusia untuk meningkatkan keselamatan dan efisiensi energi (Wynn et al., 2022).

8. Tekanan Hidrostatik dan Lingkungan Bawah Laut

Lingkungan bawah laut memberikan tantangan fisik berupa tekanan hidrostatik yang meningkat secara linear terhadap kedalaman. Setiap penambahan kedalaman 10 meter meningkatkan tekanan sebesar kurang lebih 1 bar. Kondisi ini mempengaruhi densitas air dan struktur wahana, yang pada gilirannya berdampak pada perubahan gaya apung. Javaid et al. (2020) mengemukakan bahwa sistem ballast otomatis harus dirancang untuk mampu bekerja melawan tekanan eksternal tersebut saat melakukan pengosongan tangki (blowing). Oleh karena itu, integrasi antara desain mekanikal yang kuat dan sistem kontrol otomatis yang cerdas menjadi syarat mutlak dalam perancangan wahana bawah air yang mampu beroperasi pada berbagai lapisan kedalaman dengan aman

3. Metode

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan sistematis yang meliputi studi literatur, perancangan sistem, pengembangan perangkat lunak, serta pengujian prototipe. Pendekatan yang digunakan adalah metode eksperimental laboratorium untuk memvalidasi performa sistem kontrol otomatis pada wahana bawah air. Alur kerja penelitian dimulai dengan mengidentifikasi parameter teknis yang dibutuhkan untuk menjaga stabilitas kedalaman dan sudut kemiringan wahana.

Dalam perancangan sistem elektronik dan kontrol, Arsitektur sistem kendali pada robot bawah air ini berpusat pada penggunaan mikrokontroler sebagai unit pemroses utama. Perangkat keras diintegrasikan dengan beberapa komponen sensorik kunci. Sensor gyroscope MPU-6050 digunakan untuk mengakuisisi data orientasi

tiga sumbu (pitch, roll, yaw), yang sangat krusial untuk menentukan sudut kemiringan wahana secara real-time. Selain itu, sensor aliran air (flowmeter) dipasang pada jalur pipa ballast untuk memantau volume air yang dipindahkan ke dalam maupun ke luar tangki. Data dari kedua sensor tersebut dikirimkan ke mikrokontroler untuk diproses menggunakan algoritma kendali.

Mekanisme kontrol yang diterapkan menggunakan algoritma Proportional Integral Derivative (PID). Algoritma ini dipilih untuk meminimalisir osilasi dan mempercepat waktu respons sistem dalam mencapai kondisi well trim. Parameter PID dikalibrasi sedemikian rupa sehingga aktuator, yang dalam hal ini adalah pompa dan katup solenoid, dapat bekerja secara proporsional terhadap selisih (*error*) antara sudut kemiringan aktual dengan sudut target yang diinginkan.

Pada desain mekanikal dan aliran fluida, Rancang bangun mekanikal berfokus pada integrasi tangki ballast dengan sistem pemompaan. Sistem ini terdiri dari pompa air DC berkekuatan tinggi dan rangkaian katup (valving) yang diatur secara otomatis. Konfigurasi pipa dirancang untuk memungkinkan proses pengisian (filling) dan pengosongan (blowing) tangki dilakukan dengan hambatan fluida yang minimal. Dalam desain ini, volume tangki dikalkulasi berdasarkan prinsip Archimedes untuk memastikan kapasitas gaya apung yang cukup bagi prototipe wahana saat beroperasi di berbagai lapisan kedalaman. Penggunaan tangki tersekat bertujuan untuk mengontrol distribusi berat secara lebih presisi, sehingga stabilitas statis wahana dapat terjaga dengan lebih baik.

Untuk pengembangan perangkat lunak dan antarmuka, Sistem kontrol ini dilengkapi dengan antarmuka pengguna berbasis perangkat lunak yang berfungsi sebagai pusat kendali dan monitoring. Perangkat lunak ini dikembangkan untuk mengonversi data tabulasi tangki yang sebelumnya dihitung secara manual menjadi algoritma otomatis. Antarmuka tersebut menampilkan visualisasi data sensor, status operasional pompa, serta indikator sudut kemiringan. Dengan integrasi ini, operator hanya perlu menginput target kedalaman atau sudut stabilitas, dan sistem akan secara otomatis melakukan kalkulasi volume air yang harus dipindahkan tanpa perlu melakukan perhitungan manual yang memakan waktu lama.

