

DESAIN SISTEM KONTROL ROBUST PID H_∞ CONTROL DENGAN OPTIMASI GENETIC ALGORITHM UNTUK ATTITUDE CONTROL QUADROTOR UAV

Muhammad Fadli Nasution ^{*)}, Aris Triwiyatno, and Budi Setiyono

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}E-mail: nasution.fadli@gmail.com

Abstrak

Sistem yang robust sangat penting dalam desain sistem kontrol karena sistem di dunia nyata rentan terhadap gangguan eksternal. Beberapa teknik untuk merancang sebuah kontroler yang robust memiliki struktur yang rumit dan orde yang tinggi, namun hal tersebut sangat dihindari dalam praktek kerja. Untuk mengatasi masalah ini, dirancang kontroler dengan struktur yang tetap. Penelitian ini membahas model dan kontroler quadrotor uav. Metode Euler-Newton digunakan untuk memodelkan persamaan dinamika quadrotor. Teknik kontrol yang digunakan dalam perancangan kontroler robust PID berdasarkan teori H_∞ loop shaping dan H_∞ mixed sensitivity dengan struktur kontroler PID. Pole loop tertutup dari sistem kontrol ditempatkan pada daerah kiri garis bidang-s untuk menjaga stabilitas sistem. Algoritma genetika digunakan untuk menyelesaikan dan mendapatkan parameter kontroler. Berdasarkan pengujian yang dilakukan dengan menerapkan PID, robust PID H_∞ mixed sensitivity dan robust PID H_∞ loop shaping kontroler ke dalam sistem attitude Quadrotor, kontroler robust PID H_∞ loop shaping pada sistem kontrol roll memiliki settling time lebih cepat daripada PID dan robust PID H_∞ mixed sensitivity. Demikian pula, ketika robust PID H_∞ loop shaping kontroler diterapkan pada sistem kontrol pitch dan yaw.

Kata kunci: H_∞ loop shaping, H_∞ mixed sensitivity, Robust PID control, Quadrotor uav

Abstract

Robustness is importance in control-system design because real systems are vulnerable to external disturbance. many techniques for designing a robust controller have complicated structure and high order. It is well known that a high order or complicated structure controller is not desired in practical work. To overcome this problem, a fixed-structure robust controller is designed. This research presented the modelling and control of a quadrotor uav. The Euler-Newton formalism was used to model the dynamic system. The proposed control for designing a robust PID controller for attitude quadrotor based on H_∞ loop shaping and H_∞ mixed sensitivity with PID structured controller. The closed-loop poles of the controlled system was placed in left-hand side of a vertical line in the complex s-plan in order to maintain the stability of system. Genetic algorithm (GA) is applied to solve and achieve the control parameters. Based on testing that performed by applying PID, robust PID H_∞ mixed sensitivity and robust PID H_∞ loop shaping controller on attitude quadrotor, robust PID H_∞ loop shaping controller on roll control system had faster settling time than PID and robust PID H_∞ mixed sensitivity system response. Similarly, when robust PID H_∞ loop shaping applying on pitch and yaw control system.

Keyword : H_∞ loop shaping, H_∞ mixed sensitivity, Robust PID control, Quadrotor uav

1. Pendahuluan

Sistem kontrol *robust* adalah sebuah kontroler yang mampu menjaga stabilitas dan performansi sistem terlepas dari ketidakpastian dalam dinamika sistem di dalam lingkungan kerja tertentu. Sistem yang *robust* merupakan hal yang penting dalam suatu desain kontrol karena sistem di dunia nyata sangat rentan terhadap gangguan dan *noise*[1].

Berdasarkan prosedur standar kontrol *robust*[2], terdapat banyak teknik dalam merancang kontrol *robust*. Contohnya fungsi *mixed sensitivity*, *mu-synthesis*, *H_∞ Loop Shaping* dll. Namun kontroler yang dirancang dengan teknik ini memiliki struktur yang rumit dengan orde yang tinggi. [3].

Kontroler PID telah umum digunakan dalam aplikasi industri karena kesederhanaan fungsi. Dalam metode klasik kontroler PID, karakteristik dari nominal sistem sangat diperhatikan, namun stabilitas dan performa yang *robust* tidak jelas dalam hal ini[4]. Di sisi lain, dalam beberapa tahun terakhir beberapa metode perancangan kontroler *robust PID* telah di ajukan dalam beberapa masalah pengontrolan[5]-[8].

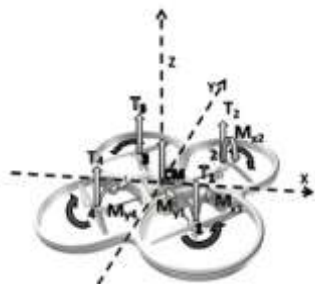
Quadrotor adalah wahana kecil dengan 4 rotor di sekeliling badan utama[9]. Beberapa studi untuk pengontrolan *quadrotor* telah dilakukan seperti kontroler PD[10], *linearisasi feedback* dan *BS-PID*[11], atau kontroler LQ[12], tetapi kebanyakan mengontrol sistem tanpa memasukkan ketidakpastian sistem yang merupakan aspek penting dalam stabilitas suatu sistem.

