

Implementasi Kontrol PID *Ziegler – Nichols* untuk Penyelaman pada Robot Bawah Air Otonom *Hydroships*

Ihwanul Sobirin¹, Joko Endrasmono², Dimas Pristovani Riananda³, Purwidi Asri⁴, Mohammad Abu Jami'in⁵, Ii Munadhif⁶, Ryan Yudha Adhitya⁷, Agus Khumaidi⁸, Khoirul Hasin⁹, Isa Rachman¹⁰

e-mail: ihwanulsobirin@student.ppns.ac.id¹, jokoendrasmono@ppns.ac.id², dimaspristovani@ppns.ac.id³, purwidi@ppns.ac.id⁴, jammysby@gmail.com⁵, iimunadhif.its@gmail.com⁶, ryanyudhaadhitya@ppns.ac.id⁷, aguskhumaidi@ppns.ac.id⁸, khairul.hasin@ppns.ac.id⁹, isarachman@ppns.ac.id¹⁰

^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}Program Studi Teknik Otomasi, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jalan Teknik kimia, Keputih, Sukolilo, Surabaya, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 15 Juni 2024
Direvisi 23 Juni 2024
Diterbitkan 31 Juli 2024

Kata kunci:

Kontrol PID
Robot Bawah Air
AUV
Kestabilan Penyelaman

ABSTRAK

Robot bawah air beroperasi dan dikendalikan dalam air untuk berbagai tugas seperti penelitian, operasi SAR, dan perlindungan infrastruktur. Terdapat dua jenis utama: Remotely Operated Vehicle (ROV), yang dikendalikan manual, dan Autonomous Underwater Vehicle (AUV), yang beroperasi secara otomatis. Tim HYDROships dari Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya mengembangkan AUV untuk mendeteksi korban kecelakaan dan objek bawah air. Stabilitas AUV di bawah permukaan laut sangat penting untuk mencegah kecelakaan. Kontrol PID Ziegler - Nichols digunakan untuk menjaga kestabilan penyelaman AUV. Pada pengujian, kendali penyelaman prototipe AUV dengan parameter PID $K_p = 9,269$; $K_i = 5,65$; $K_d = 8,55$ mampu untuk mendapatkan respon yang baik dengan nilai respon terbaik, *rise time* sebesar 1,35 detik, *settling time* sebesar 3,2 detik dan *overshoot* sebesar 7,4%. Hasil penelitian menunjukkan parameter PID Ziegler-Nichols memberikan *rise time* cepat, tetapi *overshoot* besar, sedangkan fine-tuning PID memberikan respon lebih baik secara keseluruhan.

ABSTRACT

Underwater robots operate and are controlled underwater for various tasks such as research, SAR operations, and infrastructure protection. There are two main types: Remotely Operated Vehicle (ROV), which is manually controlled, and Autonomous Underwater Vehicle (AUV), which operates automatically. The HYDROships team from the Surabaya State Shipping Polytechnic developed an AUV to detect accident victims and underwater objects. AUV stability underwater is crucial to prevent accidents. The Ziegler-Nichols PID control is used to maintain AUV diving stability. In testing, the AUV prototype dive control with PID parameters $K_p = 9.269$; $K_i = 5.65$; $K_d = 8.75$ achieved a good response with the best values: rise time of 1.35 seconds, settling time of 3.2 seconds, and overshoot of 7.4%. The research results show that the Ziegler-Nichols PID parameters provide a fast rise time but a large overshoot, whereas fine-tuning the PID provides a better overall response.

Keywords:

PID Control
Underwater Robot
AUV
Diving Stability

Penulis Korespondensi:

Ihwanul Sobirin,



Jurusan Teknik Otomasi,
Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya,
Jalan Teknik Kimia Kampus ITS, Surabaya, Indonesia.
Email: ihwanulsobirin@student.pppns.ac.id
Nomor HP/WA aktif: +6287705046212

1. PENDAHULUAN

Robot bawah air merupakan robot yang beroperasi dan dikendalikan di dalam air dengan jarak yang jauh, robot seperti ini biasanya digunakan untuk penelitian bawah air, operasi SAR, perlindungan infrastruktur penting bawah air, dan operasi bawah air lainnya[1]. Robot bawah air memiliki beberapa jenis, yang paling umum digunakan dapat dibagi menjadi dua kategori utama yaitu *Remotely Operated Vehicle* (ROV) dan *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV). *Remotely Operated Vehicle* (ROV) merupakan robot bawah air yang dikendalikan oleh operator secara manual menggunakan remote. Sedangkan *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) merupakan robot bawah air yang mampu bergerak secara otomatis tanpa memerlukan kendali langsung oleh operator selama kondisi program robot masih terpenuhi[2].

Remotely Operated Vehicle (ROV) memiliki keterbatasan signifikan pada mobilitas yaitu penggunaan tambatan kabel, yang mengarahkan para ilmuwan dan insiyur untuk mengembangkan *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV). Otonomi, sistem kendali, dan penentuan posisi yang canggih memungkinkan AUV untuk menjalankan banyak tugas sipil dan militer[3]. Tim HYDROships dari Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya adalah tim riset yang berfokus pada pengembangan robot bawah air. Tim HYDROships akan mengembangkan inovasi prototipe AUV yang memiliki misi menyelam di kedalaman laut dan mampu mendeteksi adanya korban kecelakaan, bangkai kapal, serta objek yang lainnya. Dalam pengoperasiannya, *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) harus menghadapi gelombang laut yang menyebabkan prototipe tersebut berguncang selama bergerak. Kondisi seperti ini mengharuskan prototipe AUV tetap stabil atau mampu menjaga posisinya secara konsisten saat berada di bawah permukaan laut[4].

