

Optimasi Kendali PID menggunakan Algoritma Genetika untuk Penerbangan *Quadrotor*

Khalaqas Hakiim^{*1}, Andi Dharmawan², Faizah³

¹Prodi S1 Elektronika dan Instrumentasi, FMIPA UGM, Yogyakarta

^{2,3}Departemen Ilmu Komputer dan Elektronika, FMIPA UGM, Yogyakarta

e-mail: ^{*1}khalaqashakiim@gmail.com, ²dharmawan.andi@gmail.com, ³faizah@ugm.ac.id

Abstrak

Quadrotor merupakan jenis pesawat tanpa awak (UAV) berbentuk persegi dengan empat motor ditiap lengannya. Quadrotor memiliki kemampuan untuk terbang landas dan mendarat secara vertikal. Pada penelitian ini dirancang dan dibuat sistem yang mampu menstabilkan terbang quadrotor serta mampu mempertahankan sudut roll, pitch, yaw menggunakan kendali PID yang dioptimasi menggunakan salah satu evolutionary algorithms yaitu algoritma genetika.

PID merupakan kendali yang umum diterapkan termasuk untuk mengendalikan quadrotor. Penalaan atau proses pengaturan parameter PID sangat dibutuhkan untuk mendapatkan parameter PID yang tepat sehingga tercapai kestabilan terbang. Pada penelitian ini diterapkan penalaan Ziegler-Nichols dalam mencari parameter PID yang selanjutnya dijadikan acuan optimasi algoritma genetika untuk mendapatkan parameter PID yang paling cocok pada pengendalian sudut roll, pitch, dan yaw.

Hasil optimasi yang telah dilakukan menunjukkan kendali quadrotor mampu menghasilkan kestabilan dengan steady state error untuk sudut pitch yaitu 2,34 derajat counterclockwise hingga 3,37 derajat clockwise, pada sudut roll yaitu 2,99 derajat counterclockwise hingga 2,27 derajat clockwise, dan pada sudut yaw yaitu 8,39 derajat counterclockwise hingga 3,89 derajat clockwise.

Kata kunci— UAV, Evolutionary Algorithms, Ziegler Nichols

Abstract

Quadrotor is square-form unmanned aerial vehicle (UAV) type with four motor in each arms. Quadrotor has ability to take-off and landing vertically. This research designs and creates a system that capable to stabilize the quadrotor flight also able to maintain roll, pitch and yaw angle using PID controller optimized by genetic algorithm, one of evolutionary algorithms.

PID is a common applied controller including to control the quadrotor. Tuning or setting PID parameter process is needed to obtain fit PID parameters. Tuning is very important to reach quadrotor flight stability. This research applies Ziegler-Nichols tuning to obtain PID parameters. Then the PID parameters will be a reference for genetic algorithm optimization process to obtain the suitable PID parameter to control roll, pitch, and yaw angle.

Optimization process result show quadrotor controller capable to reach stability with steady state error for pitch angle in range 2,34 degree counterclockwise to 3,37 degree clockwise, for roll angle in range 2,99 degree counterclockwise to 2,27 degree clockwise, and for yaw angle in range 8,39 degree counterclockwise to 3,89 degree clockwise.

Keywords— UAV, Evolutionary Algorithms, Ziegler Nichols

1. PENDAHULUAN

Beberapa tahun belakangan ini salah satu teknologi yang pesat pemanfaatannya dan perkembangannya adalah *quadrotor*. *Quadrotor* telah banyak diaplikasikan dalam berbagai bidang diantaranya dalam jurnalistik, pemantauan dan pengawasan suatu wilayah, pemetaan wilayah, pemantauan lalu lintas hingga misi penyelamatan. *Quadrotor* merupakan bagian dari pesawat tanpa awak yang bergerak terbang dengan menggunakan daya dorong yang dihasilkan keempat motornya [1]. *Quadrotor* merupakan UAV yang memiliki kemampuan *vertical take-off and landing* (VTOL) dan kemampuan manuver yang tinggi [2].

Quadrotor dapat diterbangkan secara manual oleh pilot menggunakan *remote*, akan tetapi seringkali *quadrotor* mengalami ketidakstabilan dalam terbang. Selain itu seringkali *quadrotor* diberikan muatan untuk mendukung peformanya sehingga sangat diperlukan sistem kendali yang mumpuni untuk menjaga kestabilan terbangnya [3].

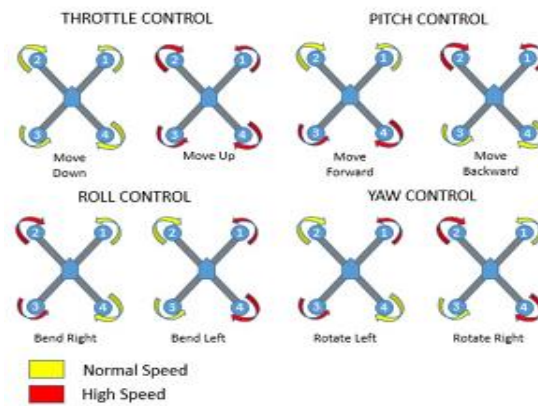
Faktor baiknya performa yang dihasilkan dan kemudahan dalam pengimplementasiannya menjadikan kendali PID cocok untuk diterapkan untuk pengendalian *quadrotor*. Pengendalian pada *quadrotor* dengan menggunakan kendali PID tanpa pengaturan parameter-parameter PID secara tepat terhadap dinamika gerakan *quadrotor* yang seringkali berubah-ubah dapat mengakibatkan *overshoot* yang tinggi sehingga terjadi perlambatan respon sistem dan *multiple overshoot*. Pengendalian *quadrotor* dengan kendali PID disertai pengaturan parameter-parameternya secara tepat akan berimbang pada terbang *quadrotor* yang stabil dan dapat mempertahankan posisi *quadrotor* pada sudut eulernya. Solusi untuk mendapatkan nilai parameter PID secara tepat adalah dengan melakukan penalaan atau *tunning*. Sistem pada *quadrotor* adalah sistem nonlinear karena aerodinamika dari keempat rotor yang membutuhkan sebuah algoritma kendali untuk menstabilkan pada saat keadaan melayang [4].