Penelitian ini bertujuan merancang sistem kendali *robust PID* berdasarkan teori *H_∞ loop shaping* dan *H_∞ mixed sensitivity* yang parameternya dioptimasi menggunakan algoritma genetika untuk mengendalikan *attitude quadrotor*. Sistem kontrol ini diharapkan dapat mengatasi ketidakpastian sistem dengan tetap menjaga struktur kontroler yang sederhana.

2. Metode

2.1 Pemodelan Quadrotor

Sebuah *quadrotor* terdiri dari empat lengan yang saling tegak lurus, masing-masing dengan sebuah motor dan rotor. Sistem ini terdiri dari dua pasang rotor berlawanan. Untuk menyeimbangkan torsi, satu pasang berputar searah jarum jam, sementara lainnya berputar berlawanan arah jarum jam. *Quadrotor* memiliki enam derajat kebebasan, Cartesian (*X, Y, Z*) dan sudut (ϕ, θ, ψ)[13].



Gambar 1. Gaya dan torsi yang dihasilkan oleh penggerak *Quadrotor*.

Persamaan (1)-(6) merupakan persamaan *Quadrotor* yang diturunkan dari metode *Euler-Newton*.

$$\ddot{X} = (\sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m} \quad (1)$$

$$\ddot{Y} = (-\cos \psi \sin \phi \sin \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m} \quad (2)$$

$$\ddot{Z} = -g + (\cos \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m} \quad (3)$$

$$\dot{p} = \frac{I_{YY} - I_{ZZ}}{I_{XX}} q r - \frac{I_{TP}}{I_{XX}} q \Omega + \frac{U_2}{I_{XX}} \quad (4)$$

$$\dot{q} = \frac{I_{ZZ} - I_{XX}}{I_{YY}} p r + \frac{I_{TP}}{I_{YY}} p \Omega + \frac{U_3}{I_{YY}} \quad (5)$$

$$\dot{r} = \frac{I_{XX} - I_{YY}}{I_{ZZ}} p q + \frac{U_4}{I_{ZZ}} \quad (6)$$

Persamaan (7) menggambarkan hubungan antara kecepatan sudut *Quadrotor* dalam *B-frame* dengan kecepatan acuan kerangka *Quadrotor E-frame* menggunakan matriks transfer T_{Θ} yang diturunkan dari persamaan *Euler*.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = T_{\Theta}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Dengan T_{Θ}^{-1} dan T_{Θ} berdasarkan persamaan (8) dan (9).

$$T_{\Theta}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s_{\theta} \\ 0 & c_{\theta} & c_{\theta} s_{\phi} \\ 0 & -s_{\phi} & c_{\theta} c_{\phi} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$T_{\Theta} = \begin{bmatrix} 1 & s_{\phi} t_{\theta} & c_{\phi} t_{\theta} \\ 0 & c_{\phi} & -s_{\phi} \\ 0 & \frac{s_{\phi}}{c_{\theta}} & \frac{c_{\phi}}{c_{\theta}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Sedangkan input dari persamaan umum (1)-(6) ditentukan dari persamaan (10)-(14).

$$U_1 = b (\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (10)$$

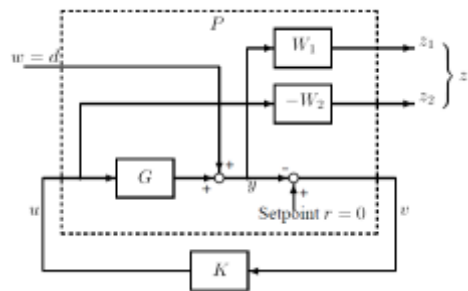
$$U_2 = b l (\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \quad (11)$$

$$U_3 = b l (\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \quad (12)$$

$$U_4 = d (\Omega_2^2 + \Omega_4^2 - \Omega_1^2 - \Omega_3^2) \quad (13)$$

$$\Omega = -\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4 \quad (14)$$

2.2 Mixed-sensitivity H_∞ control

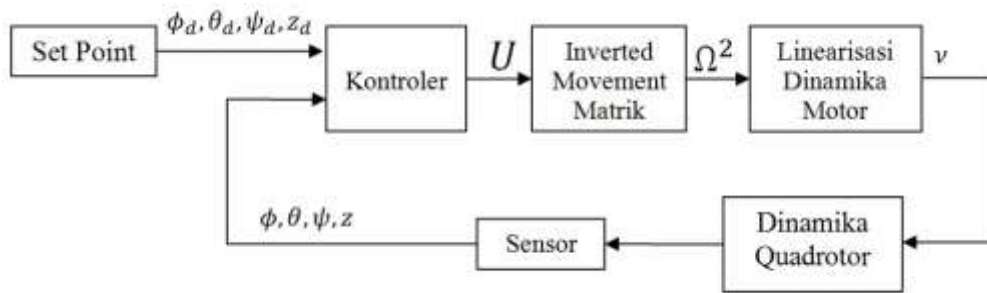


Gambar 2. *S/KS mixed-sensitivity*[2]

Mixed-sensitivity adalah suatu metode kontrol *robust* yang mempunyai bentuk problem dengan *sensitivity function* $S = (I + GK)^{-1}$ yang dibentuk bersama dengan satu atau lebih fungsi lain seperti fungsi *KS* ataupun fungsi *complementary sensitivity* $T = 1 - S$ dengan bentuk[2]

