

SIMULASI DAN ANALISIS SISTEM STABILISASI PADA SUDUT PITCH ELECTRIC HYDROFOIL SURFBOARD

*Arif Ilham Ramadhan¹, Mochammad Ariyanto², Joga Dharma Setiawan²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: arifilhamrr@gmail.com

Abstrak

Inovasi Electric hydrofoil surfboard (eFoil) dalam olahraga air memungkinkan peselancar untuk meluncur di atas permukaan air tanpa bergantung pada ombak, namun stabilitas, terutama pada sudut pitch, menjadi faktor krusial untuk menjamin keselamatan dan kenyamanan pengguna. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis stabilitas dan merancang sistem kontrol untuk stabilisasi sudut pitch pada eFoil melalui pemodelan matematis sistem dengan 3 derajat kebebasan (surge, heave, pitch). Model ini diimplementasikan dalam perangkat lunak MATLAB-Simulink dengan memperhitungkan secara akurat berbagai gaya yang bekerja, seperti gaya angkat, hambat, berat, dorong, dan apung. Hasil simulasi pada skema open-loop menunjukkan bahwa sistem secara inheren tidak stabil, yang ditandai dengan sudut pitch yang terus meningkat tanpa batas. Untuk mengatasi masalah ini, dirancang sebuah sistem kontrol feedback menggunakan kontroler PID (Proportional-Integral-Derivative). Parameter gain PID (K_p , K_i , K_d) kemudian dioptimalkan menggunakan Algoritma Genetika dengan fungsi objektif Integral Time Absolute Error (ITAE) untuk mendapatkan respons sistem yang cepat dan minim overshoot. Dengan implementasi kontroler PID yang telah dioptimalkan ($K_p=52,71$; $K_i=99,99$; $K_d=3,84$), sistem closed-loop berhasil mencapai stabilitas. Respons sistem menunjukkan settling time sekitar 2 detik dengan steady-state error yang dapat diabaikan, membuktikan bahwa penggunaan kontroler PID sangat efektif untuk menstabilkan sudut pitch eFoil, yang secara langsung juga meningkatkan performa dan keamanan wahana secara keseluruhan.

Kata kunci: algoritma genetika; *electric hydrofoil surfboard*; kontrol pid; matlab-simulink; stabilitas pitch

Abstract

The innovation of the Electric Hydrofoil Surfboard (eFoil) in water sports allows surfers to glide above the water surface without relying on waves; however, stability, particularly in the pitch angle, is a crucial factor for ensuring user safety and comfort. This research aims to analyze the stability and design a control system for pitch angle stabilization on the eFoil through the mathematical modeling of a system with 3 degrees of freedom (surge, heave, pitch). This model is implemented in MATLAB-Simulink software, accurately accounting for the various forces at play, such as lift, drag, weight, thrust, and buoyancy. Simulation results in an open-loop scheme show that the system is inherently unstable, characterized by a pitch angle that increases indefinitely. To address this issue, a feedback control system using a PID (Proportional-Integral-Derivative) controller was designed. The PID gain parameters (K_p , K_i , K_d) were then optimized using a Genetic Algorithm with an Integral Time Absolute Error (ITAE) objective function to achieve a fast system response with minimal overshoot. With the implementation of the optimized PID controller ($K_p=52.71$; $K_i=99.99$; $K_d=3.84$), the closed-loop system successfully achieved stability. The system's response shows a settling time of approximately 2 seconds with negligible steady-state error, proving that the use of a PID controller is highly effective for stabilizing the eFoil's pitch angle, which in turn enhances the vehicle's overall performance and safety.