Sistem kestabilan pada prototipe AUV menjadi poin yang penting untuk mencegah terjadinya kecelakaan yang dapat membahayakan misi atau merusak prototipe AUV itu sendiri. Tanpa kemampuan untuk mempertahankan stabilitas, risiko kecelakaan menjadi tinggi, terutama dalam kondisi laut yang tidak menentu dan penuh tantangan. Oleh karena itu, diperlukan pengendalian parameter tertentu untuk menjaga kestabilan penyelaman (*heave*) prototipe AUV[5]. Algoritma yang pada umumnya digunakan untuk mengontrol kestabilan gerakan robot adalah kontrol PID. Metode kontrol PID terdiri dari tiga mode pengaturan yaitu kontrol *Proportional* (P), *Integral* (I) dan *Derivative* (D), masing-masing kontrol mempunyai kelebihan dan kekurangan. Dalam merancang sistem kontrol PID, langkah kuncinya adalah menyesuaikan parameter kontrol P, I, atau D agar respon *output* sistem terhadap *input* tertentu sesuai dengan yang diinginkan[6].

Pada tahun 2018, penelitian terhadap implementasi metode PID untuk kestabilan penyelaman pada *Robot Underwater ROV (Remotely Operated Vehicle)* telah dilakukan oleh Anggi Roppon, dkk. yang berjudul "Implementasi Kendali PID untuk Kestabilan Penyelaman pada Robot Underwater ROV (Remotely Operated Vehicle)". Pada penelitian ini, robot dirancang untuk menjaga kestabilan penyelaman dengan menggunakan pengendali PID. Pada penelitian ini menghasilkan nilai konstanta PID yang tepat untuk kestabilan penyelaman pada ROV yaitu $K_p = 2.2$, $K_i = 0.5$, dan $K_d = 0.01$. Dengan parameter PID tersebut robot dapat mencapai kedalaman 1,5 meter dengan waktu 11 detik dan mampu menjaga kestabilan penyelaman dengan baik[7].

Penelitian terhadap implementasi metode PID pada *underwater remotely operated vehicle* (ROV) telah dilakukan pada tahun 2023 oleh Fauzal Naim Zohedi, dkk. yang berjudul "*System Identification (SI) Modelling, Controller Design and Hardware Testing for Vertical Trajectory of Underwater Remotely Operated Vehicle* (ROV)". Pada penelitian ini, kontrol PID digunakan untuk pemodelan dan kontrol *vertical trajectory* agar ROV dapat mempertahankan kedalaman pada posisi tertentu. Penelitian ini menghasilkan tingkat kesesuaian terbaik replikasi *trajectory movement* ROV sebesar 84,7% dengan persentase *overshoot* 0,8%, dan menghilangkan *error steady-state* dari 11,4 menjadi 0, serta *settling time* (T_s) 4,37 detik[8].

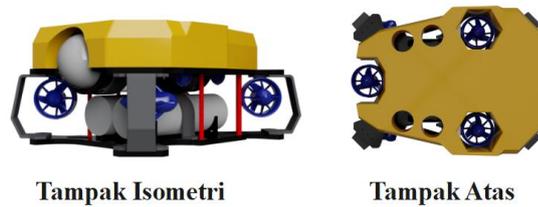


Berdasarkan beberapa penelitian diatas, peneliti memutuskan membuat kontrol robot otonom bawah air menggunakan metode PID untuk memperoleh persentase *error steady state*, *risetime*, dan *settling time* yang kecil sehingga mendapatkan sistem yang optimal. Penelitian ini bertujuan agar objek yang diteliti yaitu *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) dapat mempertahankan kestabilan penyelaman pada posisi tertentu sehingga prototipe AUV dapat beroperasi secara optimal dalam melakukan misi.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Perancangan Mekanik

Rancangan sistem mekanik *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) terdiri dari desain prototipe AUV, rancangan sistem propulsi prototipe AUV, dan tata letak komponen pendukung.

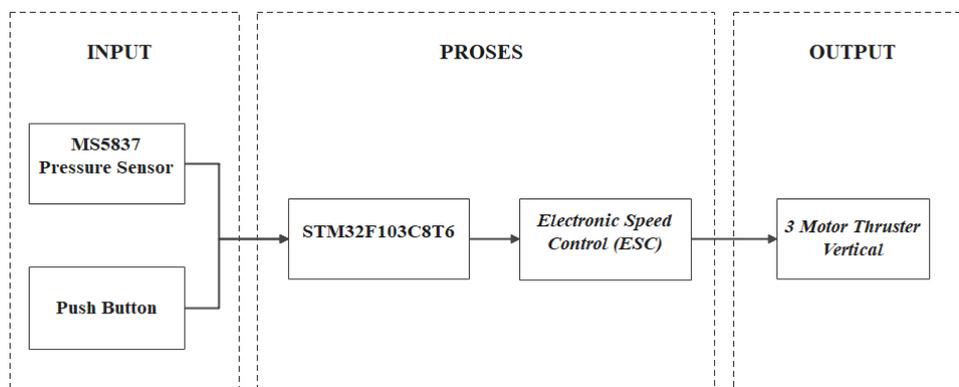


Gambar 1 : Desain Prototipe AUV

Gambar 1 merupakan perancangan mekanik dari prototipe AUV dimana bahan untuk rangka model AUV menggunakan HDPE dengan tebal 12 mm yang dipotong menggunakan teknologi *laser cut* sesuai dengan desain frame yang telah dibuat. Prototipe AUV ini memiliki panjang 59 cm, lebar 42 cm, tinggi 28 cm, dan berat sebesar 25 Kg. Prototipe AUV ini memiliki 7 buah motor *thruster* dengan konfigurasi 4 buah motor yang disusun secara *horizontal* dengan kemiringan 45° dari *center body* dan 3 buah motor yang disusun secara *vertical*. Motor yang digunakan adalah motor *thruster* BLDC T200, motor BLDC dipilih karena memiliki keunggulan meliputi efisiensi tinggi, perawatan yang lebih murah, serta bisa berputar dengan kecepatan tinggi karena adanya pengurangan gesekan dengan sikat[9]. Prototipe AUV juga dilengkapi dengan sistem *ballast* tetap yang digunakan untuk membantu prototipe AUV mengapung dalam air. *Ballast* tetap AUV dibuat menggunakan bahan PLA+ (*Polylactic Acid*) yang dicetak menjadi beberapa part menggunakan mesin 3D *printer*

2.2 Diagram Blok Sistem

Diagram blok sistem pada penelitian ini menjelaskan alur setiap komponen yang berperan sebagai *input*, proses, dan *output*, Diagram blok sistem terdiri atas beberapa komponen yaitu sensor, perangkat kontroler, dan aktuatur. Diagram blok sistem tersebut dapat dilihat melalui visualisasi gambar di bawah ini.