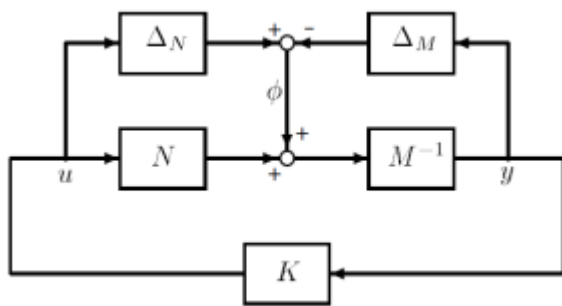
$$\left\| \begin{bmatrix} W_1 S \\ W_2 K S \end{bmatrix} \right\|_{\infty} \quad (15)$$

Dimana W_1 dan W_2 adalah fungsi pembobotan. Perancangan *mixed sensitivity* ini disebut *S/KS mixed sensitivity* adalah desain dengan tujuan stabilitas *robust* untuk plant nominal dengan *additive perturbation*[1].



Gambar 4. Sistem kontrol umpan balik quadrotor

2.3 H ∞ control Loop-Shaping Design



Gambar 3. H ∞ control Loop-Shaping Design[1]

Pada gambar 3 diperlihatkan plant dengan gangguan *normalised left coprime factorization* dan stabilitas *robust* digunakan dalam hal ini untuk merancang kontroler *H ∞ loop-shaping*[1][2].

perancangan kontroler ini digunakan dua gangguan yang stabil, Meskipun deskripsi ketidakpastian ini terkesan tidak realistis dan kurang intuitif dari pada yang lain. ini sebenarnya cukup untuk tujuan stabilitas *H ∞* yang robust. Plant *G* memiliki *normalized left coprime factorization* Sehingga *G_p* Plant dengan gangguan bisa ditulis sebagai

$$G_p = (M + \Delta_M)^{-1}(N + \Delta_N) \tag{16}$$

Dimana Δ_M, Δ_N adalah fungsi alih yang stabil yang merepresentasikan ketidakpastian nominal model dari plant *G*. Tujuan stabilisasi robust tidak hanya untuk nominal model plant *G*, tapi kesatuan plant dengan gangguan yang didefinisikan oleh

$$G_p = \{(M + \Delta_M)^{-1}(N + \Delta_N)\} : \|\Delta_M \Delta_N\|_\infty < \epsilon \tag{17}$$

Dimana $\epsilon > 0$ adalah batas stability

Untuk sistem loop tertutup dengan gangguan seperti gambar, maka akan stabil dengan *robust* jika dan hanya jika sistem loop tertutup stabil dan meminimalkan fungsi

$$\gamma = \left\| \begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix} (I - GK)^{-1} \hat{M}^{-1} \right\|_\infty \tag{18}$$

2.4 Implementasi model attitude quadrotor

Strategi control quadrotor yang digunakan adalah seperti gambar 4. Untuk keperluan perhitungan, simulasi dan analisis, nilai parameter model dinamika quadrotor yang digunakan adalah nilai pada tabel 1.

Tabel 1. Parameter model dinamika Quadrotor[15]

Simbol	Satuan	Nilai	Keterangan
<i>b</i>	N.s ²	54,2 × 10 ⁻⁶	faktor thrust
<i>d</i>	N.m.s ²	1,1 × 10 ⁻⁶	faktor drag
<i>g</i>	m.s ⁻²	9,81	percepatan gravitasi
<i>I_{xx}</i>	N.m.s ²	8,3 × 10 ⁻³	momen inersia pada sumbu x
<i>I_{yy}</i>	N.m.s ²	8,8 × 10 ⁻³	momen inersia pada sumbu y
<i>I_{zz}</i>	N.m.s ²	15,5 × 10 ⁻³	momen inersia pada sumbu z
<i>J_M</i>	N.m.s ²	5,39 × 10 ⁻⁶	momen inersia sumbu motor
<i>J_{BB}</i>	N.m.s ²	17,29 × 10 ⁻⁶	momen inersia sumbu baling-baling
<i>J_{PBB}</i>	N.m.s ²	5 × 10 ⁻⁷	momen inersia penutupbaling-baling
<i>J_{TP}</i>	N.m.s ²	2,3 × 10 ⁻⁵	momen inersia total sekitar sumbu motor
<i>K_E</i>	V.s/rad	5,8 × 10 ⁻³	konstanta elektrik motor
<i>K_M</i>	N.m/A	5,8 × 10 ⁻³	konstanta mekanik motor
<i>l</i>	M	0,23	Jarak pusat baling-baling terhadap pusat Quadrotor
<i>m</i>	Kg	1,2	massa Quadrotor keseluruhan
<i>R</i>	Ohm	41,2 × 10 ⁻³	hambatan motor

2.5 Strategi kontrol quadrotor

Persamaan (1)-(6) diatas akan disederhanakan menggunakan pertimbangan sebagai berikut[14]:

- Quadrotor pada saat *hovering*, hanya terjadi perubahan sudut yang kecil. maka persamaan percepatan sudut dapat disederhanakan.
- Percepatan sudut direferensikan terhadap sudut quadrotor yang di ukur dalam frame tetap, pada saat *hovering* persamaan percepatan direferensikan langsung terhadap percepatan sudut euler.
- Dalam tugas akhir ini, hanya untuk menstabilkan attitude (Sudut euler) dan tinggi quadrotor, maka persamaan posisi X dan Y bisa dihapus

