

PEMODELAN DAN SIMULASI *ROLL*, *PITCH* DAN *YAW* PADA *QUADROTOR*

Oka Danil Saputra^{*)}, Aris Triwiyatno dan Budi Setiyono

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

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

Abstrak

Penelitian ini fokus membahas tentang pengaruh input *Roll*, *Pitch* dan *Yaw* pada *Quadrotor*. Metode Euler-Newton digunakan untuk memodelkan persamaan dinamika *Quadrotor*. Pengujian pemodelan dilakukan dengan menggunakan program matlab *simulink*. Dari hasil perhitungan, diperoleh nilai parameter dinamika yaitu massa *Quadrotor* $m = 1,2$ [Kg], momen inersia pada sumbu x $I_{XX} = 8,3 \times 10^{-3}$ [N.m.s²], momen inersia pada sumbu y $I_{YY} = 8,8 \times 10^{-3}$ [N.m.s²], momen inersia pada sumbu z $I_{ZZ} = 15,5 \times 10^{-3}$ [N.m.s²], jarak pusat *Quadrotor* dengan pusat baling-baling $l = 230 \times 10^{-3}$ [m], momen inersia total sekitar sumbu motor $J_{TP} = 2,3 \times 10^{-5}$ [N.m.s²], konstanta elektrik motor $K_E = 5,8 \times 10^{-3}$ [V.s/rad] dan hambatan motor $R = 41,2 \times 10^{-3}$ [Ω]. Dari hasil simulasi, disimpulkan bahwa nilai output sudut ϕ (phi) ditentukan oleh nilai input *Roll*, nilai output sudut θ (theta) ditentukan oleh nilai input *Pitch* dan nilai output sudut ψ (psi) ditentukan oleh nilai input *Yaw*.

Kata kunci: Quadrotor, Roll, Pitch, Yaw

Abstract

This research work focused on the study of *Roll*, *Pitch* and *Yaw* (Input) a *Quadrotor*. The Euler-Newton formalism was used to model the dynamic system. The Matlab Simulink program was developed to test the result. From the calculation result, the value of dynamic parameter were consisting mass of the *Quadrotor* $m = 1,2$ [Kg], body moment of inertia around the x-axis $I_{XX} = 8,3 \times 10^{-3}$ [N.m.s²], body moment of inertia around the y-axis $I_{YY} = 8,8 \times 10^{-3}$ [N.m.s²], body moment of inertia around the z-axis $I_{ZZ} = 15,5 \times 10^{-3}$ [N.m.s²], length center of propeller from center of *Quadrotor* $l = 230 \times 10^{-3}$ [m], total rotational moment of inertia around the propeller axis $J_{TP} = 2,3 \times 10^{-5}$ [N.m.s²], electric motor constant $K_E = 5,8 \times 10^{-3}$ [V.s/rad] and motor resistance $R = 41,2 \times 10^{-3}$ [Ω]. From the simulation result, it can be concluded that the ϕ (phi) angle was determined the *Roll* input, the θ (theta) angle was determined the *Pitch* input and the ψ (psi) angle was determined the *Yaw* input.

Keywords: Quadrotor, Roll, Pitch, Yaw

1. Pendahuluan

Beberapa tahun terakhir, banyak penelitian yang berpusat pada subjek *Quadrotor* seperti yang dilakukan oleh mahasiswa di MIT[2] dan Universitas Kentucky[4]. Dalam penelitian tersebut dibahas mulai dari konsep dasar, simulasi dan implementasi kontrol pada disain *hardware*.

Dari beberapa penelitian lainnya, ada yang hanya membahas tentang pemodelan dan kontrol[1]. Kemudian terdapat juga penelitian yang khusus membahas tentang disain dan pengembangan *Quadrotor*[3], dalam penelitian tersebut disimpulkan bahwa dengan melakukan pemodelan dan simulasi sebelum melakukan perancangan *hardware Quadrotor* akan dapat menghemat waktu dan

biaya. Pada tesis[5] menarik kesimpulan bahwa pemodelan dinamika merupakan hal penting, tidak hanya penting untuk disain sistem tetapi penting juga untuk pemilihan pendekatan kontrol yang akan digunakan. Dari semua penelitian tentang *Quadrotor*, hanya tesis[6] yang membahas secara rinci tentang cara menentukan konstanta parameter yang terdapat pada *Quadrotor*.