Keywords: *electric hydrofoil surfboard*; genetic algorithm; matlab-simulink; pitch stability; pid control

1. Pendahuluan

Dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan *electric hydrofoil surfboard* (eFoil) mengalami peningkatan signifikan seiring berkembangnya teknologi kendaraan listrik, terbukti dari banyaknya paten terkait [1–3] dan produk komersial seperti Fliteboard dan Lift Foils. eFoil adalah perangkat olahraga air yang menggabungkan teknologi *hydrofoil* dengan motor listrik untuk memberikan daya dorong, memungkinkan papan melayang di atas permukaan air. Berbeda dari *surfboard* konvensional, eFoil tidak bergantung pada ombak [4]. Teknologi ini mampu mencapai kecepatan hingga 14, m/s dan kapasitas angkut 120 kg [5].

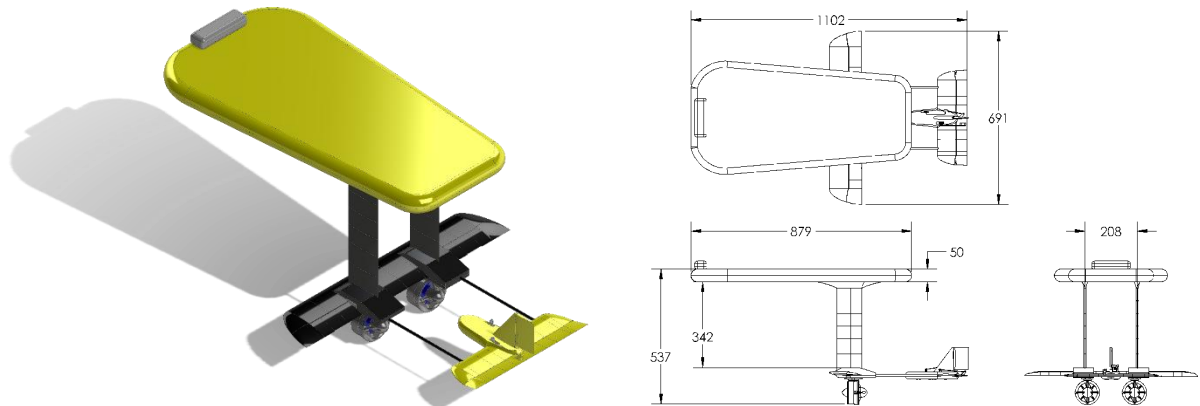
Penerapan hydrofoil pada kapal terbukti mampu mengurangi hambatan dan meningkatkan efisiensi energi antara 30% hingga 50% [6,7]. Namun, untuk menjamin keamanan dan kenyamanan pengguna eFoil, faktor stabilitas menjadi

sangat krusial. Analisis stabilitas, khususnya pada sumbu pitch, diperlukan untuk pengendalian gerak [2] dan menjadi tahapan penting dalam perancangan eFoil agar dapat diakses oleh berbagai kalangan [8].

Penelitian ini berfokus pada analisis stabilitas longitudinal (sudut *pitch*) dari sebuah eFoil. Analisis dilakukan dengan memodelkan persamaan dinamik sistem dalam MATLAB-Simulink untuk mengamati respons alaminya. Selanjutnya, dirancang sebuah sistem kontrol PID (*Proportional-Integral-Derivative*) yang nilai *gain*-nya dioptimalkan menggunakan Algoritma Genetika (GA) untuk mencapai stabilitas yang diinginkan secara efisien.

2. Bahan dan Metode Penelitian

Model yang dianalisis adalah sebuah eFoil dengan konfigurasi *fully submerged hydrofoil*. Model 3D dan gambar proyeksi dibuat menggunakan SOLIDWORKS 2023 yang dapat dilihat pada Gambar 1. Material utama terdiri dari styrofoam untuk papan dan PLA+ untuk tiang, sayap, dan elevator. Dari analisis CAD, diperoleh massa total platform sebesar 2,5kg dan momen inersia terhadap sumbu y (I_{yy}) sebesar 0,325 kgm². Sistem ini digerakkan oleh dua buah *thruster* Blue Robotics T100 yang diatur oleh ESC Basic R3, dan memiliki *control surface* berupa *flap* pada elevator yang digerakkan oleh servo DS3225.