Menggunakan 3 pertimbangan diatas persamaan (1)-(6) bisa disederhanakan menjadi:

$$\begin{aligned} \ddot{z} &= -g + (\cos\theta\cos\phi)\frac{U_1}{m} \\ \ddot{\phi} &= \frac{U_2}{I_{xx}} \\ \ddot{\theta} &= \frac{U_3}{I_{yy}} \\ \ddot{\psi} &= \frac{U_4}{I_{zz}} \end{aligned} \quad (19)$$

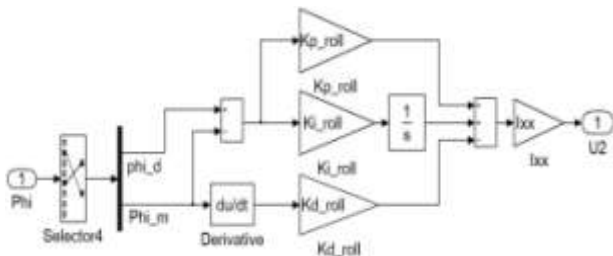
2.5.1 Perancangan kendali PID konvensional

Pada penelitian ini struktur blok kendali PID yang digunakan adalah struktur PID paralel yang tidak saling tergantung (*independent*).

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_d \frac{d}{dt}e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) \quad (20)$$

A. Roll control

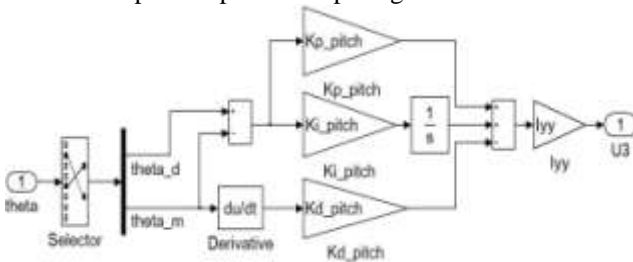
Mengacu pada persamaan (19) blok diagram dari sistem kontrol PID roll dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 5. Blok diagram roll control

B. Pitch control

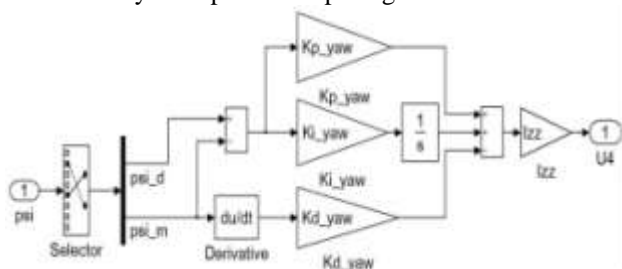
Mengacu pada persamaan (19) blok diagram dari sistem kontrol PID pitch dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 6. Blok diagram pitch control

C. Yaw control

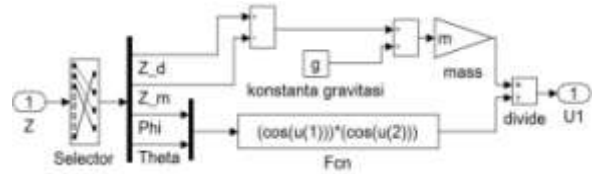
Mengacu pada persamaan (19) blok diagram dari sistem kontrol PID yaw dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 7. Blok diagram yaw control

D. Height control (kontrol ketinggian)

Mengacu pada persamaan (19) blok diagram dari sistem kontrol untuk kontrol ketinggian dapat dilihat pada gambar 9.



Gambar 8. Blok diagram height control

2.5.2 Robust design

A. Perancangan kontroler PID IAE

Pada perancangan kendali PID ini digunakan GA sebagai optimisasi untuk mendapatkan parameter kontroler.

Langkah 1: Tentukan struktur *K* seperti persamaan (20)

Langkah 2: Tentukan parameter GA seperti populasi, probabilitas pindah silang probabilitas mutasi, maksimum generasi dan lainnya

Langkah 3: Evaluasi fungsi fitness - (*Jcost*) untuk setiap kromosom dengan

$$Jcost = I_{IAE} = \int_0^T |e(t)| dt \quad (21)$$

Jika pole loop sistem kontrol tertutup berada di sisi kanan garis bidang-s buat *Jcost* sangat besar, pilih kromosom dengan fungsi fitness paling kecil sebagai solusi dari generasi tersebut jadikan Gen=1

Langkah 4: Tingkatkan Gen untuk satu langkah

Langkah 5: Jika generasi kurang dari generasi maksimal, buat populasi baru menggunakan GA lalu ulangi langkah 4

Jika sudah mencapai generasi maksimal, stop.

B. Perancangan kontroler Robust PID H ∞ Mixed sensitivity

Pada perancangan kendali *Robust PID H ∞ Mixed sensitivity* ini digunakan GA sebagai optimisasi untuk mendapatkan parameter kontroler.

Langkah 1: Bentuk nilai singular dari *W₁S* dan *W₂*

Langkah 2: Tentukan struktur *K* seperti persamaan (20)

Langkah 3: Tentukan parameter GA.