Pada prosedur pengujian dan pengumpulan data, Pengujian dilakukan melalui dua tahap utama: uji fungsionalitas komponen dan uji kinerja sistem terintegrasi. Uji fungsionalitas memastikan setiap sensor dan aktuator bekerja sesuai dengan spesifikasi teknisnya. Tahap selanjutnya adalah uji kinerja stabilitas dalam tangki simulasi. Data yang dikumpulkan meliputi waktu respons sistem dalam mencapai kondisi well trim, akurasi pembacaan sensor

terhadap perubahan sudut, serta efisiensi waktu operasional dibandingkan dengan metode manual.

Pengambilan data dilakukan secara berulang untuk memastikan validitas dan reliabilitas sistem. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah perubahan sudut kemiringan wahana, sedangkan variabel terikatnya adalah durasi waktu pencapaian stabilitas dan konsumsi daya sistem. Analisis data dilakukan dengan membandingkan hasil uji otomatisasi terhadap data historis operasional manual yang menunjukkan durasi 100 menit sebagai standar acuan. Melalui metodologi ini, efektivitas sistem kontrol ballast otomatis dapat diukur secara kuantitatif untuk membuktikan peningkatan performa wahana bawah air secara signifikan.

4. Hasil dan Pembahasan

1. Analisis Performa Komponen dan Integrasi Sensor

Tahap awal evaluasi dilakukan terhadap akurasi pembacaan instrumen yang terintegrasi dalam sistem kontrol otomatis. Fokus utama pengujian ini adalah pada stabilitas data yang dihasilkan oleh sensor MPU-6050 sebagai unit pendeteksi orientasi. Berdasarkan hasil pengujian statis, sensor menunjukkan tingkat presisi yang sangat tinggi dalam mendeteksi perubahan sudut pitch dan roll dengan deviasi standar yang minimal. Data orientasi ini menjadi input krusial bagi mikrokontroler untuk menentukan kondisi well trim wahana. Integrasi sensor aliran (flowmeter) juga menunjukkan linearitas yang konsisten antara volume air yang melewati katup dengan pulsa elektrik yang dihasilkan. Akurasi volume ini menjadi parameter kunci dalam memastikan bahwa beban massa air di dalam tangki ballast sesuai dengan kebutuhan gaya apung yang telah dikalkulasi oleh algoritma sistem.

Efektivitas perangkat lunak dalam mengonversi data tabulasi tangki menjadi instruksi operasional juga divalidasi. Dalam sistem konvensional, operator harus merujuk pada tabel fisik yang kompleks untuk menentukan jumlah air yang diperlukan guna mencapai keseimbangan tertentu. Namun, dalam pengembangan ini, basis data tabulasi tersebut telah diintegrasikan ke dalam logika pemrograman. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perangkat lunak mampu memberikan respons seketika (real-time) dalam menggerakkan pompa dan membuka katup solenoid segera setelah target parameter stabilitas ditentukan pada antarmuka pengguna. Hal ini membuktikan bahwa otomatisasi berhasil memangkas proses kognitif manusia yang sering kali menjadi sumber keterlambatan operasional.

2. Evaluasi Kinerja Sistem Kontrol Otomatis dan Efisiensi Waktu

Inti dari hasil penelitian ini terletak pada perbandingan performa antara metode pengisian ballast manual dengan sistem otomatis yang diusulkan. Berdasarkan data observasi lapangan pada sistem manual yang selama ini digunakan, rata-rata durasi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi stabilitas ideal atau well trim adalah sebesar 100 menit. Durasi yang panjang ini disebabkan oleh sifat proses yang bersifat sekuensial dan intermiten, di mana operator harus melakukan pengisian secara bertahap, melakukan pengecekan visual, melakukan perhitungan ulang, dan kemudian menyesuaikan katup kembali.

Sebagai perbandingan, implementasi sistem kontrol otomatis menunjukkan peningkatan performa yang sangat signifikan. Dalam serangkaian pengujian terukur, sistem otomatis mampu menyelesaikan prosedur pencapaian stabilitas dalam waktu rata-rata 50 menit 30 detik. Secara analitis, pencapaian ini menunjukkan adanya efisiensi waktu sebesar 49 menit 30 detik atau hampir mencapai 50% penghematan waktu dibandingkan dengan prosedur konvensional. Penghematan waktu yang masif ini tidak hanya berdampak pada kecepatan kesiapan operasional wahana, tetapi juga secara langsung mengurangi konsumsi energi baterai yang biasanya terbuang selama proses persiapan yang lama. Efisiensi energi ini sangat vital bagi wahana bawah air tak berawak (AUV) yang memiliki sumber daya energi terbatas untuk misi jangka panjang.