Gambar 1. Model 3D dan Proyeksi serta dimensi dari efoil

Pemodelan Dinamik

Model dinamik sistem disederhanakan menjadi 3 derajat kebebasan (3-DOF): gerak translasi pada sumbu x (surge), sumbu z (heave), dan rotasi terhadap sumbu y (pitch). Gaya-gaya yang diperhitungkan meliputi gaya angkat, hambat, berat, dorong, dan apung. Profil hydrofoil yang digunakan adalah Eppler-817 untuk sayap utama, NACA0010 untuk elevator, dan NACA 16009 untuk tiang (mast). Koefisien hidrodinamik (C_L dan C_D) diperoleh dari database Airfoil Tools (berbasis XFOIL) dan diinterpolasi dalam Simulink berdasarkan Bilangan Reynolds dan sudut serang.

Persamaan gerak sistem yang dapat dilihat pada Gambar 2 dirumuskan sebagai berikut:

- Gerak Arah Horizontal (Surge):

$$m\ddot{x} = \sum F_x = T \cos\theta - T_x - D_w - D_n - D_m - D_s - D_e - D_{SR} - D_R \quad (1)$$

dengan komponen gaya yang ada pada arah *surge* dapat dilihat pada Tabel 1 berikut ini

Tabel 1. Komponen gaya pada gerak *surge*

$T_x = T \cos\theta$	$D_s = \frac{1}{2} \rho (AF)_s \dot{x} \dot{x} C_{D_s}$
$D_w = \frac{1}{2} \rho (AF)_w \dot{x} \dot{x} C_{D_w}$	$D_e = \frac{1}{2} \rho (AF)_e \dot{x} \dot{x} C_{D_e}$
$D_n = \frac{1}{2} \rho (AF)_n \dot{x} \dot{x} C_{D_n}$	$D_{SR} = \frac{1}{2} \rho (AF)_{SR} \dot{x} \dot{x} C_{D_{SR}}$
$D_m = \frac{1}{2} \rho (AF)_m \dot{x} \dot{x} C_{D_m}$	$D_R = \frac{1}{2} \rho (AF)_R \dot{x} \dot{x} C_{D_R}$

- Gerak Arah Vertikal (Heave):

$$m\ddot{z} = \sum F_z = W - D_z - T_z - L_w - F_A - L_e \quad (2)$$

dimana W adalah gaya berat, L_w dan L_e adalah gaya angkat pada *wing* dan elevator, F_A adalah gaya apung, dan D_z adalah gaya redam vertikal. Adapun komponen gaya tersebut dapat dilihat pada Tabel 2 berikut ini

Tabel 2. Komponen gaya pada gerak *heave*

$W = mg$	$L_w = \frac{1}{2} \rho (AP)_w \dot{x}^2 C_{L_w}$
$D_z = \frac{1}{2} \rho (AF)_z C_{D_z} \dot{z} \dot{z} $	$F_A = \rho g V$
$T_z = T \sin \theta$	$L_e = \frac{1}{2} \rho (AP)_e \dot{x}^2 C_{L_e}$

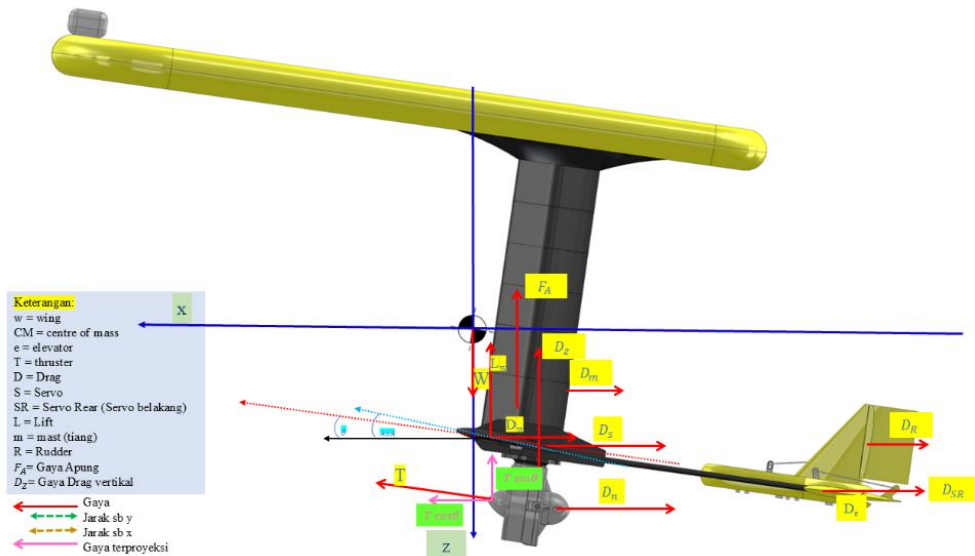
3. Gerak Rotasi (Pitch) :