Algoritma Genetika merupakan algoritma yang bekerja didasarkan pada prinsip evolusi alami dan genetika dalam pencarian solusi dalam sebuah permasalahan [5]. Algoritma genetika adalah proses pencarian suatu kromosom (solusi) yang paling cocok yang dibangun populasi pada lingkup solusi yang potensial. Algoritma genetika terkenal sebagai algoritma dengan metode pencarian yang acak yang dapat menghasilkan solusi optimal yang akurat. Kemampuan untuk melakukan pencarian solusi yang optimal tersebut sangat memungkinkan untuk diterapkan dalam rangka *menala parameter* PID.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Analisis Sistem

Quadrotor merupakan model pesawat yang memiliki empat baling-baling yang terpasang pada lengan secara simetris. Hal ini memungkinkan *quadrotor* untuk melakukan lepas landas dan pendaratan secara vertikal. Putaran motor *quadrotor* adalah searah jarum jam atau *clockwise*(CW) dan berlawanan arah jarum jam atau *counterclockwise*(CCW). Arah dua motor yang bersebelahan memiliki arah putaran yang berbeda, sehingga memungkinkan *quadrotor* untuk dapat terbang. Pada penelitian ini konfigurasi *quadrotor* berbentuk 'X' dan arah putaran motor sesuai Gambar 1.



Gambar 1 Pergerakan dasar *quadrotor* [6]

Penelitian mengenai *quadrotor* ini bertujuan untuk mengendalikan *quadrotor*. Pengendalian *quadrotor* dipengaruhi beberapa parameter yaitu *throttle*, *pitch*, *roll*, dan *yaw*. *Throttle* berpengaruh pada pengaturan kecepatan motor yang menyebabkan naik turunnya *quadrotor*. *Pitch* dan *Roll* berpengaruh pada sudut kemiringan *quadrotor*. Sedangkan *yaw* berpengaruh pada arah hadap *quadrotor*. Sistem kendali *quadrotor* menggunakan PID (*Proportional Integral Derivative*). Sistem kendali ini merupakan sistem yang linear, persamaan PID yang digunakan adalah persamaan 1.

$$u(t) = Kp e(t) + Ki \int_0^t e(t) dt + Kd \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Batasan toleransi untuk nilai *steady state error* pada sistem *close-loop* yang linear (orde 1) adalah sebesar 2% dari rentang nilai yang digunakan [7]. Sedangkan pada penelitian ini yang digunakan merupakan sistem non-linier yang berorde dua. Tidak terdapat aturan yang pasti untuk nilai toleransi pada sistem *non-linier*, pada penelitian ini digunakan toleransi *steady state error* adalah maksimal sebesar 5% dari rentang nilai yang digunakan.

Nilai 5 % merupakan nilai toleransi dan beberapa parameter lain yang digunakan sebagai acuan keberhasilan dari sistem kendali dalam menangani *quadrotor* disebutkan dalam penelitian sebelumnya [8] :

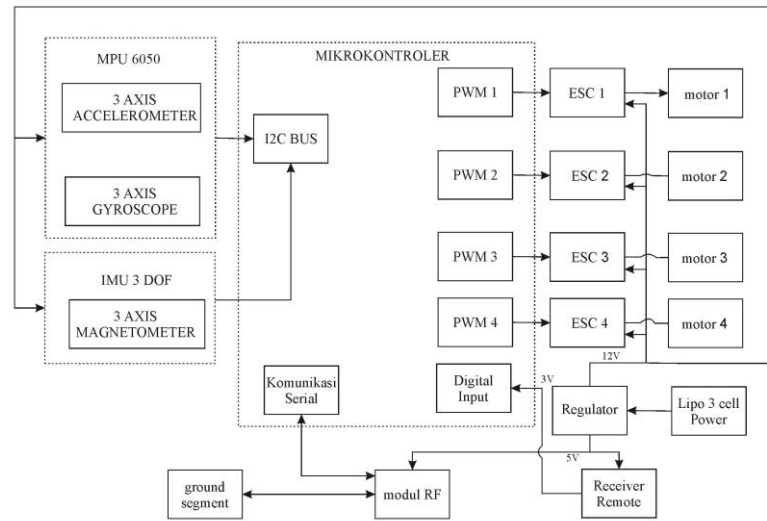
1. Nilai *steady state error* dibawah batas toleransi 5% dari nilai maksimal yaitu sebesar 90 derajat untuk sudut *pitch* dan *roll* yang dapat masih dikendalikan dan sudut 360 derajat untuk sudut *yaw* sehingga batas toleransi sudut adalah 4,5 derajat *clockwise*(CW) dan 4,5 derajat *counterclockwise*(CCW) untuk sudut *pitch* dan *roll*, serta sebesar 18 derajat *clockwise*(CW) dan 18 derajat *counterclockwise*(CCW) pada sudut *yaw*.
2. *Rise time* yang dihasilkan untuk sudut *pitch* dan *roll* lebih cepat dari satu detik dan untuk *yaw* lebih cepat dari 4 detik.
3. *Settling time* yang dihasilkan untuk sudut *pitch* dan *roll* lebih cepat dari 3 detik dan untuk sudut *yaw* lebih cepat dari 6 detik.