Langkah 4: Evaluasi fungsi fitness - (*Jcost*) untuk setiap kromosom dengan

$$Jcost = \left\| \begin{bmatrix} W_1 S \\ W_2 K S \end{bmatrix} \right\|_{\infty} \quad (22)$$

Jika pole loop sistem kontrol tertutup berada di sisi kanan garis bidang-s buat *Jcost* sangat besar, pilih

kromosom dengan cost function paling kecil sebagai solusi dari generasi tersebut jadikan Gen=1

Langkah 5: Tingkatkan Gen untuk satu langkah

Langkah 6: Jika generasi kurang dari generasi maksimal, buat populasi baru menggunakan GA lalu ulangi langkah 5

Jika sudah mencapai generasi maksimal, stop.

C. Perancangan kontroler *Robust PID H ∞ Loop Shaping*

Pada perancangan kendali *Robust PID H ∞ Loop Shaping* ini digunakan GA sebagai optimisasi untuk mendapatkan parameter kontroler.

Langkah 1: Tentukan struktur K seperti persamaan (20)

Langkah 2: Tentukan parameter GA.

Langkah 3: Evaluasi fungsi fitness $-(Jcost)$ untuk setiap kromosom dengan

$$Jcost = \left\| \begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix} (I - GK)^{-1} \hat{M}^{-1} \right\|_{\infty} \quad (23)$$

Jika pole loop sistem kontrol tertutup berada di sisi kanan garis bidang-s buat $Jcost$ sangat besar, pilih kromosom dengan cost function paling kecil sebagai solusi dari generasi tersebut jadikan Gen=1

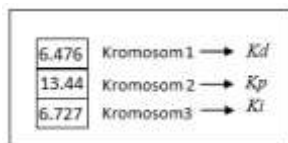
Langkah 4: tingkatkan Gen untuk satu langkah

Langkah 5: Jika generasi kurang dari generasi maksimal, buat populasi baru menggunakan GA lalu ulangi langkah 5

Jika sudah mencapai generasi maksimal, stop.

2.6 Algoritma Genetika

Pada penelitian ini, individu pada algoritma genetika dirancang menggunakan *real-number encoding*. Dimana setiap individu dikodekan dengan angka yang dibangkitkan secara acak yang berada dalam batas yang ditentukan.



Gambar 9. Ilustrasi individu pada algoritma genetika

Ukuran populasi dalam suatu generasi yang digunakan adalah 500 serta jumlah generasi yang digunakan adalah 500. Fungsi objektif dalam algoritma genetika ini adalah persamaan (21) untuk perancangan kontroler PID IAE, Persamaan (22) untuk perancangan kontroler *Robust PID H ∞ Mixed sensitivity* dan Persamaan (23) untuk perancangan kontroler *Robust PID H ∞ Loop Shaping*.

Dalam perancangan tugas akhir ini, nilai fungsi *fitness* diberikan oleh persamaan berikut

$$Fitness = -Jcost \quad (24)$$

Pada tugas akhir ini mutasi yang digunakan menggunakan algoritma *uniform mutation*. *Uniform mutation* mengambil secara acak sebuah variabel j , dan mengubah nilainya setara dengan nilai acak $U(a_i, b_i)$ [16]

$$\hat{x}_i = \begin{cases} U(a_i, b_i) & \text{if } i = j \\ x_i & \text{either} \end{cases} \quad (25)$$

Pada tugas akhir ini pindah silang yang digunakan menggunakan algoritma *Arithmetic crossover*. *Arithmetic crossover* membuat dua buah kombinasi komplemen yang linear dari induk, dimana $r = U(0,1)$ [16]

$$\hat{X} = rX + (1 - r)Y \quad (26)$$

$$\hat{Y} = (1 - r)X + rY$$

Proses seleksi yang digunakan pada algoritma genetika ini adalah *Normalised geometric selection*.

2.7 Perancangan kontrol posisi quadrotor

2.7.1 Model kontrol posisi quadrotor

Metode nya adalah tetap menjaga Ψ konstan. Gerakan sepanjang sumbu X disebabkan rotasi θ (pitch), dan gerakan sepanjang sumbu Y disebabkan rotasi Φ (roll). Keuntungan dari metode ini adalah kedua inputnya tidak saling terakait dan perubahan ketinggian tergantung terhadap perubahan *throttle*.

Maka didapatkan persamaan kontrol posisi quadrotor sebagai berikut:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\hat{x}_1}{\hat{z}_1 + g}\right) \quad (27)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{-\hat{y}_1}{\sqrt{\hat{x}_1^2 + (\hat{z}_1 + g)^2}}\right) \quad (28)$$

$$F = -\frac{m}{\sin\phi} \hat{y}_1 \quad (29)$$

2.7.2 Parameter kontrol posisi quadrotor

Dalam perancangan sistem kontrol position *Quadrotor* penting untuk menentukan parameter-parameter pengontrolannya, yaitu *parameter Proportional* (K_p), *parameter Integral* (K_i), dan *parameter Derivative* (K_d). Dalam penentuan parameter-parameternya, banyak cara yang bisa dilakukan, seperti tuning dengan cara trial and error, dengan metode optimisasi, metode *pole placement*, *Ziegler-nichols* dan lainnya. Namun *tuning* yang dilakukan pada pengontrolan posisi *Quadrotor* laporan ini menggunakan metode optimisasi yaitu *Simulink Design Optimization*.