$$I_y \ddot{\theta} = \sum M_{CM} = -M_{T_x} + M_{T_z} + M_{L_w} + M_{L_e} + M_{D_w} + M_{D_m} + M_{D_s} + M_{D_n} + M_{D_R} + M_{D_e} + M_{D_{SR}} \quad (3)$$

Dimana adalah total momen yang dihasilkan setiap gaya terhadap pusat massa. Momen dihasilkan dari gaya yang bekerja pada *efoil*, yang dapat dilihat pada Tabel 3 berikut ini.

Tabel 3. Komponen momen gaya terhadap pusat massa pada gerak *pitch*

Momen akrobat Gaya Dorong	Momen akrobat Gaya angkat	Momen akrobat gaya hambat		
$M_{T_x} = T \cos \theta L_{T_x}$	$M_{L_w} = L_w L_{L_w}$	$M_{D_w} = D_w L_{D_w}$	$M_{D_n} = D_n L_{D_n}$	$M_{D_{SR}} = D_{SR} L_{D_{SR}}$
$M_{T_z} = T \sin \theta L_{T_z}$	$M_{L_e} = L_e L_{L_e}$	$M_{D_m} = D_m L_{D_m}$	$M_{D_R} = D_R L_{D_R}$	
		$M_{D_s} = D_s L_{D_s}$	$M_{D_e} = D_e L_{D_e}$	



Gambar 2. Diagram benda bebas *efoil*

Desain Sistem Kontrol dan Optimasi

Untuk menstabilkan sudut pitch, digunakan kontroler PID dengan persamaan:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \left(\frac{de(t)}{dt} \right) \quad (4)$$

di mana $u(t)$ adalah sinyal kontrol (sudut defleksi flap elevator) dan $e(t)$ adalah error antara sudut pitch referensi dan aktual.