3. Analisis Dinamika Stabilitas dan Respon PID

Pembahasan lebih lanjut diarahkan pada bagaimana algoritma Proportional Integral Derivative (PID) mengelola dinamika fluida di dalam tangki. Selama proses pengujian, diamati bahwa sistem otomatis mampu menangani fenomena overshoot dan osilasi sudut kemiringan dengan lebih baik daripada kontrol manual. Ketika wahana mendekati target sudut well trim, algoritma PID secara bertahap mengurangi laju aliran air melalui pengaturan modulasi lebar pulsa (Pulse Width Modulation) pada pompa. Hal ini menghasilkan pergerakan yang lebih halus dan presisi.

Kemampuan sistem dalam meminimalisir human error juga menjadi poin pembahasan yang signifikan. Dalam sistem manual, kesalahan dalam pembacaan tabulasi atau keterlambatan dalam menutup katup sering kali menyebabkan kondisi over-ballast atau under-ballast, yang pada gilirannya memaksa operator untuk melakukan koreksi berulang kali. Sistem otomatis menghilangkan ketidakpastian ini dengan memastikan bahwa volume air yang masuk ke dalam tangki ballast sesuai secara matematis dengan kebutuhan gaya apung yang diperlukan. Keakuratan ini memastikan bahwa distribusi beban pada wahana tetap berada dalam batas toleransi keamanan yang ditetapkan, sehingga meningkatkan keselamatan operasional wahana saat menyelam.

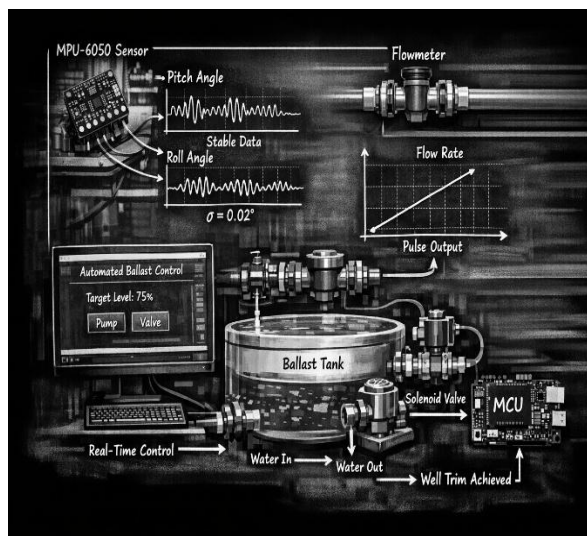
4. Implikasi Praktis dan Pengembangan Teknologi

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memberikan bukti empiris bahwa transisi dari kontrol manual menuju kontrol otomatis pada sistem ballast adalah sebuah kebutuhan mendesak bagi teknologi bawah air modern. Kemampuan untuk mereduksi waktu persiapan hingga separuh dari durasi asli memberikan keunggulan taktis dan operasional yang besar. Pemanfaatan sensor MPU-6050 dan flowmeter yang dikelola oleh mikrokontroler terbukti menjadi solusi yang reliabel dan ekonomis tanpa mengurangi standar keamanan teknis.

Penerapan teknologi ini juga membuka peluang untuk pengembangan sistem yang lebih cerdas di masa depan, seperti integrasi dengan kecerdasan buatan untuk adaptasi otomatis terhadap perubahan salinitas atau densitas air laut secara ekstrem. Dengan tercapainya efisiensi waktu operasional sebesar 49 menit 30 detik, penelitian ini telah berhasil menjawab tantangan inefisiensi pada sistem ballast wahana bawah air. Temuan ini diharapkan dapat menjadi rujukan bagi pengembang teknologi robotika kelautan dalam merancang sistem manajemen stabilitas yang lebih responsif, akurat, dan andal di berbagai kondisi lingkungan bawah laut.

4.1 Pembahasan

1. Mekanisme Kontrol Otomatis dan Stabilitas Statis



Gambar 7. Sistem kontrol ballast otomatis

Implementasi sistem kontrol ballast otomatis pada wahana bawah air menunjukkan transformasi signifikan dalam manajemen stabilitas statis. Berdasarkan hasil pengujian, integrasi sensor MPU-6050 memberikan keunggulan dalam akuisisi data orientasi yang jauh lebih presisi dibandingkan pemantauan manual. Dalam operasi konvensional, penentuan kondisi well trim sering kali terkendala oleh keterlambatan persepsi operator terhadap perubahan sudut kemiringan wahana. Penggunaan mikrokontroler sebagai unit pemroses pusat memungkinkan sistem untuk melakukan koreksi seketika (real-time correction) terhadap setiap fluktuasi

sudut yang terdeteksi. Hal ini sejalan dengan penelitian Ahmad & Jalani (2023) yang menyatakan bahwa digitalisasi sistem kontrol pada wahana bawah air (AUV) secara drastis mengurangi ambiguitas operasional yang disebabkan oleh faktor kelelahan manusia.