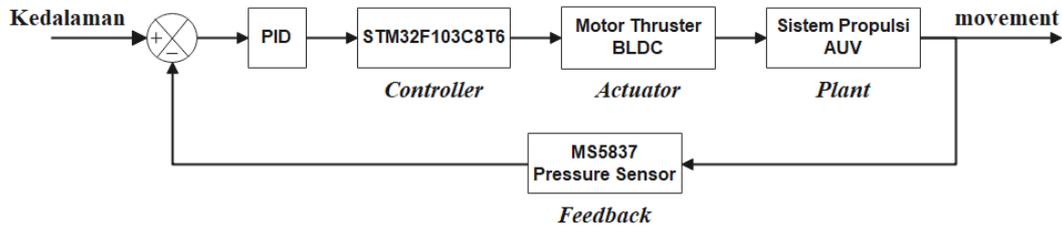


Gambar 2 : Diagram Blok Sistem



Gambar 2 merupakan diagram blok sistem yang mempresentasikan sistem yang akan dibangun. Terdapat tiga perangkat masukan sistem dengan jenis kebutuhan data yang berbeda - beda namun saling berkaitan. *Input* terdiri dari MS5837 *pressure sensor* dan push button. Kemudian data hasil pembacaan dari sensor tersebut dan data *trigger* dari *push button* akan diproses oleh mikrokontroler berupa STM32F103C8T6. Hasil pemrosesan dari mikrokontroler berupa sinyal pulsa akan dikirimkan menuju *Electronic Speed Control (ESC)* yang digunakan untuk mengontrol kecepatan 3 buah motor *thruster vertical* yang digunakan untuk gerakan translasi pada sumbu Z.

2.3 Diagram Blok Kontrol



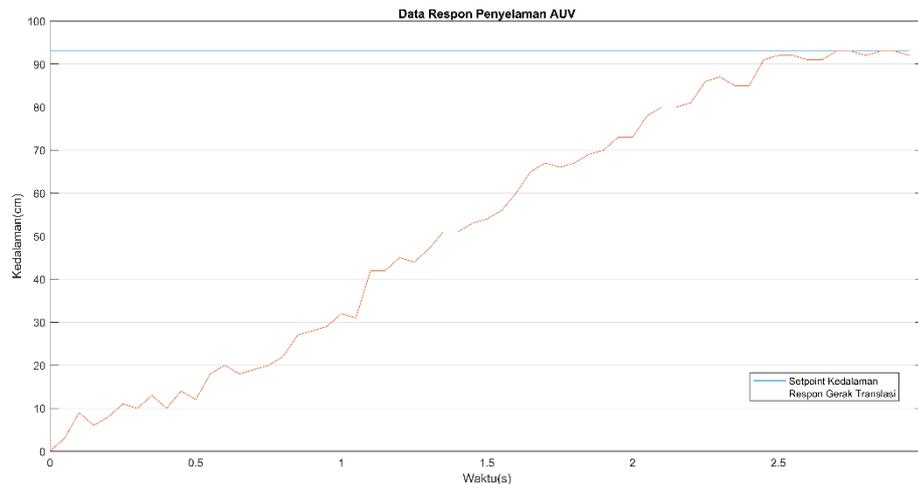
Gambar 3 : Diagram Block Kontrol

Gambar 3 merupakan diagram blok kontrol yang digunakan pada sistem ini. Kontroler digunakan untuk mengimplementasikan algoritma PID untuk setiap variable kontrol dan menghasilkan sinyal kontrol yang optimal untuk mengatur kecepatan *motor thruster* BLDC. Kontroler akan memproses *input* berupa jarak kedalaman yang dihasilkan dari MS5837 *pressure sensor*. Proses kontrol kecepatan *motor thruster* BLDC akan terus diulang – ulang sampai proses tersebut dihentikan. Setiap literasi *error* akan dihitung Kembali dan akan dilakukan *tuning* lagi menggunakan metode *Ziegler – Nichols*. Sinyal kontrol kemudian akan dikirimkan ke *motor thruster* BLDC untuk mengatur kestabilan penyelaman prototipe AUV.

2.4 Perancangan Transfer Function Gerakan Penyelaman (*Heave Motion*)

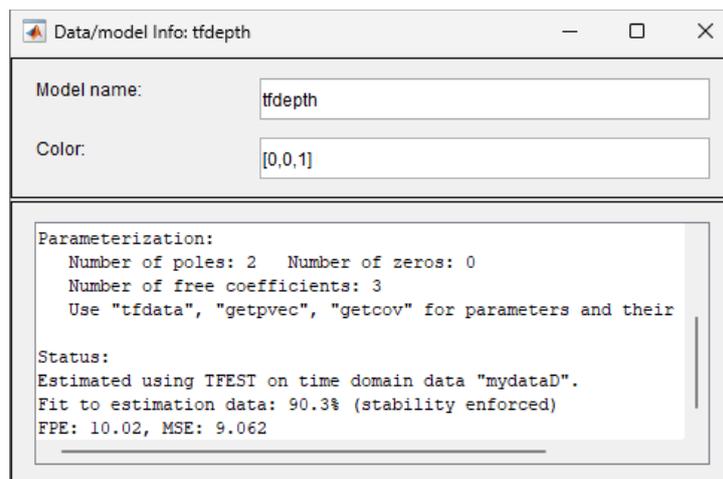
Dalam menentukan *transfer function heave motion* digunakan pendekatan identifikasi sistem yang melibatkan data eksperimen penyelaman prototipe AUV. Digunakan fitur pada *software* MATLAB yaitu *toolbox System Identification* untuk mendapatkan pendekatan matematis yang akan digunakan sebagai dasar penentuan fungsi alih sistem. Pendekatan *System Identification (SI)* melibatkan lima langkah utama yaitu, pengumpulan data, pemilihan struktur model, estimasi model, validasi model, dan aplikasi. Model dievaluasi berdasarkan nilai kecocokan terbaik untuk menentukan kedekatannya dengan sistem aktual[8]. Sebelum dilakukan estimasi perhitungan formula fungsi alih dari pergerakan translasi prototipe AUV terhadap sumbu Z (*heave motion*), dibutuhkan data yang komprehensif untuk mewakili model sistem dari objek tersebut. Berikut merupakan hasil pencatatan data respon penyelaman AUV yang telah dilakukan.