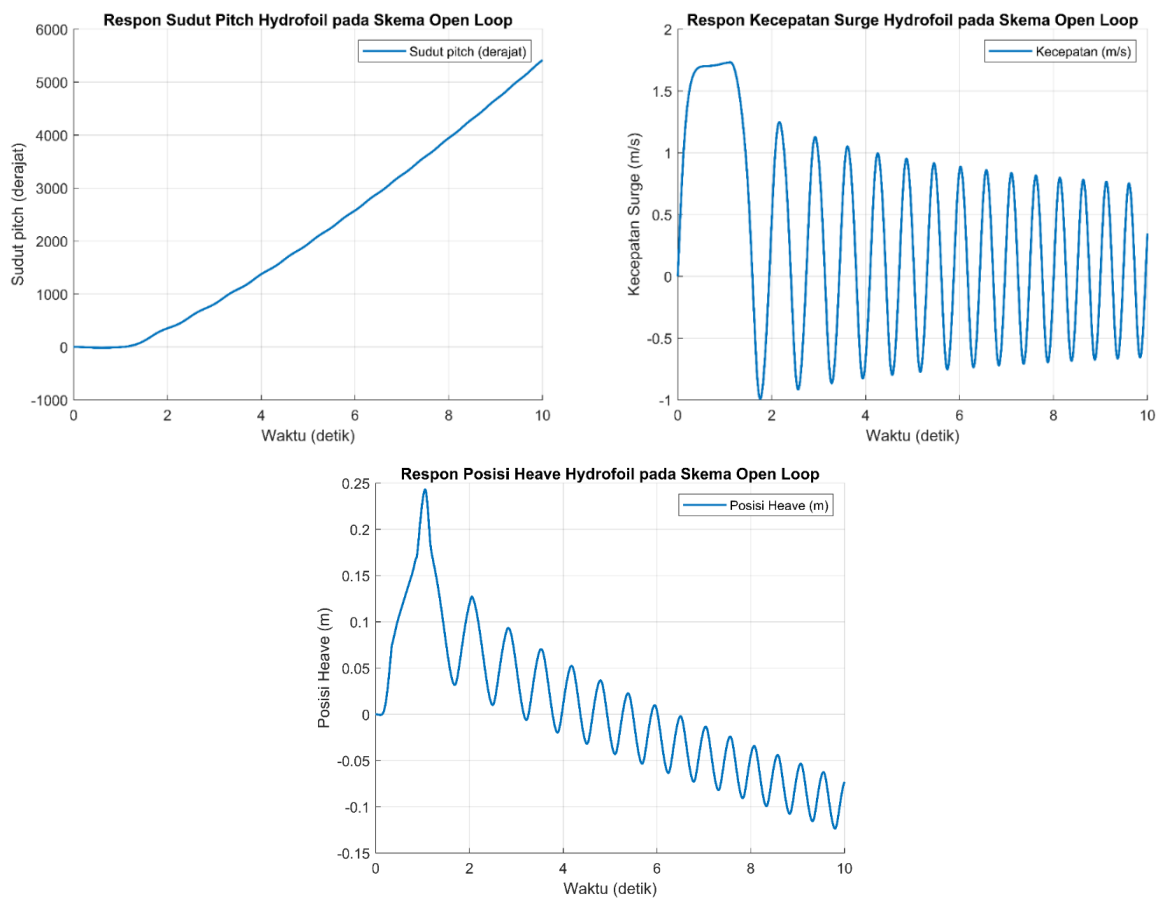
Pencarian nilai gain optimal (K_p , K_i , K_d) dilakukan menggunakan Algoritma Genetika (GA), sebuah metode optimasi yang terinspirasi dari evolusi biologis [9]. Fungsi objektif yang diminimalkan adalah *Integral Time Absolute Error* (ITAE) untuk mendapatkan respons yang cepat dengan overshoot minimal [10]. Parameter GA yang digunakan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Parameter yang diatur pada *setup* Algoritma Genetika

No.	Parameter	Nilai
1	Jumlah variabel	3
2	Upper bound	[100 100 100]
3	Lower bound	[0 0 0]
4	Generations	50
5	Population size	100

3. Hasil dan Pembahasan Respons Sistem Open-Loop

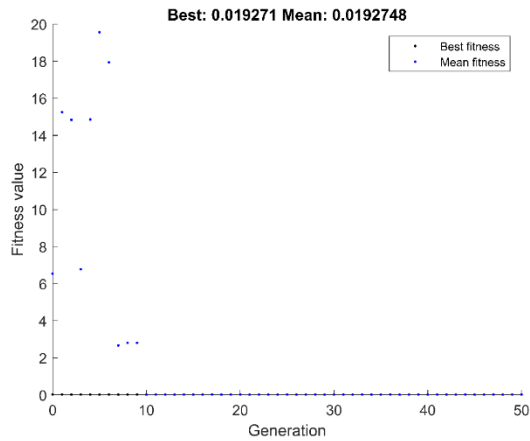
Simulasi *open-loop* (tanpa kontroler) dilakukan dengan memberikan input defleksi *flap* sebesar 0 derajat. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem secara inheren tidak stabil. Seperti terlihat pada Gambar 3, sudut *pitch* terus meningkat secara drastis, mencapai lebih dari 5000 derajat dalam 10 detik, yang mengindikasikan ketidakstabilan divergen. Ketidakstabilan *pitch* ini berdampak pada gerak lainnya. Kecepatan *surge* mengalami osilasi hebat setelah mencapai puncak 1,7 m/s, akibat terjadinya *stall* hidrodinamik yang meningkatkan gaya hambat secara signifikan. Posisi *heave* juga menunjukkan osilasi teredam setelah tenggelam sejauh 0,245 m.