3. Hasil dan Analisa

3.1 Tuning Parameter PID

Pemilihan Parameter PID berupa konstanta *Proportional*, *Integral*, dan *Derivative*-nya, dilakukan dengan cara

metode optimisasi menggunakan algoritma genetika. Hasil tuning Parameter PID dengan cara metode optimisasi menggunakan algoritma genetika dirangkum dalam Tabel 2.

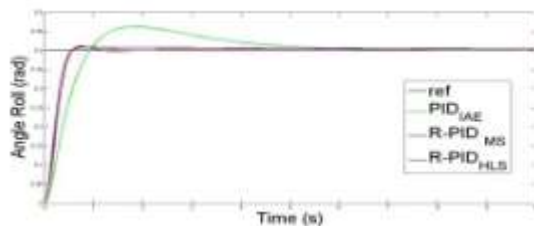
Tabel 2. Hasil tuning parameter PID menggunakan algoritma genetika

Kontroler	Mode	Kp	Ki	Kd
PID IAE	Roll	18.0696	9.2204	8.9459
	Pitch	16.1727	8.2077	7.9933
	Yaw	18.9714	9.5544	9.4600
R-PID MS	Roll	42.3821	3.9735	9.0634
	Pitch	26.7187	0.6817	9.4879
	Yaw	33.4860	3.1452	9.6257
R-PID HLS	Roll	30.1720	0.0609	6.6453
	Pitch	28.3845	0.0695	7.2925
	Yaw	33.2355	0.2999	9.4068

3.2 Perbandingan Sistem kontrol PID, R-PID MS dan R-PID HLS

3.2.1 Roll Control

Pengujian dilakukan dengan memberikan masukan nilai berupa nilai *setpoint* sebesar 0.2 rad, 0.3 rad dan 0.4 rad lalu hasil simulasi dibandingkan untuk setiap kontroler.



Gambar 10. Respon roll control dengan setpoint 0.4 rad

Respon pengujian sistem *roll control* terhadap *setpoint* normal dirangkum dalam Tabel 3.

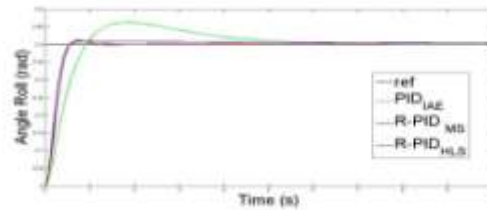
Tabel 3. Perbandingan respon pengujian setpoint normal (roll)

Setpoint (rad)	Kontroler	Rising time (s)	Settling time (s)	Integral Area Error
0.2	PID IAE	0.9082	6.008	0.1606
	R-PID MS	0.5378	8.408	0.07218
	R-PID HLS	0.536	1.02	0.05429
0.3	PID IAE	0.9131	6.142	0.2415
	R-PID MS	0.5432	8.942	0.1081
	R-PID HLS	0.5422	1.055	0.0895
0.4	PID IAE	0.9201	6.158	0.3221
	R-PID MS	0.5596	8.758	0.1441
	R-PID HLS	0.5542	1.1	0.1072

Dari Tabel 3, dapat diketahui bahwa respon sistem *roll control* pada *setpoint* 0,2 rad, 0,4 rad, dan 0,6 rad dengan R-PID HLS mencapai waktu *settling time* tercepat dibanding R-PID MS dan PID IAE. Berdasarkan nilai *Integral Area Error* (IAE) pada sistem, nilai IAE dengan R-PID HLS selalu lebih kecil dibanding IAE dengan R-PID MS dan PID IAE.

3.2.2 Pitch Control

Pengujian dilakukan dengan memberikan masukan nilai berupa nilai *setpoint* sebesar 0.2 rad, 0.3 rad dan 0.4 rad lalu hasil simulasi dibandingkan untuk setiap kontroler.



Gambar 11. Respon pitch control dengan setpoint 0.4 rad

Respon pengujian sistem *pitch control* terhadap *setpoint* normal dirangkum dalam Tabel 4

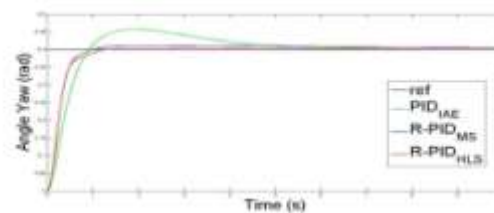
Tabel 4. Perbandingan respon pengujian setpoint normal (pitch)

Setpoint (rad)	Kontroler	Rising time (s)	Settling time (s)	Integral Area Error
0.2	PID IAE	0.8653	6.008	0.1616
	R-PID MS	1.137	1.825	0.08339
	R-PID HLS	0.602	1.244	0.05961
0.3	PID IAE	0.8593	5.942	0.2423
	R-PID MS	1.28	1.819	0.1244
	R-PID HLS	0.5922	1.286	0.09008
0.4	PID IAE	0.8586	5.958	0.3234
	R-PID MS	1.117	1.575	0.1644
	R-PID HLS	0.5767	1.198	0.1204

Dari Tabel 4, dapat diketahui bahwa respon sistem *pitch control* pada *setpoint* 0,2 rad, 0,4 rad, dan 0,6 rad dengan R-PID HLS mencapai waktu *settling time* tercepat dibanding R-PID MS dan PID IAE. Berdasarkan nilai *Integral Area Error* (IAE) pada sistem, nilai IAE dengan kontroler R-PID HLS selalu lebih kecil dibanding IAE dengan R-PID MS dan PID IAE.