Gambar 4 : Data Pergerakan AUV dengan *Set Point* 93 cm

Berdasarkan Gambar 4 dapat diperhatikan bahwa data masukan dan luaran bersifat linear, pada gambar grafik tersebut *set point* gerak translasi prototipe AUV terhadap sumbu Z diwakilkan dengan garis warna biru dan data luaran pergerakan translasi prototipe AUV terhadap sumbu Z diwakilkan dengan garis warna orange. Data objek yang telah diperoleh kemudian diolah pada *toolbox* MATLAB yaitu *System Identification* untuk menentukan estimasi formula fungsi alih dari pergerakan rotasi prototipe AUV, hasil estimasi tersebut dapat diperhatikan pada Gambar 5, yaitu diperoleh nilai *best fits data* sebesar 90,3%; FPE sebesar 10,02%; dan MSE sebesar 9.062% yang ditunjukkan pada grafik berwarna biru.



Gambar 5 : Hasil Estimasi Formula Transfer Function *Heave Motion*

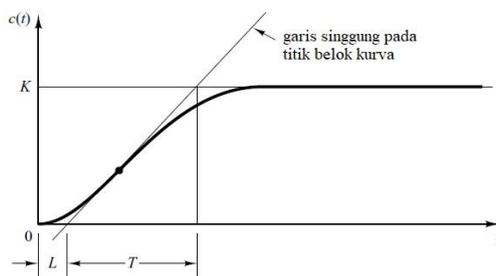
Berdasarkan hasil estimasi tersebut juga didapatkan suatu persamaan *transfer function heave motion*. Formula dibawah ini merupakan persamaan *transfer function* yang didapatkan dengan nilai *zero* sama dengan nol dan nilai ordo (*pole*) sama dengan dua.

$$G(s) = \frac{1.315}{s^2+1.738s+1.19} \tag{1}$$



2.5 Perancangan PID Ziegler – Nichols 1

Pada penelitian ini menggunakan metode Ziegler-Nichols tipe 1 (ZN-1), dimana respon sistem atau *plant* terhadap masukan satu satuan fungsi step diidentifikasi melalui eksperimen. Kurva berbentuk S, dapat diidentifikasi melalui dua parameter, yaitu waktu tunda L dan waktu konstan T , yang didefinisikan berdasarkan titik kelengkungan kurva S. Titik kelengkungan ini terbentuk dari perpotongan garis singgung dengan sumbu waktu dan garis $c(t) = K$ menghasilkan nilai konstanta L dan T yang ditunjukkan pada Gambar 6. Jika hasil respon dari eksperimen atau simulasi dinamik sistem menunjukkan kurva berbentuk S, maka metode Ziegler-Nichols tipe 1 (ZN-1) ini dapat diterapkan[10].



Gambar 6 : Respon Sistem Berbentuk Kurva S

Bersumber pada kurva S dapat menetapkan parameter K_p , K_i , dan K_d yang diperoleh dari metode *Ziegler-Nichols type 1* (ZN-1) ditentukan berdasarkan Tabel 1.

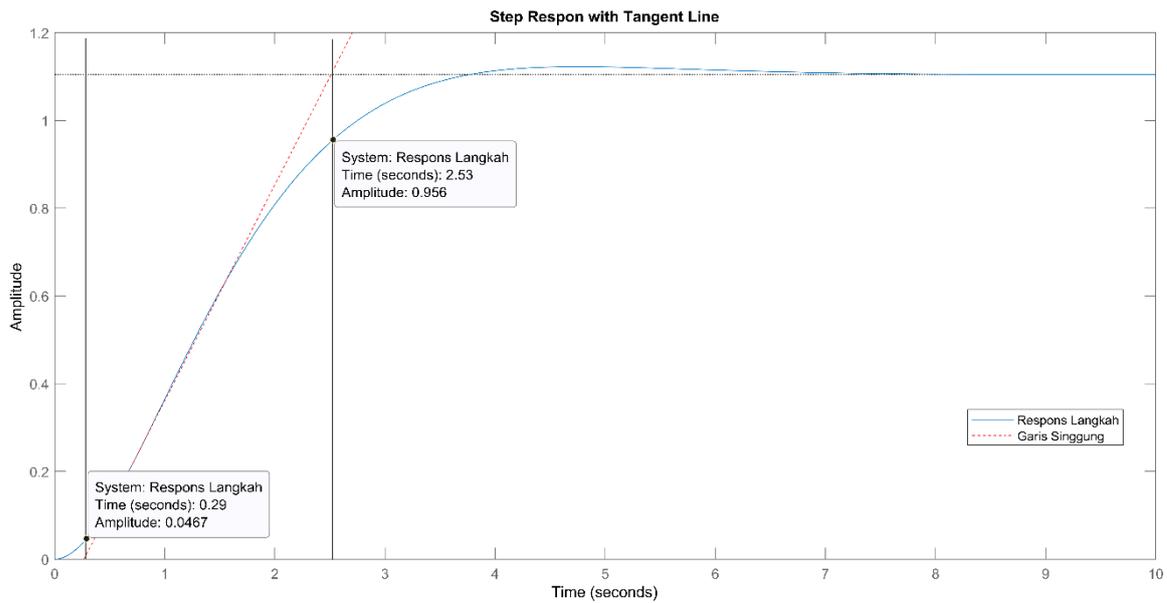
Tabel 1 : Aturan Tuning Ziegler - Nichols Tipe 1

Pengendali	K_p	T_i	T_d	K_i	K_d
P	$\frac{T}{L}$	∞			
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0		
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$	$\frac{K_p}{T_i}$	$K_p.T_d$

Penentuan nilai dari ketiga parameter PID dapat dilakukan melalui berbagai metode, termasuk metode *trial and error* serta metode *Ziegler – Nichols*. Metode *trial and error* PID dapat diterapkan dengan cara memvariasikan nilai – nilai K_p , τ_i , dan τ_d secara langsung, acak, dan terus - menerus hingga ditemukan nilai – nilai parameter yang sesuai dengan sistem yang diinginkan[11].