Maximum overshoot untuk sudut *pitch* dan *roll* yang dihasilkan lebih kecil dari 20% dan untuk sudut *yaw* yang dihasilkan lebih kecil dari 20%.

2.2 Rancangan Arsitektur *Quadrotor*

Penelitian tugas akhir ini terdapat beberapa komponen utama yang digunakan yaitu Arduino Due sebagai prosesor untuk program kendali yang digunakan. Sensor IMU 9 DOF yang terdiri dari 3 DOF *accelerometer* dan 3 DOF *gyroscope* dari sensor MPU6050 serta 3 DOF *magnetometer* dari sensor HMC5883L. Empat motor *brushless* sebagai aktuator utama pada *quadrotor*. Empat *Electronic Speed Controller* (ESC) sebagai pengatur kecepatan sudut dari motor *brushless*. Modul *Radio Frequency*(RF) 433 MHz yang berfungsi dalam komunikasi

nirkabel antara *quadrotor* dengan *ground segment*. Arsitektur sistem dari *quadrotor* yang digunakan ditampilkan dalam Gambar 2.



Gambar 2 Arsitektur sistem elektronis

2.3 Fungsi Alih Quadrotor

Fungsi alih *quadrotor* merupakan komponen yang penting dalam proses penstabilan *quadrotor*. Fungsi alih berperan penting yaitu mewakili keseluruhan sistem *hardware quadrotor* untuk diolah pada perangkat lunak yang diterapkan untuk *quadrotor* sehingga sangat menentukan kestabilan yang akan tercapai.

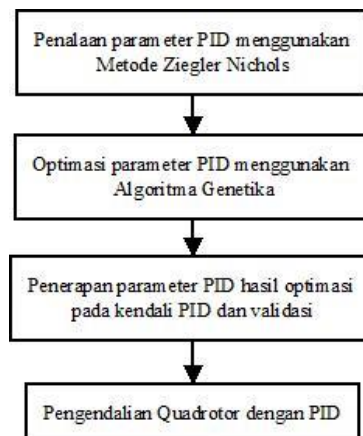
Dari persamaan permodelan, fungsi alih dalam domain *laplace* untuk sumbu *x* dikemukakan persamaan 2.

$$G_x(s) = \frac{\frac{1}{2}\sqrt{2}1}{I_{xx}s^2} \quad (2)$$

Fungsi alih untuk sumbu *y* dan *z* persamaan 2 disesuaikan inersia pada masing-masing sumbu.

2.4 Tahap Rancangan dan pembuatan sistem kendali

Pembuatan sistem kendali dalam penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan sesuai dengan Gambar 3.



Gambar 3 Tahapan perancangan dan pembuatan sistem kendali

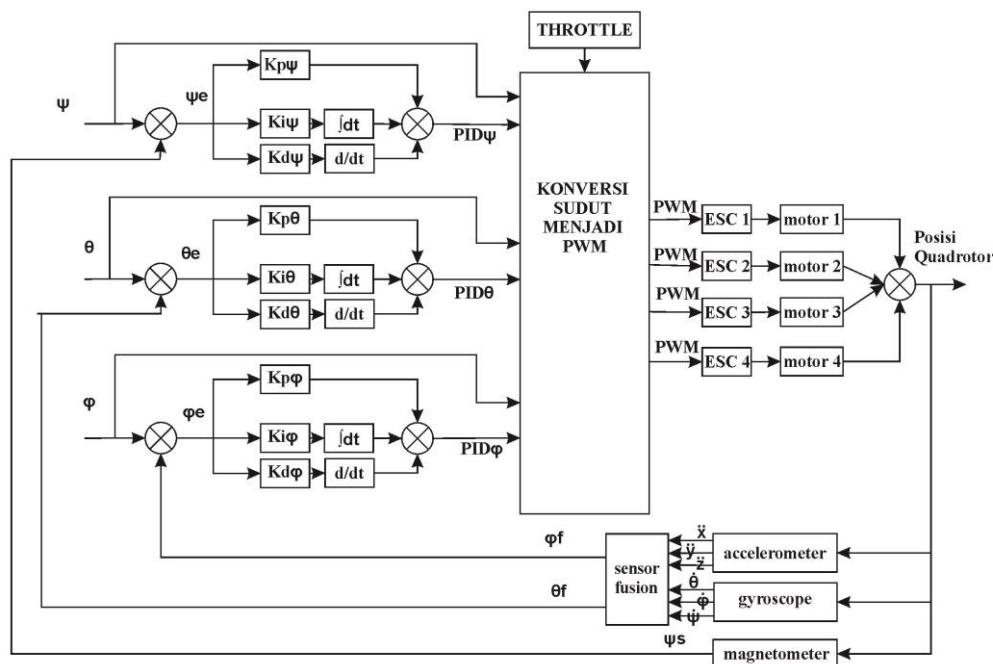
Tahapan perancangan dan pembuatan sistem sesuai dengan Gambar 3 pada tahap awal terlebih dulu dilakukan penalaan parameter PID dengan menggunakan metode *Ziegler-Nichols*. Metode *Ziegler-Nichols* dapat digunakan untuk memprediksi performa sistem secara lebih akurat.