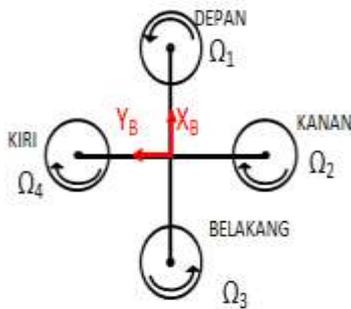
Dalam tugas akhir ini penulis akan membahas tentang pemodelan dan simulasi pengaruh sinyal input *Roll*, *Pitch* dan *Yaw* pada sebuah *Quadrotor*. Penulis mencari nilai-nilai parameter dinamika kemudian membentuknya kedalam model matematika. Untuk simulasi hasil dari pemodelan, penulis menggunakan program *simulink* matlab.

2. Metode

2.1. Konsep Dasar [7]

Quadrotor dapat dimodelkan sebagai empat buah rotor yang terhubung oleh lengan yang saling bersilangan. Setiap baling-baling terhubung dengan sebuah motor elektrik dan terpasang di setiap lengan.

Baling-baling depan dan belakang Quadrotor berputar dengan arah yang sama, sebaliknya baling-baling kanan dan kiri juga berputar dengan arah yang berkebalikan dari baling-baling depan dan belakang. Keuntungan dari dua pasang baling-baling yang berputar berlawanan arah adalah saling meniadakan efek momen inersia akibat putaran baling-baling. Konfigurasi dari baling-baling diperlihatkan dalam Gambar 2.1.



Gambar 1. Konfigurasi baling-baling Quadrotor

2.2. Pemodelan Quadrotor [6]

Persamaan (2.1)-(2.6) merupakan persamaan umum Quadrotor yang diturunkan dari metode Euler-Newton.

$$\ddot{X} = (\sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m} \quad (2.1)$$

$$\ddot{Y} = (-\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m} \quad (2.2)$$

$$\ddot{Z} = -g + (\cos \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m} \quad (2.3)$$

$$\dot{p} = \frac{I_{YY} - I_{ZZ}}{I_{XX}} q r - \frac{I_{TP}}{I_{XX}} q \Omega + \frac{U_2}{I_{XX}} \quad (2.4)$$

$$\dot{q} = \frac{I_{ZZ} - I_{XX}}{I_{YY}} p r + \frac{I_{TP}}{I_{YY}} p \Omega + \frac{U_3}{I_{YY}} \quad (2.5)$$

$$\dot{r} = \frac{I_{XX} - I_{YY}}{I_{ZZ}} p q + \frac{U_4}{I_{ZZ}} \quad (2.6)$$

Persamaan (2.7) 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.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = T_\theta^{-1} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Dengan T_θ^{-1} dan T_θ berdasarkan persamaan (2.8) dan (2.9).

$$T_\theta^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s_\theta \\ 0 & c_\theta & c_\theta s_\phi \\ 0 & -s_\phi & c_\theta c_\phi \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$T_\theta = \begin{bmatrix} 1 & -s_\phi t_\theta & c_\phi t_\theta \\ 0 & c_\phi & -s_\phi \\ 0 & \frac{s_\phi}{c_\theta} & \frac{c_\phi}{c_\theta} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Sedangkan input dari persamaan umum (2.1)-(2.6) ditentukan dari persamaan (2.10)-(2.14).

$$U_1 = b (\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (2.10)$$

$$U_2 = b l (\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \quad (2.11)$$

$$U_3 = b l (\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \quad (2.12)$$

$$U_4 = d (\Omega_2^2 + \Omega_4^2 - \Omega_1^2 - \Omega_3^2) \quad (2.13)$$

$$\Omega = -\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4 \quad (2.14)$$

2.3. Perhitungan Momen Inersia

Momen inersia adalah perilaku dinamis dari sebuah kerangka yang berputar pada sebuah sumbu. Persamaan (2.15) – (2.17) merupakan persamaan untuk menentukan momen inersia objek persegi panjang pejal dengan panjang L , lebar W , tinggi H , berat M , dan konstanta kepadatan $\rho = \frac{M}{LWH}$.

$$I_X = M \left(\frac{W^2}{12} + \frac{H^2}{12} \right) \quad (2.15)$$

$$I_Y = M \left(\frac{L^2}{12} + \frac{H^2}{12} \right) \quad (2.16)$$

$$I_Z = M \left(\frac{L^2}{12} + \frac{W^2}{12} \right) \quad (2.17)$$

Persamaan (2.18) – (2.20) merupakan persamaan untuk menentukan momen inersia objek silinder pejal dengan jari-jari R , tinggi H , berat M dan konstanta kepadatan $\rho = \frac{M}{\pi R^2 H}$.