Identifikasi *step – respon* dari fungsi alih *heave motion* untuk menentukan waktu tunda (L) dan waktu naik (T) dilakukan menggunakan garis singgung pada titik belok kurva *step – respon* sesuai aturan metode *Ziegler – Nichols 1* yang dilihat pada Gambar 6.





Gambar 7 : Grafik Respon tanpa Kontrol PID

Hasil kurva *step – respon heave motion* yang ditunjukkan pada Gambar 7 memiliki waktu tunda (L) sebesar 0.29 s dan waktu naik (T) sebesar 2.24 s. Dengan hasil nilai tersebut, dapat digunakan sebagai perhitungan gain proporsional (K_p), integral (T_i), dan derivative (T_d) menggunakan metode *Ziegler – Nichols 1* dan hasil sebagai berikut :

$$K_p = 1.2 \times \frac{T}{L} \tag{2}$$

$$K_p = 1.2 \times \frac{2.24}{0.29} = 9.269 \tag{3}$$

$$T_i = 2 \times L \tag{4}$$

$$T_i = 2 \times 0.29 = 0.58 \tag{5}$$

$$T_d = 0.5 \times L \tag{6}$$

$$T_d = 0.5 \times 0.29 = 0.145 \tag{7}$$

Setelah diperoleh nilai gain proporsional (K_p), integral (T_i), dan derivative (T_d), nilai tersebut digunakan sebagai perhitungan nilai gain integral (K_i) dan gain derivative (K_d) dengan persamaan dan hasil sebagai berikut :

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \tag{8}$$

$$K_i = \frac{9.269}{0.58} = 15.981 \tag{9}$$

$$K_d = K_p \times T_d \tag{10}$$

$$K_d = 9.269 \times 0.145 = 1.344 \tag{11}$$

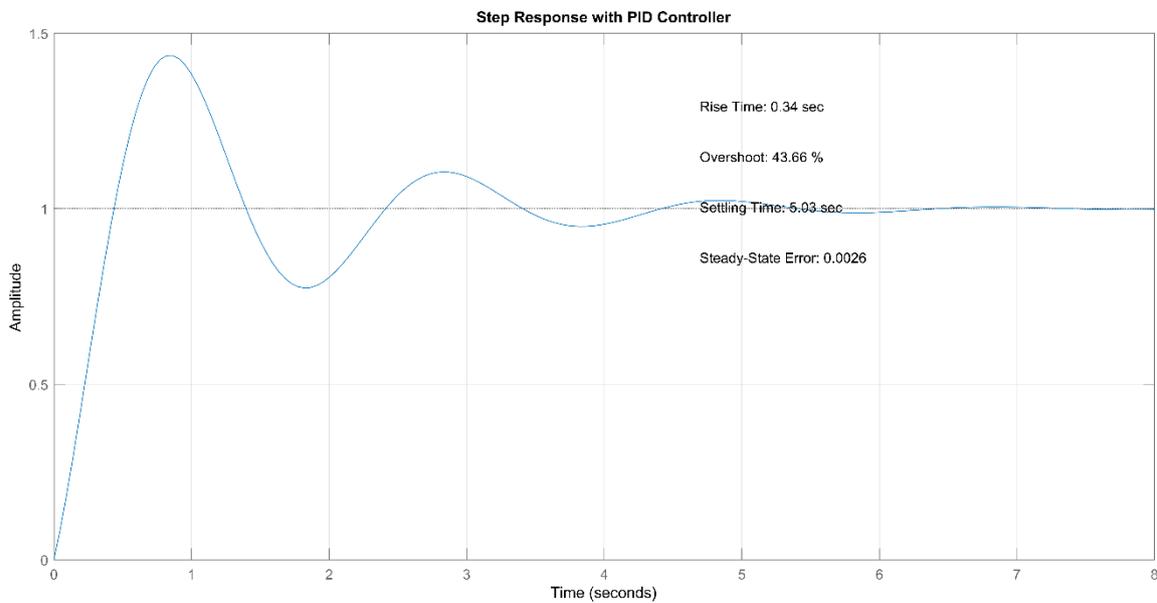
Berdasarkan hasil perhitungan nilai K_p , K_i , dan K_d menggunakan metode *Ziegler – Nichols 1*, diperoleh hasil sebagai berikut $K_p = 9,269$; $K_i = 15,981$; $K_d = 1,344$. Parameter PID tersebut akan diimplementasikan ke dalam fungsi alih *heave motion*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengujian Kontrol PID Ziegler-Nichols 1