3.2.3 Yaw Control

Pengujian dilakukan dengan memberikan masukan nilai berupa nilai *setpoint* sebesar 0.2 rad, 0.3 rad dan 0.4 rad lalu hasil simulasi dibandingkan untuk setiap kontroler.



Gambar 12. Respon yaw control dengan setpoint 0.4 rad

Respon pengujian sistem yaw control terhadap setpoint normal dirangkum dalam Tabel 5

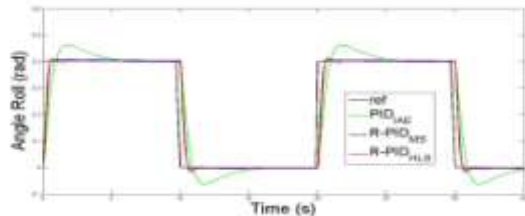
Tabel 5. Perbandingan respon pengujian setpoint normal (yaw)

Setpoint rad)	Kontroler	Rising time (s)	Settling time (s)	Integral Area Error
0.2	PID IAE	0.9082	6.008	0.1581
	R-PID MS	0.8688	8.608	0.08895
	R-PID HLS	1.244	1.244	0.06304
0.3	PID IAE	0.9062	6.142	0.235
	R-PID MS	0.9476	8.942	0.1324
	R-PID HLS	1.286	1.286	0.09428
0.4	PID IAE	0.9066	6.358	0.3101
	R-PID MS	0.9989	8.758	0.1757
	R-PID HLS	1.32	1.32	0.1263

Dari Tabel 5, dapat diketahui bahwa respon sistem yaw control pada setpoint 0,2 rad, 0,4 rad, dan 0,6 rad dengan R-PID HLS mencapai waktu settling time tercepat dibanding R-PID MS dan PID IAE. Berdasarkan nilai Integral Area Error (IAE) pada sistem, nilai IAE dengan kontroler R-PID HLS selalu lebih kecil dibanding IAE dengan R-PID MS dan PID IAE.

3.3 Pengujian terhadap Setpoint Naik-Turun

Pengujian terhadap setpoint naik-turun dilakukan dengan masukan sistem berupa sinyal gelombang kotak dengan nilai setpoint naik-turun sebesar 0,3 rad.



Gambar 13. Respon sistem roll setpoint naik-turun

Respon pengujian sistem yaw control terhadap setpoint normal dirangkum dalam Tabel 6

Tabel 6. Perbandingan IAE pengujian setpoint naik-turun

Sistem	Integral Area Error Kontroler		
	PID IAE	R-PID MS	R-PID HLS
Roll	1.243	0.4951	0.404
Pitch	1.301	0.6359	0.4864
Yaw	1.235	0.6346	0.4852

Berdasarkan perbandingan nilai IAE dari tabel 6, dapat diketahui bahwa pada sistem kontroler R-PID HLS selalu lebih kecil dari pada kontroler R-PID MS dan PID IAE.

3.4 Position Control

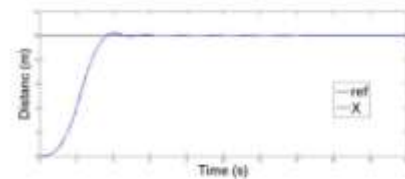
3.4.1 Tuning Parameter Position Control

Tuning parameter position control menggunakan Simulink Signal constraint. Dari Tuning Parameter tersebut didapatkan parameter sebagai berikut:

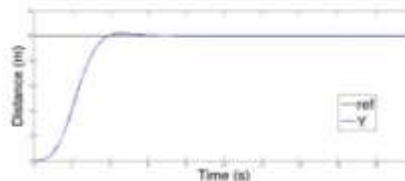
$K_{pz}=70$, $K_{iz}=22.6791$, $K_{dz}=13.2304$.
 $K_{px}=2.4795$, $K_{dx}=3.2056$.
 $K_{py}=1.2883$, $K_{dy}=1.7667$.

3.4.2 Position Control

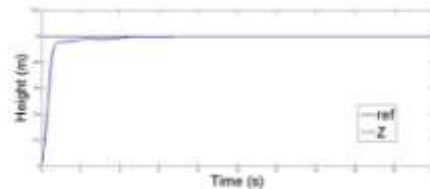
Pengujian terhadap position control dilakukan dengan masukan sistem berupa sinyal step $X=10$, $Y=10$ dan $Z=1$. Kontrol posisi quadrotor dengan konfigurasi seperti dalam tugas akhir ini sangat bergantung kepada stabilitas kontrol attitude quadrotor. Oleh karena itu kontroler yang dipakai adalah kontrol R-PID HLS dalam kontrol posisi ini untuk mengontrol stabilitasnya. Berikut hasil simulasi pengendalian posisi quadrotor UAV pada tugas akhir ini