Metode *Ziegler-Nichols* dapat diaplikasikan pada *plant* yang diketahui permodelan matematikanya maupun yang tidak diketahui permodelan matematikanya. Meskipun dalam beberapa kasus hasilnya akan menimbulkan *overshoot* yang besar atau bahkan tidak cocok untuk diaplikasikan sehingga membutuhkan *fine tuning*. Akan tetapi metode ini dapat dijadikan acuan standar sebagai permulaan dalam mencari nilai parameter terbaik [8].

Proses optimasi algoritma genetika akan menghasilkan parameter yang teroptimasi sehingga kemudian akan dilakukan penerapan pada kendali PID, akan tetapi apabila dirasa perlu dapat dilakukan validasi parameter pada kendali *quadrotor*. Pada tahap terakhir, PID yang telah berisi parameter yang telah teroptimasi akan digunakan sebagai pengendali pada *quadrotor*.

2.5 Rancangan Sistem Kendali *Quadrotor*

Rancangan sistem kendali dibuat untuk dijadikan acuan dalam pembuatan sistem kendali untuk kestabilan terbang *quadrotor*. Rancangan kendali ini berupa blok yang ditampilkan pada Gambar 4.



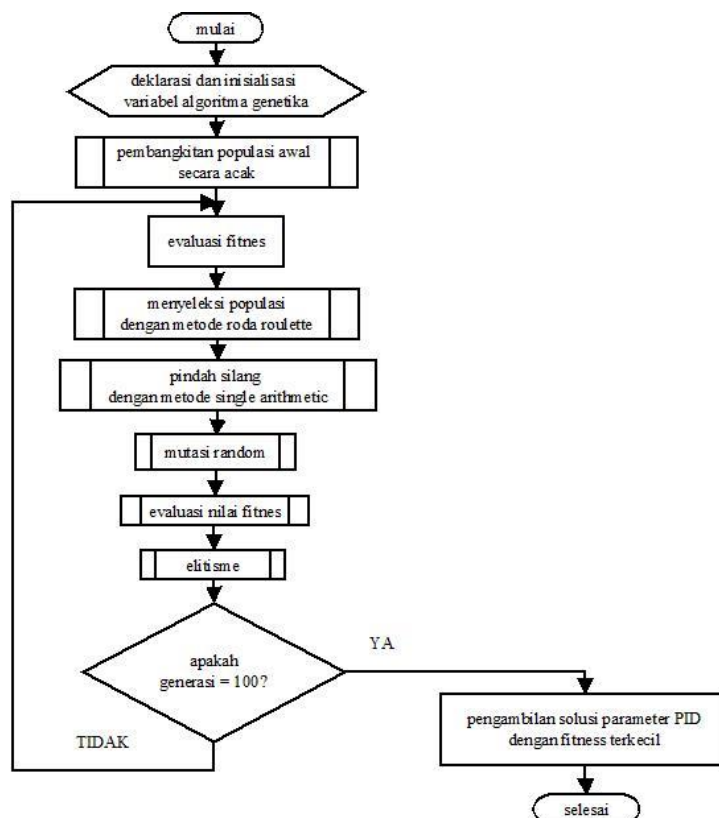
Gambar 4 Diagram blok kendali sistem

Sistem kendali diawali dengan proses pencarian nilai *error* dari hasil selisih *setpoint* dengan feedback pembacaan sudut dari sensor. Pembacaan sudut pada keluaran sistem diolah dengan metode DMP. *Setpoint pitch*, *roll*, dan *yaw* diwakilkan dengan simbol θ , ϕ , ψ . Nilai *error* kemudian akan diproses oleh kendali PID yang sebelumnya parameter-parameternya sudah dioptimasi dengan menggunakan algoritma genetika. Nilai PID yang dihasilkan akan dilakukan konversi nilai PID ke PWM. Motor *brushless* akan berputar pada kecepatan sudut tertentu yang bertujuan untuk memposisikan *quadrotor* pada posisi tertentu. Posisi *quadrotor* akan dibaca dengan menggunakan 3 sensor untuk mendapatkan nilai sudut feedback θ_f , ϕ_f , ψ_f .

2.6 Optimasi Algoritma Genetika

Optimasi parameter kendali PID menggunakan metode algoritma genetika merupakan proses peningkatan optimalisasi parameter yang sudah ditala dengan menggunakan metode *Ziegler-Nichols*. Proses optimasi algoritma genetika akan mengacu pada parameter-parameter yang sudah didapatkan melalui proses *Ziegler-Nichols*.