Gambar 3. Respon sudut *pitch*, kecepatan *surge*, dan posisi *heave* pada skema *open loop*

Hasil Optimasi Algoritma Genetika

Proses optimasi GA dijalankan selama 50 generasi untuk meminimalkan nilai ITAE. Grafik konvergensi pada Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai *fitness* mencapai kestabilan setelah generasi ke-10. Hasil optimasi memberikan nilai *gain* PID sebagai berikut: $K_p = 52,7137$, $K_i = 99,9998$, dan $K_d = 3,8461$, dengan nilai ITAE terbaik sebesar 0,0193.

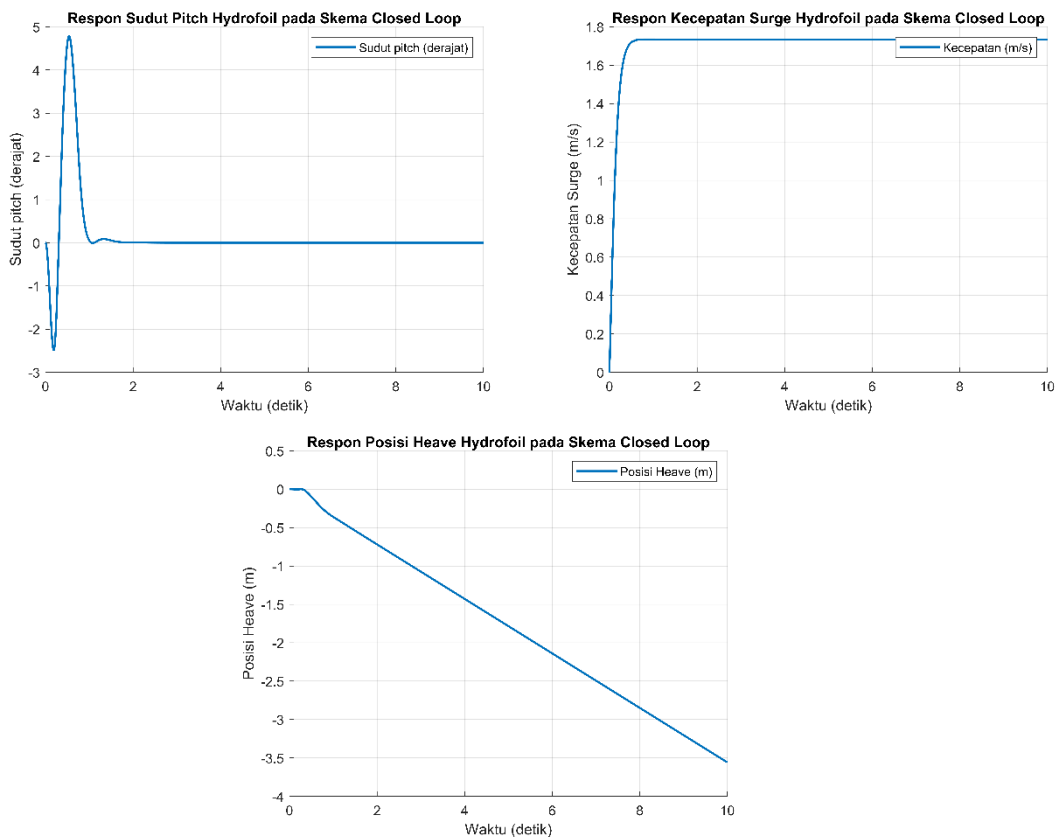


Gambar 4. Grafik konvergensi algoritma genetika terhadap *fitness value*

Respons Sistem Closed-Loop

Dengan menerapkan *gain* PID hasil optimasi, sistem *closed-loop* berhasil distabilkan. Respons sudut *pitch* menunjukkan sistem mencapai kondisi *steady-state* pada nilai referensi 0 derajat. Karakteristik respons transiennya meliputi *settling time* sekitar 2 detik dan *overshoot* maksimum mendekati 5 derajat, dengan *steady-state error* yang dapat diabaikan.

Kestabilan *pitch* ini berdampak positif pada performa gerak lainnya. Kecepatan *surge* kini mampu berakselerasi dengan mulus dan stabil pada kecepatan jelajah sekitar 1,75 m/s, karena fenomena *stall* dapat dihindari. Respons posisi *heave* menunjukkan bahwa eFoil bergerak naik (terbang) secara kontinu dengan kecepatan relatif konstan. Hal ini terjadi karena pada kecepatan dan sudut *pitch* yang stabil, total gaya angkat yang dihasilkan lebih besar dari berat total sistem. Perilaku ini juga mengindikasikan bahwa sistem bersifat *underactuated*, di mana kontroler tunggal pada *flap* elevator diprioritaskan untuk menjaga stabilitas *pitch*.



Gambar 5. Respon sudut *pitch*, kecepatan *surge*, dan posisi *heave* pada skema *closed loop*

