

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian tentang pemodelan sistem ballast kapal selam autonomous dengan OpenModelica telah memberikan beberapa temuan signifikan. Analisis data menunjukkan korelasi terbalik yang konsisten antara massa beban dan kebutuhan volume tangki ballast. Penambahan beban 50 kg secara konsisten menurunkan kebutuhan volume tangki ballast sebesar 0,05 m³ dan mengurangi gaya apung sekitar 50 kg. Fenomena ini membuktikan prinsip Archimedes bahwa UUV berbeban lebih berat memerlukan lebih sedikit air ballast untuk mencapai kesetimbangan netral.

OpenModelica terbukti sangat efektif sebagai platform simulasi untuk menganalisis daya apung, stabilitas, dan kinerja sistem tangki ballast UUV dalam variasi beban. Dalam aspek analisis daya apung, platform ini berhasil memodelkan perubahan daya apung berdasarkan variasi densitas air pada kedalaman berbeda dan mampu mensimulasikan kondisi netral, positif, dan negatif buoyancy secara akurat dengan mengintegrasikan perhitungan gaya apung dengan kondisi hidrodinamika real-time. Untuk analisis stabilitas, simulasi menunjukkan bahwa pergeseran center of gravity tetap minimal dengan koordinat longitudinal berubah dari 7,24 m menjadi 7,25 m dan koordinat vertikal turun dari 1,08 m menjadi 1,07 m, dimana stabilitas statis tetap terjaga dengan pusat gravitasi berada di bawah pusat daya apung, bahkan menunjukkan peningkatan stabilitas karena penambahan payload menurunkan center of gravity.

Dalam hal kinerja sistem kendali, kontrol PID dengan feed-forward yang dioptimalkan ($k=0,11$, $T_i=200$, $T_d=85$, $k_{FF}=0,25$) menghasilkan respons yang stabil tanpa overshoot signifikan, dengan waktu penyelaman konsisten sekitar 10.000 detik untuk mencapai kedalaman 2000 meter pada semua variasi beban dan kecepatan penyelaman yang stabil di 0,2

m/s. Implementasi hysteresis dengan batas -1,5 hingga 1,5 meter berhasil mencegah osilasi dan memberikan kontrol yang presisi. Keunggulan simulasi OpenModelica meliputi efisiensi biaya dan waktu dibandingkan eksperimen fisik, kemampuan pengujian multiple skenario dalam lingkungan yang terkontrol, validasi desain sistem sebelum implementasi nyata, serta analisis parameter optimal. Model yang dikembangkan memberikan respons transien yang lebih baik dibandingkan penelitian sebelumnya, khususnya dalam operasi yang hanya menggunakan ballast tanpa propulsi, sehingga menjadi fondasi yang solid untuk merancang sistem ballast yang efisien dan stabil untuk berbagai aplikasi UUV dalam mendukung strategi pertahanan maritim Indonesia.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, berikut beberapa saran untuk pengembangan dan penelitian lanjutan.

1. Pengembangan Model yang Lebih Kompleks

Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan model dengan mempertimbangkan faktor eksternal seperti arus laut dan turbulensi yang mempengaruhi kinerja sistem ballast dalam kondisi operasional nyata.

2. Integrasi dengan Sistem Propulsi

Eksplorasi integrasi sistem ballast dengan sistem propulsi untuk meningkatkan efisiensi energi dan manuver UUV secara keseluruhan, sesuai dengan temuan pada penelitian sebelumnya yang menunjukkan keunggulan kerja kooperatif.

3. Implementasi dan Validasi Eksperimental

Mengimplementasikan model simulasi ke dalam prototipe fisik untuk validasi dan evaluasi kinerja sistem dalam kondisi nyata, memberikan wawasan tentang kesenjangan antara model simulasi dan sistem fisik.