Program optimasi parameter kendali PID menggunakan algoritma genetika diawali dengan deklarasi dan penginisialisasian variabel yang digunakan dalam prosesnya. Kemudian proses selanjutnya adalah fungsi pembangkitan nilai parameter awal secara acak akan tetapi tetap pada nilai acuan disekitar nilai parameter hasil penalaan menggunakan metode *Ziegler-Nichols*. Gambar 5 menunjukkan bagan alir optimasi algoritma genetika.



Gambar 5 Bagan alir optimasi algoritma genetika

Tahapan selanjutnya adalah seleksi populasi, populasi akan dilakukan penyeleksian pada tahap fungsi seleksi menggunakan metode roda *roulette*. Populasi hasil seleksi roda *roulette* akan dilanjutkan untuk diproses pada fungsi pindah silang. Dalam proses pindah silang digunakan metode *single arithmetic* yang akan melakukan penukaran pada gen-gen tertentu dalam populasi. Tahapan selanjutnya adalah pada fungsi mutasi yang akan melakukan mutasi terhadap gen-gen terpilih. Dalam penelitian ini dipilih nilai peluang mutasi yang rendah karena nilai peluang mutasi yang tinggi akan mengakibatkan proses pencarian optimasi menjadi suatu pencarian yang acak [9].

Hasil dari proses mutasi akan kembali dievaluasi menggunakan ITAE. Pada dasarnya *cost function* IAE, ISE, ITAE, maupun ITSE memiliki hasil respon peforma yang hampir sama baiknya, akan tetapi ITAE memiliki indeks peforma yang lebih baik daripada ketiga *cost function* lainnya [11].

Elitisme ini akan mempertahankan kualitas populasi untuk dapat digunakan sebagai orangtua pada generasi selanjutnya. Proses pembentukan generasi baru dengan operasi genetik dilakukan berulang-ulang hingga terpenuhi kriteria pemberhentian (*stopping condition*). Pada penelitian ini akan berlangsung selama 100 generasi, sehingga pada akhir generasi akan dapat diambil solusi terbaik yang diberikan dalam proses optimasi. Penelitian ini juga melakukan pengamatan terhadap parameter algoritma genetika seperti peluang mutasi, jumlah populasi dan jumlah generasi untuk menentukan seberapa konvergen hasil optimasinya.

2.7 Pengambilan Data Parameter Model

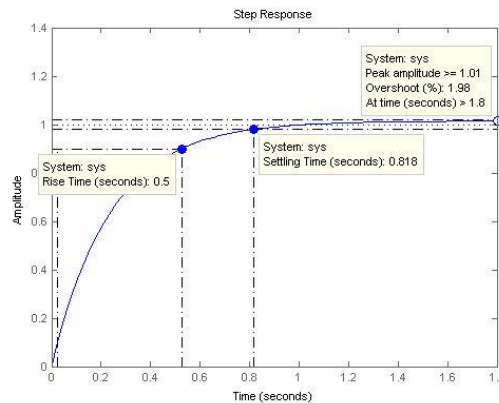
Perangkat keras yang digunakan akan dilakukan pengukuran massa maupun panjang yang akan digunakan untuk mendapatkan nilai. Pengukuran ini dilakukan pada sumbu-sumbu inersia tiap komponen berdasarkan pada bentuknya masing-masing. Nilai hasil pengukuran akan digunakan untuk mencari inersia tiap-tiap komponen perangkat keras. Nilai tersebut digunakan untuk mendapatkan nilai fungsi alih pada sistem *quadrotor*.

Nilai inersia total pada sumbu x adalah 0,03715163 ,dan inersia total pada sumbu y adalah 0,03895026 serta nilai total inersia pada sumbu z adalah 0,2276909. Nilai inersia total pada sumbu x, y,dan z akan digunakan pada persamaan fungsi alih. Fungsi alih ini akan digunakan dalam penyusunan program optimasi menggunakan algoritma genetika.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Optimasi Parameter PID pada sudut roll

Optimasi parameter PID dengan algoritma genetika pada sudut *roll* mengacu pada nilai parameter yang telah ditala menggunakan metode *Ziegler-Nichols*. Gambar 6 merupakan grafik salah satu solusi optimasi untuk parameter PID pada sudut *roll* yang disediakan oleh algoritma genetika.



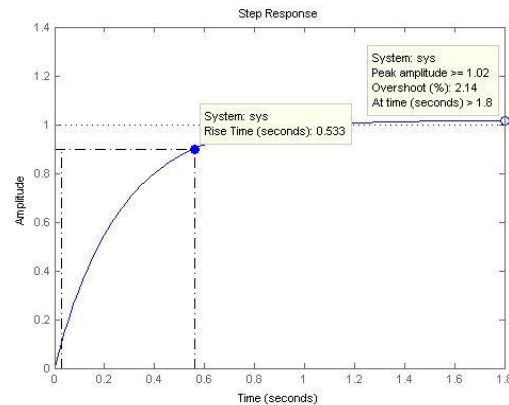
Gambar 6 Grafik respon sistem optimasi parameter PID pada sudut roll dengan algoritma genetika

Dari simulasi optimasi parameter kendali PID sudut *roll* menggunakan algoritma genetika didapat *risetime* 0.5 detik, *overshoot* 1,98 %, serta *settlingtime* 0,818 detik. Berdasarkan kriteria kestabilan yang ditentukan, respon sistem yang dihasilkan dari simulasi dianalisa bahwa respon sistemnya memenuhi spesifikasi yang ditentukan dalam penelitian ini yaitu *risetime* yang didapatkan lebih cepat dari 1 detik, *overshoot*nya kurang dari 20 % dan *settlingtime* nya lebih cepat dari 3 detik. Solusi parameter yang diberikan dari hasil simulasi tersebut yaitu $K_p = 0,514$ $K_i = 0,0102$ dan $K_d = 0,9887$ dan *fitnes* = 2,6484.