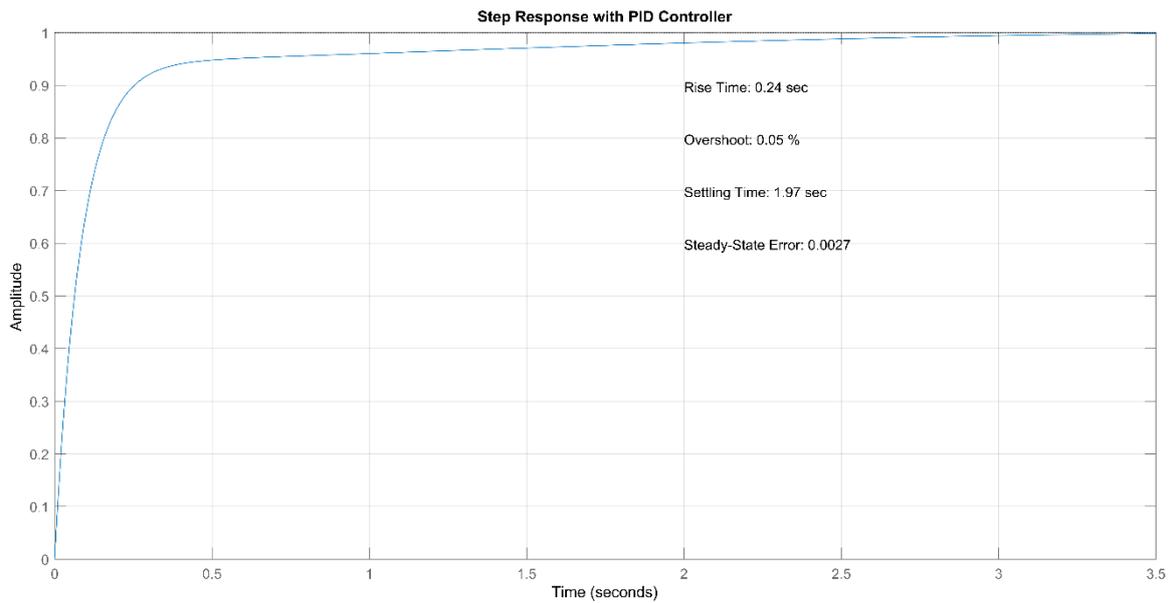
Pengujian metode PID *Ziegler – Nichols* 1 dilakukan dengan memasukkan parameter PID yang telah diperoleh pada perancangan PID *Ziegler – Nichols* 1 pada bab sebelumnya, yaitu $K_p = 9,269$; $K_i = 15,981$; $K_d = 1,344$. Parameter PID yang telah diperoleh akan dilakukan simulasi menggunakan *software* MATLAB guna menganalisa hasil respon dari parameter PID sebelum diimplementasikan ke dalam prototipe AUV.



Gambar 8 : Grafik Respon Hasil Perhitungan PID *Ziegler - Nichols* 1

Pada Gambar 8 merupakan grafik respon sistem. Dapat dilihat bahwa respon sistem kontrol PID *Ziegler – Nichols* 1 dengan parameter $K_p = 9,269$; $K_i = 15,981$; $K_d = 1,344$ menghasilkan grafik cukup baik karena memiliki *rise time* 0.34 detik dengan *overshoot* sebesar 43.66% serta *settling time* 5.03 detik. Hasil ini sesuai dengan referensi [11], [12], yang menyatakan bahwa metode *Ziegler – Nichols* menghasilkan *overshoot* antara 10% hingga 60%. Hal ini menunjukkan bahwa parameter PID masih belum bisa digunakan karena memiliki *overshoot* yang cukup besar sehingga dapat dikatakan masih jauh dari sistem yang diharapkan. Oleh karena itu dilakukan penyesuaian (*fine tuning*) pada parameter K_i dan K_d yang sudah didapatkan sebelumnya.





Gambar 9 : Grafik Respon Hasil Penyesuaian Parameter Ki dan Kd

Pada Gambar 9 merupakan tampilan step – respon yang telah dilakukan penyesuaian (fine tuning) untuk diterapkan pada sistem guna mengendalikan gerakan translasi prototipe AUV terhadap sumbu Z agar responsif dan cepat dalam mencapai settling time yang diinginkan. Parameter PID yang dihasilkan dari proses fine tuning adalah $K_p = 9,269$; $K_i = 5,65$; $K_d = 8,55$ dengan tiga aspek karakteristik kontrol sistem yang diperoleh sebagai berikut: *rise time* sebesar 0,24 detik, *overshoot* sebesar 0,05% dan *settling time* sebesar 1,97 detik.

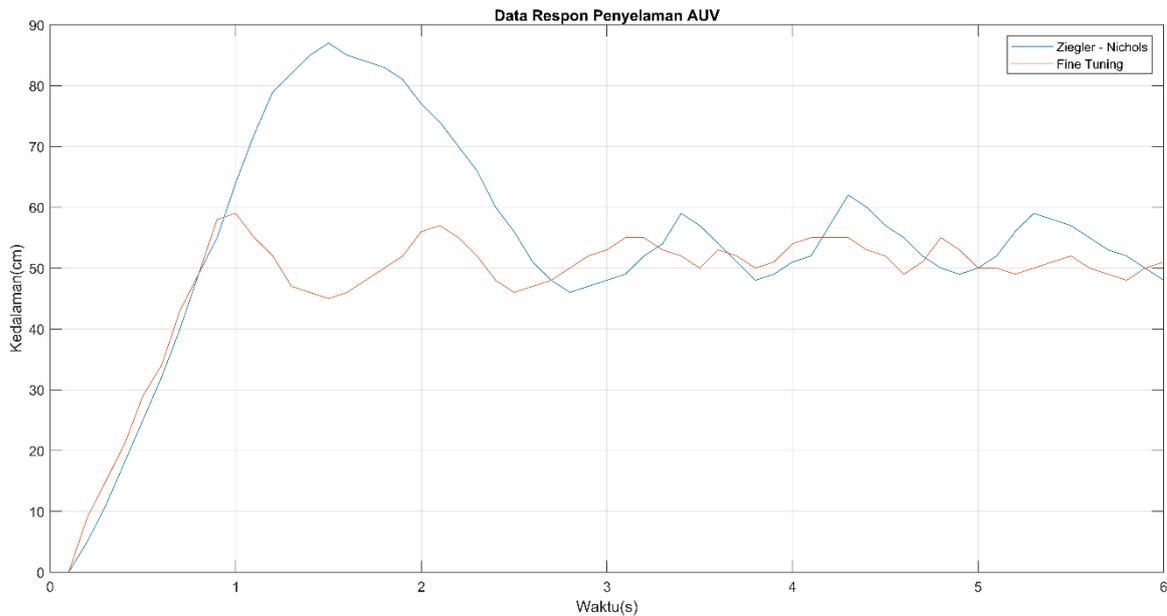
3.2 Hasil Uji Prototipe AUV dengan *Setpoint* 50 cm