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan model matematika 3-DOF untuk *electric hydrofoil surfboard* dan mengimplementasikannya dalam MATLAB-Simulink. Analisis *open-loop* menunjukkan bahwa sistem secara inheren tidak stabil pada sumbu *pitch*. Penerapan sistem kontrol *feedback* dengan kontroler PID, yang parameternya dioptimalkan menggunakan Algoritma Genetika dengan fungsi objektif ITAE, terbukti sangat efektif untuk menstabilkan sudut *pitch*. Sistem *closed-loop* berhasil mencapai kestabilan dengan *settling time* sekitar 2 detik dan *steady-state error* yang dapat diabaikan, yang secara signifikan meningkatkan performa dan keamanan wahana secara keseluruhan.

5. Daftar Pustaka

- [1] Geislinger C. HYDROFOIL, 2017.
- [2] Langelaan JW. POWERED HYDROFOIL BOARD, 2016.
- [3] Langelaan JW. WEIGHT-SHIFTCONTROLLED PERSONAL HYDROFOIL WATERCRAFT, 2016.
- [4] Voigt K, Strand F. Development of the World ' s First eFoil Simulator 2023.
- [5] Zhao Z, Zhai Y, Gao C, Ding W, Yan R, Gao S, et al. Sea-U-Foil: A Hydrofoil Marine Vehicle with Multi-Modal Locomotion. Proc - IEEE Int Conf Robot Autom 2024:8341–7. <https://doi.org/10.1109/ICRA57147.2024.10610853>.
- [6] Godø JMK, Steen S, Faltinsen OM. A resistance model for hydrofoil fast ferries with fully submerged foil systems. Ocean Eng 2024;301. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117503>.
- [7] Niloy RS, Dipto MJ, Hassan MMM. Hydrodynamic Performance Analysis of Hydrofoil Supported High-Speed Vessel Using Computational Fluid Dynamics. SSRN Electron J 2023:1–5. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4451487>.
- [8] Bagué A, Degroote J, Demeester T, Lataire E. Dynamic Stability Analysis of a Hydrofoiling Sailing Boat using CFD. J Sail Technol 2021;6:58–72. <https://doi.org/10.5957/jst/2021.6.1.58>.
- [9] Holland JH. Genetic Algorithms. Sci Am 1992;267:66–73.
- [10] Sahib MA, Ahmed BS. A new multiobjective performance criterion used in PID tuning optimization algorithms. J Adv Res 2016;7:125–34.