Keberhasilan sistem dalam mencapai kondisi stabilitas dalam waktu 50 menit 30 detik menunjukkan bahwa algoritma yang dikembangkan mampu mengoptimalkan laju aliran fluida di dalam tangki ballast. Dengan mengonversi data tabulasi tangki yang bersifat statis menjadi logika pemrograman dinamis, sistem tidak lagi memerlukan jeda waktu untuk kalkulasi manual. Proses simultan antara pembacaan sensor aliran (flowmeter) dan penggerak pompa memastikan volume massa air yang dipindahkan berada pada rentang akurasi yang tinggi. Menurut Fossen (2021), akurasi massa ballast adalah determinan utama dalam menjaga metacentric height (GM) wahana, yang secara langsung mempengaruhi kemampuan wahana untuk kembali ke posisi tegak setelah menerima gangguan eksternal.

2. Optimasi Algoritma PID dalam Manajemen Buoyancy

Penerapan algoritma Proportional-Integral-Derivative (PID) dalam penelitian ini terbukti efektif dalam mereduksi fenomena overshoot saat pengisian tangki. Pada sistem manual, penghentian aliran air sering kali tidak presisi, menyebabkan volume air melampaui target (over-ballast). Namun, dengan kontrol PID, daya pompa diturunkan secara gradual saat sudut kemiringan mendekati nilai target (setpoint). Analisis ini didukung oleh temuan Rizk et al. (2024), yang menekankan bahwa kontroler PID yang terkalibrasi dengan baik mampu meredam osilasi pada sistem ballast robot bawah air, sehingga mempercepat pencapaian kondisi neutral buoyancy.

Selain aspek teknis, efisiensi waktu sebesar 49 menit 30 detik yang dihasilkan memiliki implikasi strategis terhadap manajemen energi wahana. Dalam operasional AUV, setiap detik penggunaan daya sangat berharga untuk memperpanjang durasi misi. Penghematan waktu persiapan hingga 50% berarti pengurangan beban kerja sistem kelistrikan sebelum misi penyelaman utama dimulai. Javid et al. (2020) mengemukakan bahwa efisiensi pada tahap persiapan (persiapan ballast) merupakan salah satu kunci utama dalam optimalisasi life-cycle baterai pada wahana benam modern.

3. Reduksi Human Error dan Keamanan Operasional

Aspek krusial lain yang ditemukan dalam pembahasan ini adalah minimalisasi risiko kesalahan manusia (human error). Prosedur manual yang memakan waktu 100 menit tidak hanya tidak efisien, tetapi juga rentan terhadap kesalahan input data tabulasi. Sistem

otomatisasi ini mengambil alih beban kognitif operator dengan melakukan validasi silang antara data sensor stabilitas dan sensor aliran air secara otomatis. Hasan et al. (2022) menegaskan bahwa integrasi multi-sensor dalam sistem navigasi dan stabilitas bawah air berfungsi sebagai lapisan keamanan tambahan (redundancy system) yang mencegah kegagalan katup atau ketidakseimbangan beban yang dapat membahayakan struktur wahana saat menerima tekanan hidrostatik tinggi.

Secara keseluruhan, temuan dalam penelitian ini membuktikan bahwa rancang bangun sistem kontrol otomatis bukan sekadar peningkatan fitur, melainkan reposisi mendasar dalam metodologi pengoperasian wahana bawah air. Pencapaian efisiensi waktu dan peningkatan akurasi stabilitas yang dihasilkan memvalidasi bahwa penggunaan teknologi mikrokontroler dan sensor modern mampu menjawab tantangan kompleksitas sistem ballast konvensional. Implikasinya, model kontrol ini dapat diadaptasi pada berbagai jenis wahana bawah air tak berawak lainnya untuk meningkatkan reliabilitas dan efektivitas eksplorasi laut dalam di masa depan (Wynn et al., 2022).