Hasil uji coba prototipe AUV dengan *setpoint* 50 cm dilakukan dengan memasukkan parameter PID yang telah didapatkan melalui metode *Ziegler – Nichols* 1 yaitu berupa nilai kontrol $K_p = 9,269$; $K_i = 15,981$; $K_d = 1,344$ dan melalui penyesuaian (*fine tuning*) pada parameter K_i dan K_d yaitu berupa nilai kontrol $K_p = 9,269$; $K_i = 5,65$; $K_d = 8,55$. Berikut merupakan dokumentasi uji coba prototipe AUV dengan *setpoint* 50 cm dan hasil uji coba yang ditampilkan pada Gambar 10 dan Gambar 11.



Gambar 10 : Proses Uji Coba dengan *Setpoint* 50 cm





Gambar 11 : Grafik Respon Prototipe AUV dengan *Setpoint* 50 cm

Berdasarkan Gambar 11 dapat diperhatikan bahwa hasil respon dari parameter PID yang didapatkan menggunakan metode *Ziegler – Nichols* 1 diwakilkan dengan garis warna biru dan hasil respon dari parameter PID yang didapatkan menggunakan penyesuaian (*fine tuning*) diwakilkan dengan garis warna orange. Dari gambar grafik hasil respon dari parameter PID *Ziegler – Nichols* 1 yang menggunakan pengaturan nilai kontrol $K_p = 9,269$; $K_i = 15,981$; $K_d = 1,344$ tersebut mampu mencapai *setpoint* 50 cm dengan *rise time* sebesar 0,7 detik dan *settling time* sebesar 3,7 detik serta memiliki *overshoot* sebesar 42,52%. Sedangkan gambar grafik hasil respon dari parameter PID yang disesuaikan (*fine tuning*) dengan menggunakan pengaturan nilai kontrol $K_p = 9,269$; $K_i = 5,65$; $K_d = 8,55$ tersebut mampu mencapai *setpoint* 50 cm dengan *rise time* sebesar 0,65 detik dan *settling time* sebesar 2,8 detik serta memiliki *overshoot* sebesar 15,25%.

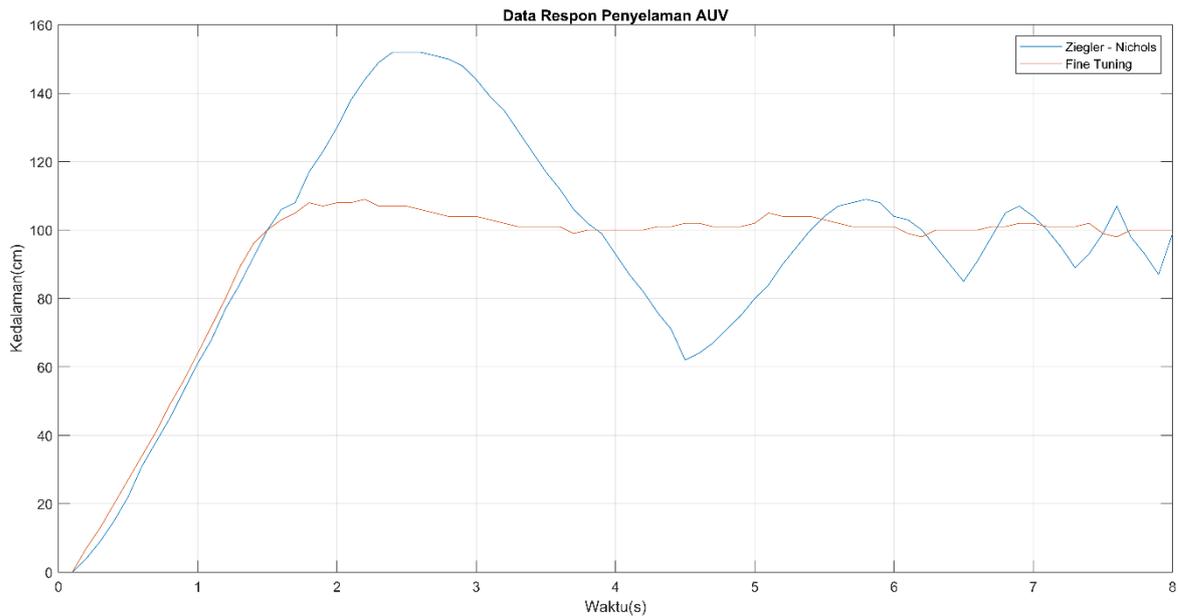
3.3 Hasil Uji Prototipe AUV dengan *Setpoint* 100 cm

Hasil uji coba prototipe AUV dengan *setpoint* 100 cm dilakukan dengan memasukkan parameter PID yang telah didapatkan melalui metode *Ziegler – Nichols* 1 yaitu berupa nilai kontrol $K_p = 9,269$; $K_i = 15,981$; $K_d = 1,344$ dan melalui penyesuaian (*fine tuning*) pada parameter K_i dan K_d yaitu berupa nilai kontrol $K_p = 9,269$; $K_i = 5,65$; $K_d = 8,55$. Berikut merupakan dokumentasi uji coba prototipe AUV dengan *setpoint* 100 cm dan hasil uji coba yang ditampilkan pada Gambar 12 dan Gambar 13.