3.2 Optimasi Parameter PID pada sudut roll

Optimasi parameter PID dengan algoritma genetika pada sudut *pitch* mengacu pada nilai parameter yang telah ditala menggunakan metode *Ziegler-Nichols* .Gambar 7 merupakan

grafik salah satu solusi optimasi untuk parameter PID pada sudut *pitch* yang disediakan oleh algoritma genetika.

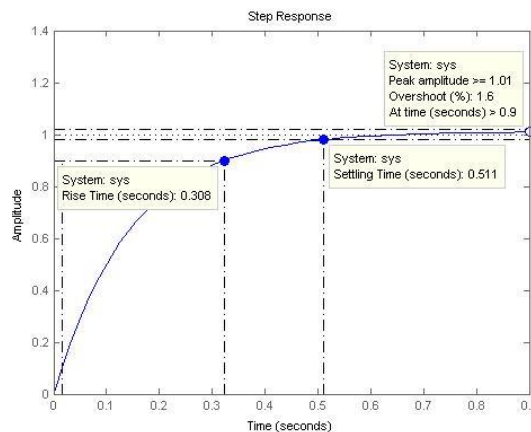


Gambar 7 grafik respon sistem optimasi parameter PID pada sudut pitch dengan algoritma genetika

Grafik optimasi parameter PID sudut pitch pada Gambar 7 menunjukkan respon sistem dengan risetime 0,533 detik, overshoot sebesar 2,14 % dan settlingtime sangat singkat. Berdasarkan kriteria kestabilan yang ditentukan, respon sistem Gambar 7 apabila dianalisa sudah memasuki spesifikasi yang ditentukan pada penelitian ini yaitu lebih cepat dari 1 detik untuk risetime, overshoot kurang dari 20 % dan settlingtime lebih cepat dari 3 detik. Solusi parameter yang dihasilkan dalam optimasi parameter PID dengan menggunakan algoritma genetika untuk sudut pitch ini adalah $K_p = 0,0555$ $K_i = 0,0101$ dan $K_d = 0,9671$ dan fitness = 3,3608.

3.3 Optimasi Parameter PID pada sudut yaw

Optimasi parameter PID dengan algoritma genetika pada sudut *yaw* mengacu pada nilai parameter yang telah ditala menggunakan metode *Ziegler-Nichols*. Gambar 8 merupakan grafik salah satu solusi optimasi untuk parameter PID pada sudut *yaw* yang disediakan oleh algoritma genetika.



Gambar 8 grafik respon sistem optimasi parameter PID pada sudut yaw dengan algoritma genetika

Grafik hasil optimasi parameter PID sudut *yaw* dengan menggunakan algoritma genetika pada Gambar 8 menunjukkan respon sistem risetime 0.31 detik, overshoot sebesar 1,6 % dan settlingtime 0,516 detik. Berdasarkan kriteria kestabilan yang ditentukan, respon sistem yang demikian apabila dianalisa menunjukkan bahwa respon sistem tersebut sudah masuk ke

dalam spesifikasi yang ditentukan dalam penelitian. Pemenuhan spesifikasi dibuktikan dengan *risetime* yang dihasilkan lebih cepat dari 1 detik, *settlingtime* lebih cepat dari 3 detik dan *overshoot* kurang dari 20 %. Solusi parameter yang dihasilkan dalam optimasi parameter PID menggunakan algoritma gentika yaitu $K_p = 0,0688$ $K_i = 0,0179$ dan $K_d = 0,9906$ dan *fitnes* = 1,2138.

3.4 Respon Hasil Metode Algoritma Genetika

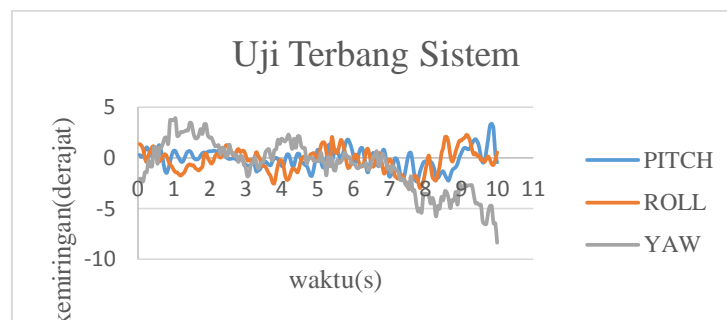
Hasil respon sistem pada *quadrotor* dengan optimasi parameter PID menggunakan algoritma genetika pada sudut *roll* menghasilkan *risetime* 0,75, *overshoot* sebesar 9 %, serta *settlingtime* 2,85 detik. Berdasarkan ketentuan kriteria kestabilan *quadrotor* dapat dianalisa bahwa *risetime* yang dihasilkan sudah memenuhi kriteria yang diinginkan yaitu lebih cepat dari 1 detik, demikian juga pada *overshoot* yang besar maksimal harus kurang dari 20 % dan *settlingtime* lebih cepat dari 3 detik. *Steady state error* yang pada grafik menunjukkan berada pada rentang 3,13 derajat *counterclockwise* hingga 3,1 derajat *clockwise*. Rentang *error* yang dihasilkan pada optimasi dengan algoritma genetika memenuhi *steady state error* kebutuhan sistem yang diinginkan yaitu 5 % dari nilai yang dikendalikan.