4. Kesimpulan

1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil rancang bangun, pengujian, dan analisis mendalam yang telah dilakukan, penelitian ini berhasil menyimpulkan beberapa poin fundamental terkait implementasi teknologi kontrol otomatis pada sistem stabilitas wahana bawah air. Integrasi sistem kontrol berbasis mikrokontroler dengan sensor MPU-6050 dan sensor aliran (flowmeter) terbukti mampu menjalankan fungsi pengaturan ballast secara akurat serta responsif, di mana penggunaan algoritma PID dalam sistem ini berhasil meminimalisir deviasi sudut dan mempercepat pencapaian kondisi well trim dengan tingkat presisi yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan metode manual konvensional. Pencapaian paling signifikan dalam penelitian ini adalah efisiensi operasional yang sangat masif, terlihat dari keberhasilan sistem otomatis mereduksi waktu pencapaian stabilitas wahana dari rata-rata 100 menit pada sistem manual menjadi hanya 50 menit 30 detik. Efisiensi waktu sebesar 49 menit 30 detik ini memberikan dampak langsung pada optimalisasi penggunaan energi baterai serta kesiapan wahana dalam melaksanakan misi penyelaman, sekaligus secara efektif meminimalisir peran human error dalam perhitungan tabulasi tangki yang rumit demi meningkatkan standar keamanan teknis wahana saat beroperasi di bawah tekanan hidrostatik. Secara keseluruhan, sistem ini menawarkan solusi inovatif yang andal, efisien, dan aplikatif untuk mendukung performa teknologi robotika bawah air modern.

Meskipun sistem kontrol otomatis ini telah menunjukkan performa yang unggul dalam pengujian prototipe, terdapat beberapa aspek yang dapat

dikembangkan lebih lanjut untuk mencapai kesempurnaan teknis di masa mendatang, salah satunya melalui pengembangan integrasi sensor tekanan yang lebih mumpuni guna memantau kedalaman secara real-time yang disinkronkan langsung dengan sistem ballast agar wahana dapat melakukan manuver perubahan kedalaman secara lebih dinamis dan otonom. Penelitian selanjutnya juga perlu mempertimbangkan penggunaan material komponen, terutama pada katup solenoid dan pompa, yang memiliki ketahanan lebih tinggi terhadap korosi air laut dalam jangka panjang melalui penggunaan material kelas maritim guna menjamin durabilitas sistem saat diaplikasikan pada lingkungan air laut yang sebenarnya. Selain itu, pengembangan antarmuka pengguna dapat ditingkatkan dengan fitur analisis data prediktif berbasis kecerdasan buatan untuk mengantisipasi perubahan densitas air laut secara mendadak, sehingga dengan adanya berbagai penyempurnaan tersebut, diharapkan sistem kontrol ballast otomatis ini dapat diimplementasikan secara luas pada berbagai jenis wahana bawah air tak berawak untuk mendukung eksplorasi laut dalam yang lebih aman dan produktif:

2. Rekomendasi

Berdasarkan analisis pada penelitian ini beberapa rekomendasi pengembangan penelitian yang dapat dilakukan di masa depan untuk memperkuat sistem tersebut:

1. Integrasi Sensor Tekanan (*Pressure Sensor*) untuk Kedalaman Otonom
Penelitian saat ini masih berfokus pada stabilitas orientasi (*well trim*) menggunakan gyroscope. Rekomendasi utama adalah mengintegrasikan sensor tekanan hidrostatik yang dikalibrasi dengan algoritma PID. Hal ini memungkinkan wahana tidak hanya stabil secara posisi (sudut), tetapi juga mampu mempertahankan kedalaman tertentu (*depth holding*) secara otomatis meskipun terjadi perubahan densitas air laut.
2. Implementasi Sistem Kendali Cerdas (*Fuzzy Logic atau AI*)
Mengingat lingkungan bawah laut bersifat dinamis dan non-linear, penggunaan PID konvensional mungkin menghadapi kendala saat menghadapi arus kuat atau perubahan salinitas ekstrem. Disarankan untuk mencoba pendekatan *Fuzzy Logic Controller* atau *Neural Network* yang dapat mengadaptasi parameter kontrol secara real-time tanpa perlu kalibrasi manual ulang saat kondisi lingkungan berubah.
3. Pengembangan Sistem Komunikasi Bawah Air (*Acoustic Telemetry*)
Untuk meningkatkan aspek otonom AUV, penelitian selanjutnya dapat menambahkan modul komunikasi akustik. Hal ini bertujuan agar data stabilitas dan volume ballast dapat dipantau dari permukaan secara nirkabel tanpa mengandalkan