Gambar 12 : Proses Uji Coba dengan *Setpoint* 100 cm





Gambar 13 : Grafik Respon Prototipe AUV dengan *Setpoint* 100 cm

Berdasarkan Gambar 13 dapat diperhatikan bahwa hasil respon dari parameter PID yang didapatkan menggunakan metode *Ziegler – Nichols* 1 diwakilkan dengan garis warna biru dan hasil respon dari parameter PID yang didapatkan menggunakan penyesuaian (*fine tuning*) diwakilkan dengan garis warna orange. Dari gambar grafik hasil respon dari parameter PID *Ziegler – Nichols* 1 yang menggunakan pengaturan nilai kontrol $K_p = 9,269$; $K_i = 15,981$; $K_d = 1,344$ tersebut mampu mencapai *setpoint* 100 cm dengan *rise time* sebesar 1,4 detik dan *settling time* sebesar 6,1 detik serta memiliki *overshoot* sebesar 33,33%. Sedangkan gambar grafik hasil respon dari parameter PID yang disesuaikan (*fine tuning*) dengan menggunakan pengaturan nilai kontrol $K_p = 9,269$; $K_i = 5,65$; $K_d = 8,55$ tersebut mampu mencapai *setpoint* 100 cm dengan *rise time* sebesar 1,35 detik dan *settling time* sebesar 3,2 detik serta memiliki *overshoot* sebesar 7,4%.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, hasil respon dari parameter PID *Ziegler – Nichols* 1 sudah cukup baik dengan *rise time* yang cepat. Namun, nilai *overshoot* yang terjadi terlalu besar dan osilasi yang cukup signifikan. Sedangkan hasil respon dari parameter PID yang disesuaikan (*fine tuning*) memberikan respon yang lebih baik dalam hal nilai *rise time*, *overshoot*, dan *settling time*. Berdasarkan hasil uji coba prototipe AUV dengan variasi *setpoint* 50 cm dan 100 cm, parameter $K_p = 9,269$; $K_i = 5,65$; $K_d = 8,55$ dipilih karena memberikan respon yang lebih baik dalam hal nilai *rise time*, *overshoot*, dan *settling time* serta sesuai dengan kebutuhan karakteristik responsif dari gerakan penyelaman prototipe AUV.

5. UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kepada kedua orang tua saya serta Pak Dimas dan Pak Joko yang sudah mendukung dan membimbing pada penelitian ini dan teman – teman saya yang terlibat dalam penelitian ini. Semoga kebaikan mereka selalu dibalas dengan kesuksesan dan kebahagiaan.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Seskoal and K. J. Selatan, "ANALISIS PEMANFAATAN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV) HUGIN 1000 PENDAHULUAN AUV Hugin 1000 merupakan peralatan survei hidro-oseanografi yang diproduksi oleh Kongsberg dengan kemampuan survei hidrografi dan oseanografi serta melaksanakan investigasi ," vol. 2, no. 2, pp. 58–70, 2023.
- [2] E. Darmawan Yudi and J. A. Yani No, "Literature review : Implementasi sistem monitoring robot bawah air (underwater robot) berbasis iot menggunakan metode fuzzy logic," *J. Ilmu Data dan Kecerdasan Buatan*, vol. 1, no. 1, pp. 5–8, 2023, [Online]. Available: <https://iitss.or.id/ojs/index.php/jidka/article/view/56>
- [3] M. Przybylski, "Selection of the Depth Controller for the Biomimetic Underwater Vehicle," *Electron.*, vol. 12, no. 6, 2023, doi: 10.3390/electronics12061469.
- [4] A. ZARKASI, R. PASARELLA, S. NURMAINI, M. MAULANA, and M. FAJAR, "Implementation of Fuzzy Logic Method for Lifting Control System on Autonomous Underwater Vehicles," vol. 172, no. Siconian 2019, pp. 225–230, 2020, doi: 10.2991/aisr.k.200424.033.
- [5] A. ZARKASI, I. J. ANGKOTASAN, M. AI RAVI, and E. D. YUDI, "Design Heading Control for Steering AUV with fuzzy logic," vol. 172, no. Siconian 2019, pp. 218–224, 2020, doi: 10.2991/aisr.k.200424.032.
- [6] A. Sari and F. Jusmi, "Perancangan sistem kontrol pid dengan aplikasi scilab," *APCP (Applied Phys. Cokroaminoto Palopo)*, vol. 1, pp. 31–41, 2020.
- [7] A. Roppon, V. C. Poekoel, and F. D. Kambey, "Implementation of PID Control for Diving Stability on Underwater ROV (Remotely Operated Vehicle) Robots," *Electr. Comput. Eng. J.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–8, 2018.
- [8] F. Naim Zohedi, M. S. Mohd Aras, H. Anuar Kasdirin, M. B. Bahar, and L. Abdullah, "SYSTEM IDENTIFICATION (SI) MODELLING , CONTROLLER DESIGN AND HARDWARE TESTING FOR VERTICAL TRAJECTORY OF UNDERWATER REMOTELY OPERATED VEHICLE (ROV)," *J. Tek. IIUM*, vol. 24, no. 2, pp. 131–140, 2023.
- [9] N. M. A. S. and D. Mulyana, "Pengaturan Kecepatan Motor Brushless DC(Direct Current) Menggunakan Cuk Converter," *J. Tek. Elektro dan Komput. TRIAC*, vol. 6, no. 2, pp. 11–16, 2019, doi: 10.21107/triac.v6i2.5990.
- [10] T. Pujiati and R. Risfendra, "Penerapan Kontroler PID Pada Sistem Kendali Level cairan Dengan Metode Ziegler-Nichols Berbasis Arduino," *JTEIN J. Tek. Elektro Indones.*, vol. 2, no. 1, pp. 55–60, 2021, doi: 10.24036/jtein.v2i1.123.
- [11] A. Mardiyanto, S. Amra, M. Kamal, and J. Syarif, "Desain dan Simulasi Kendali PID Kecepatan Motor Mesin Sentrifugasi," vol. IX, no. 2, pp. 8894–8904, 2024.
- [12] S. ALFIAN MA'ARIF, RYAN ISTIARNO, "Kontrol Proporsional Integral Derivatif (PID) pada Kecepatan Sudut Motor DC dengan Pemodelan Identifikasi Sistem dan Tuning," *J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 9, no. 2, pp. 374–388, 2021.