Hasil respon sistem pada *quadrotor* dengan optimasi parameter PID menggunakan algoritma genetika pada sudut *pitch* menghasilkan *risetime* 0,8, *overshoot* sebesar 9 %, serta *settlingtime* 2,85 detik. Mengacu pada batas kriteria kestabilan, *risetime* yang dihasilkan sudah memenuhi kriteria yang diinginkan yaitu lebih cepat dari 1 detik, demikian juga pada *overshoot* yang besar maksimal harus kurang dari 20 % dan *settlingtime* lebih cepat dari 3 detik. *Steady state error* yang pada grafik menunjukkan berada pada rentang 3,13 derajat *counterclockwise* hingga 3,1 derajat *clockwise*. Rentang *error* yang dihasilkan pada optimasi dengan algoritma genetika memenuhi *steady state error* kebutuhan sistem yang diinginkan yaitu 5 % dari nilai yang dikendalikan.

Hasil respon sistem pada *quadrotor* dengan optimasi parameter PID menggunakan algoritma genetika pada sudut *yaw* menghasilkan *risetime* 1,05, *overshoot* maksimum sebesar 19,18 %, serta *settlingtime* 4,3 detik. Mengacu pada kriteria kestabilan, dapat dianalisa bahwa *risetime* yang dihasilkan sudah memenuhi kriteria yang diinginkan yaitu lebih cepat dari 4 detik, demikian juga pada *overshoot* yang besar maksimal harus kurang dari 20 % dan *settlingtime* lebih cepat dari 6 detik. *Steady state error* yang pada grafik menunjukkan berada pada rentang 9,02 derajat *counterclockwise* hingga 6,58 derajat *clockwise*. Rentang *error* yang dihasilkan pada optimasi dengan algoritma genetika memenuhi *steady state error* kebutuhan sistem yang diinginkan yaitu pada rentang 18 derajat *counterclockwise* hingga 18 derajat *clockwise*.

3.5 Uji Terbang Quadrotor

Uji terbang *quadrotor* dilakukan dengan cara menerbangkan *quadrotor* pada lingkungan terbuka untuk diamati respon sistem yang dihasilkan. Pada uji terbang ini parameter yang dihasilkan pada optimasi PID dengan algoritma genetika dan telah divalidasi, diterapkan pada sistem *quadrotor*. Gambar 9 adalah grafik sudut terbang pada *pitch*, *roll*, serta *yaw* dalam 10 detik.



Gambar 9 Grafik hasil uji terbang

Respon sistem pada sudut *roll* saat terbang menghasilkan sudut simpangan terbesar pada sudut kemiringan 2,99 derajat *counterclockwise*. Sudut tersebut merupakan simpangan yang normal karena memenuhi kriteria kestabilan dalam penelitian, selain itu penerbangan *quadrotor* dilakukan di ruang terbuka sehingga bisa dimungkinkan terjadi ketidakstabilan karena faktor luar. *Steady state error* respon sistem pada sudut *roll* yang dihasilkan berada pada rentang 2,99 derajat *counterclockwise* hingga 2,27 derajat *clockwise*. Berdasarkan kriteria spesifikasi respon sistem yang ditentukan dalam penelitian, maka *steady state error* yang dihasilkan dalam pengendalian *quadrotor* sudah memenuhi.

Respon sistem pada sudut *pitch* saat uji terbang menghasilkan simpangan kemiringan terbesar pada sudut 3,37 derajat *clockwise*. Sudut tersebut merupakan simpangan yang normal karena memenuhi kriteria kestabilan dalam penelitian dan juga penerbangan dilakukan di ruang terbuka dengan kondisi yang dimungkinkan terkena maupun faktor luar sehingga terjadi ketidakstabilan. *Steady state error* respon sistem pada sudut *pitch* yang dihasilkan berada pada rentang 2,34 derajat *counterclockwise* hingga 3,37 derajat *clockwise*. Berdasarkan kriteria spesifikasi respon sistem yang diinginkan, *steady state error* yang dihasilkan sudah memenuhi yaitu seperti pada spesifikasi sudut *roll* berada pada rentang simpangan 4,5 derajat *counterclockwise* hingga 4,5 derajat *clockwise*.