Gambar 14. Simulasi Position kontrol gerak translasi X

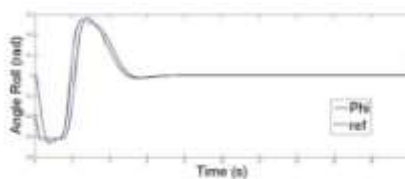


Gambar 15. Simulasi Position kontrol gerak translasi Y

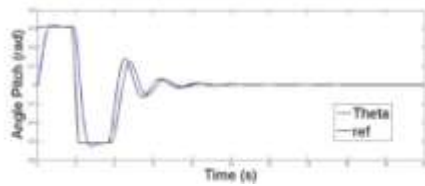


Gambar 16. Simulasi Position kontrol gerak translasi Z

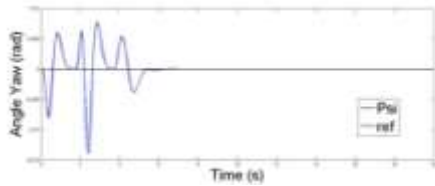
Dengan konsep kontroler menggunakan inner kontroler berupa attitude kontroler, menyebabkan quadrotor stabil. Dengan desain inner kontroler yang robust maka sistem akan lebih cepat merespon masukan. Berikut hasil simulasi attitude control saat quadrotor bergerak pada posisi tertentu.



Gambar 17. Hasil Simulasi stabilitas attitude quadrotor saat mode position control (Roll)



Gambar 18. Hasil Simulasi stabilitas attitude quadrotor saat mode position control (Pitch)



Gambar 19. Hasil Simulasi stabilitas attitude quadrotor saat mode position control (Yaw)

4. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa penggunaan algoritma genetika dapat menentukan parameter kontroler PID ataupun R-PID. Pengontrolan sistem attitude quadrotor dengan menggunakan *robust PID H_{∞} loop shaping* mempunyai indeks *performance* yang lebih baik dari pengontrolan dengan menggunakan PID dan *robust PID H_{∞} mixed sensitivity*, Kontroler *robust PID H_{∞} loop shaping* yang digunakan saat *position control* berhasil menjaga stabilitas dan performansi attitude quadrotor.

Referensi

- [1]. D.W. Gu, P. Hr. Petkov dan M. M. Konstantinov, *Robust Control Design with MATLAB[®]*, Springer, 2005.
- [2]. S. Skogestad dan I. Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control Analysis and Design*. 2nd ed. New York: John Wiley & Son, 1996.
- [3]. Chaiya, Ukrit dan Somyot Kaitwanidvilai, *Fixed-Structure Robust DC Motor Speed Control*, Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists 2009 Vol II, Hong Kong, March 18 – 20 2009
- [4]. Y. Ohta, J. Li, K. Tagawa and H. Haneda, *Robust PID Controller Design*, Proceedings of NOLTA'97, pp.1053-1056
- [5]. Miklosovic, R. and Gao, Z., *A robust two-degree-of freedom control design technique and its practical application*, Conference Record-IAS Annual Meeting IEEE Industry Applications Society, Seattle, WA, United States, pp. 1495-1502, 2004.
- [6]. S. Hara, T. Iwasaki, and D. Shiokata, *Robust PID control using generalized KYP synthesis: Direct open-loop shaping in multiple frequency ranges*, IEEE Control Systems Magazine, vol.26, pp. 80-91, February, 2006.
- [7]. Ou , Linlin., et al., *H_{∞} robust design of PID controllers for arbitrary-order LTI systems with time delay*, Decision

- and Control and European Control Conference (CDC-ECC), 2011 50th IEEE Conference, pp.1884,1889, 12-15 Dec. 2011
- [8]. Ahuja, Ashu., dan Tandon, Bhawna., *Robust PID and Polynomial Controllers Tuning for DC Motor Speed Control Using PSO and GA: Comparative Study*, International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research (IJEEER) ISSN 2250-155X Vol. 3, Issue 1, pp , 273-286, Mar 2013
- [9]. Atheer L, Salih., et al., *Flight PID controller design for a UAV quadrotor*. Scientific Research and Essays Vol. 5(23), pp. 3660-3667, 4 December, 2010.
- [10]. Erginer, Bora dan Erdinç Altuğ, *Modeling and PD Control of a Quadrotor VTOL Vehicle*, Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Istanbul, Turkey, 2007.
- [11]. Tayebi, Abdelhamid and Stephen McGilvray, *Attitude Stabilization of a VTOL Quadrotor Aircraft*, IEEE Transactions on control system technology, VOL. 14, NO. 3, MAY 2006.
- [12]. S. Bouabdallah, A. Noth, et al., *PID vs LQ control techniques applied to an indoor micro quadrotor*, in Proc. (IEEE) International Conference on Intelligent Robots (IROS'04), Sendai, Japan, 2004
- [13]. Nicol, C., Macnab, C. J. B., Ramirez-Serrano, A., *Robust neural network control of a quadrotor helicopter*, in Proceedings of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2008, pp. 1233-1237.
- [14]. Bresciani, Tomasso, *Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter*, Master Thesis Lund University, Sweden, 2008.
- [15]. Danil S, Oka., Triwiyatno, Aris dan Setiyono, Budi., *Pemodelan dan simulasi roll pitch dan yaw pada quadrotor*, TRANSMISI, 14, (2), 2012, 105, 2012
- [16]. C Houck., et al., *A genetic algorithm for function optimisation: A Matlab implementation*, ACM Transactions on Mathematical Software, 1996