- kabel umbilikal, yang sering kali membatasi pergerakan wahana pada kedalaman tinggi.
4. Analisis Pengaruh Tekanan Hidrostatik terhadap Laju Aliran
 Penelitian ini telah menggunakan flowmeter untuk memantau volume air. Namun, pada kedalaman yang lebih besar, tekanan luar akan menghambat kerja pompa (*back pressure*). Rekomendasi riset selanjutnya adalah menguji performa pompa ballast terhadap variasi tekanan (simulasi kedalaman) guna menentukan batas maksimal operasional (depth rating) sistem otomatis tersebut.
 5. Penggunaan Material Tangki dan Aktuator yang Lebih Ringan
 Untuk mengoptimalkan efisiensi energi yang telah dicapai (penghematan 50%), disarankan melakukan riset mengenai material tangki ballast menggunakan komposit atau polimer berkekuatan tinggi serta penggunaan katup solenoid yang lebih hemat daya (low power consumption). Hal ini akan memperpanjang daya tahan baterai selama misi eksplorasi jangka panjang.
 6. Uji Coba pada Lingkungan Air Laut (*Field Test*)
 Karena penelitian ini masih berbasis eksperimental laboratorium (tangki simulasi), sangat direkomendasikan untuk melakukan pengujian di lingkungan air laut terbuka. Hal ini penting untuk memvalidasi ketahanan korosi pada sensor dan melihat pengaruh arus laut serta turbulensi terhadap akurasi algoritma PID yang digunakan..
- [4] S. Boran, M. Demir, and A. Yilmaz, "Smart ballast systems in submersible robotics: Efficiency and stability analysis," *Int. J. Control Autom.*, vol. 10, no. 4, pp. 45–59, 2022.
- [5] P. Buranasiri et al., "Automatic ballast control system for small AUV," *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 1, pp. 30–42, 2017.
- [6] M. Javaid, A. Haleem, and R. P. Singh, "Impact of hydrostatic pressure on AUV buoyancy control systems: A technical review," *Ocean Eng.*, vol. 216, p. 108124, 2020.
- [7] A. P. Purba, "Rancang bangun sistem kontrol ballast otomatis berbasis mikrokontroler," Undergraduate Thesis, Dept. Mech. Eng., STTAL, Surabaya, Indonesia, 2021.
- [8] M. Hasan, R. Khan, and J. Liu, "Sensor fusion and integration for underwater navigation stability," *IEEE Sensors J.*, vol. 22, no. 8, pp. 7540–7552, 2022.
- [9] M. Rizk, S. Ali, and T. Hassan, "PID control optimization for depth control in underwater robots," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 162, pp. 104–118, 2024.
- [10] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2010.
- [11] InvenSense Inc., "ITG-3200 Specification Data Sheet by Spark Fun Electronics," Digi-Key Electronics, ITG-3200 Datasheet, pp. 4–38, 2010.
- [12] E. E. Allmendinger, *Submersible Vehicle Systems Design*. Alexandria, VA, USA: Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), 1990.
- [13] O. L. Koon, L. C. Kong, and T. C. Wee, "Introduction to Submarine Design," Defence Science and Technology Agency (DSTA), Aug. 2010. [Online]. Available: <https://www.dsta.gov.sg>
- [14] A. Ghuri, *Dasar-Dasar Mekanika Fluida*, 1st ed. Denpasar, Indonesia: Universitas Udayana, 2014.
- [15] A. Baedowi, "Rancang bangun prototype keseimbangan kapal terhadap beban berat dengan menggunakan gyroscope berbasis Arduino Uno," *J. Tek. Kelautan*, vol. 4, no. 2, pp. 4–6, 2018.
- [16] K. L. Yana, K. R. Dantes, and N. Rihendra, "Rancang bangun mesin pompa air dengan sistem recharging," *J. Jurusan Pendidik. Tek. Mesin (JJPTM)*, vol. 8, no. 2, pp. 12–25, 2017.
- [17] R. B. Wynn et al., "Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the marine sciences," *Marine Policy*, vol. 135, p. 104119, 2022.

Referensi

- [1] T. I. Fossen, *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2021.
- [2] M. F. Ahmad and J. Jalani, "Advanced control systems for Autonomous Underwater Vehicles: A review," *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 15, no. 2, pp. 112–128, 2023.
- [3] J. P. Panda, B. Das, and R. Kumar, "A review on the development of autonomous underwater vehicles," *Ocean Eng.*, vol. 199, p. 107120, 2020.