Respon sistem pada sudut *yaw* saat uji terbang menghasilkan sudut simpangan terbesar pada sudut 8,39 derajat *counterclockwise*. Sudut tersebut merupakan simpangan yang normal karena sudah memenuhi kriteria yang ditentukan dalam penelitian, selain itu juga penerbangan dilakukan pada ruang terbuka sehingga dimungkinkan terjadi gangguan kestabilan karena faktor luar. *Steady state error* sistem pada sudut *yaw* yang dihasilkan berada pada rentang 8,39 derajat *counterclockwise* hingga 3,89 derajat *clockwise*. Berdasarkan kriteria spesifikasi respon sistem yang ditentukan dalam penelitian, *steady state error* pada respon sistem sudut *yaw* sudah memenuhi dengan rentang minimal 18 derajat *counterclockwise* hingga maksimal 18 derajat *clockwise*.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, kesimpulan yang bisa diambil adalah telah berhasil dirancang dan diimplementasikan metode optimasi parameter PID berdasarkan algoritma genetika pada kendali *quadrotor* untuk mencapai kestabilan *quadrotor* pada sudut *roll*, *pitch*, dan *yaw* dengan rincian sebagai berikut:

1. Pengujian perbandingan parameter algoritma genetika menunjukkan bahwa variasi parameter mempengaruhi tingkat konvergen hasil optimasi. Tingkat konvergen hasil optimasi terbaik ditunjukkan pada variasi parameter jumlah generasi sebesar 100 dan 150, jumlah individu dalam satu populasi sebesar 10 dan 20, serta besar peluang mutasi sebesar 0,1.
2. Hasil pengujian kendali PID dengan penalaan *Ziegler Nichols* menggunakan simulasi MATLAB pada sudut *pitch*, *roll* maupun *yaw* menunjukkan bahwa respon sistem yang dihasilkan belum memenuhi kriteria kestabilan yang ditentukan dalam penelitian sehingga belum cocok diterapkan pada *quadrotor* untuk pengendalian kestabilan terbang.
3. Hasil pengujian kendali PID yang telah dioptimasi dengan algoritma genetika menggunakan simulasi MATLAB pada sudut *pitch*, *roll*, dan *yaw* menunjukkan bahwa respon sistem yang dihasilkan sudah memenuhi kriteria kestabilan yang ditentukan dalam penelitian ini sehingga dianggap cocok diterapkan pada *quadrotor* untuk pengendalian kestabilan terbang.
4. Hasil pengujian kendali PID dengan optimasi algoritma genetika pada sudut *roll*, *pitch*, *yaw*, *quadrotor* menunjukkan respon sistem dihasilkan tersebut sudah memenuhi kriteria kestabilan pada sudut *yaw* yang ditentukan dalam penelitian.
5. Uji terbang *quadrotor* menunjukkan *steady state error* pada sudut *roll* yaitu pada rentang 2,99 derajat *counterclockwise* hingga 2,27 derajat *clockwise*, pada sudut *pitch*

yaitu pada rentang 2,34 derajat *counterclockwise* hingga 3,37 derajat *clockwise*, pada sudut *yaw* yaitu pada rentang 8,39 derajat *counterclockwise* hingga 3,89 derajat *clockwise*. *Steady state error* tersebut memenuhi kriteria kestabilan *quadrotor* yang ditentukan dalam penelitian.

5. SARAN

Penelitian ini masih terdapat beberapa hal yang perlu disempurnakan. Berikut saran yang dikemukakan untuk penelitian selanjutnya yang berhubungan dengan penelitian ini :

1. Diperlukan peningkatan penelitian dan penelitian lebih mendalam untuk merancang dan membuat sistem kendali berdasarkan metode optimasi genetika secara *online*
2. Penambahan kendali ketinggian dan posisi *quadrotor* agar *quadrotor* dapat terbang lebih stabil.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh keluarga E-drones yang telah mendukung dan membantu dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Dharmawan, Y. Y. Simanungkalit, and N. Y. Megawati, "Pemodelan Sistem Kendali PID pada Quadcopter dengan Metode Euler Lagrange," *IJEIS (Indonesian J. Electron. Instrum. Syst.*, vol. 4, no. 1, pp. 13–24, Apr. 2014 [Online]. Available: <https://jurnal.ugm.ac.id/ijeis/article/view/4218>. [Accessed: 31-Oct-2017]
- [2] Lee, K., Kim, H., Park, J. B. dan Choi, Y. H., 2012, Hovering Control of a Quadrotor. *International Conference on Control, Automation, and Systems*.
- [3] Ashari, A., Lelono, D., Usuman, I., Dharmawan A., dan Supardi, T., 2012, *Sistem Kendali dan Muatan Quadcopter Sebagai Sistem Pendukung Evakuasi Bencana*, Prosiding InSINas;.
- [4] Raharja, Iswanto, N., Wahyunggoro, O., dan Cahyadi, A., 2015, Altitude Control for Quadrotor with Mamdani Fuzzy Model, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Journal*.
- [5] Singh, R., and Sen, I., 2004, Tuning OF PID Controller based AGC System Using Genetic Algorithms, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Journal*.
- [6] Navajas, G. T. and Prada, S. R., 2014, Buiding Your Own Quadrotor : A Mechatronics System Design Case Study, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Journal*.
- [7] Ogata, K. , 2002, *Modern Control Engineering*.
- [8] Dharmawan, A and Rahani, F. F., 2016, Penalaan Mandiri Komponen PID dengan Metode JST pada Sistem Kendali Quadrotor, *Skripsi*, Universitas Gadjah Mada.
- [9] Saad, M. S., Jamaluddin, H and mat Darus, I. Z., 2012, Implementation od PID Controller Tuning using Differential Evolution and Genetic Algorithms, *International Conference on Informatics and Computing*.

- [10] Patra, J., Khuntia, P. S. dan Samal, S., 2013, Analysis and Comparison of Different Performance Index factor for Conventional PID & GA plus PID Controller, *Journal of Emerging Technologies ini Computational and Applied Sciences*, pp. 242-250.