$$I_X = M \left(\frac{R^2}{4} + \frac{H^2}{12} \right) \quad (2.18)$$

$$I_Y = M \left(\frac{R^2}{4} + \frac{H^2}{12} \right) \quad (2.19)$$

$$I_Z = M \left(\frac{R^2}{2} \right) \quad (2.20)$$

Persamaan (2.21) – (2.23) merupakan persamaan untuk menentukan momen inersia objek silinder pejal dengan jari-jari R , tinggi H , berat M dan konstanta kepadatan $\rho = \frac{M}{2\pi R H r}$.

$$I_X = M \left(\frac{R^2}{6} + \frac{H^2}{12} \right) \quad (2.21)$$

$$I_Y = M \left(\frac{R^2}{6} + \frac{H^2}{12} \right) \quad (2.22)$$

$$I_Z = M \left(\frac{R^2}{3} \right) \quad (2.23)$$

Jika pusat masa dari objek tidak sama dengan sumbu pusat (asumsinya titik silang pada *Quadrotor*), ada toerema (Toerema sumbu sejajar) yang membantu untuk menentukan momen inersia tanpa menghitung ulang integral. Dalam toerema tersebut dinyatakan jika objek sumbu pusat rotasi diganti oleh jarak D dari sumbu rotasi, maka pusat inersianya berganti sesuai persamaan (2.24).

$$I_{Pengganti} = I_{Pusat} + M D^2 \quad (2.24)$$

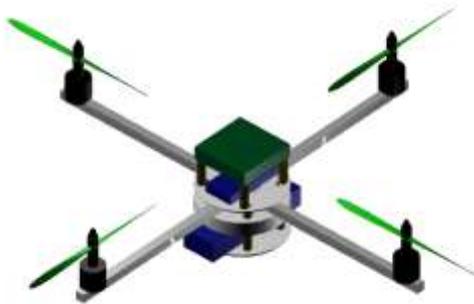
2.4. Motor DC

Persamaan yang digunakan untuk menentukan hubungan antara kecepatan putar baling-baling dengan tegangan input baterai adalah persamaan (2.25).

$$(J_M + J_{BB} + J_{PBB})\dot{\omega}_{BB} = \frac{K_E K_M}{R} \omega_{BB} - d \omega_{BB}^2 + \frac{K_M}{R} v + c \quad (2.25)$$

2.5. Disain *Quadrotor*

Dalam melakukan pemodelan *Quadrotor* dibutuhkan bentuk disain dari *Quadrotor* yang akan ditentukan nilai parameter dinamikanya. Gambar 2.2 merupakan gambar disain *quadrotor* yang akan dimodelkan.



Gambar 2 Disain *Quadrotor*

Dalam disain *Quadrotor* ada beberapa komponen yang digunakan yaitu:

1. Kerangka (warna abu-abu).
2. Motor DC *Brushless* (warna hitam).
3. Baling-baling (warna hijau muda).
4. Modul mikro dan sensor (warna hijau tua).
5. Baterai mikro (warna biru) terletak pada bagian atas kerangka.
6. Baterai motor (warna biru) terletak pada bagian bawah kerangka.
7. Driver motor (warna abu-abu) terletak pada bagian atas baterai motor.
8. Spicer (warna keemasan).

Keterangan simbol pada persamaan:

- \ddot{X} : Percepatan linier *Quadrotor* pada sumbu x acuan *E-frame* [$m s^{-2}$]
- \ddot{Y} : Percepatan linier *Quadrotor* pada sumbu y acuan *E-frame* [$m s^{-2}$]
- \ddot{Z} : Percepatan linier *Quadrotor* pada sumbu z acuan *E-frame* [$m s^{-2}$]
- \dot{p} : Percepatan sudut *Quadrotor* pada sumbu x acuan *B-frame* [$rad s^{-2}$]
- \dot{q} : Percepatan sudut *Quadrotor* pada sumbu y acuan *B-frame* [$rad s^{-2}$]
- \dot{r} : Percepatan sudut *Quadrotor* pada sumbu z acuan *B-frame* [$rad s^{-2}$]
- p : Kecepatan sudut *Quadrotor* pada sumbu x acuan *B-frame* [$rad s^{-1}$]
- q : Kecepatan sudut *Quadrotor* pada sumbu y acuan *B-frame* [$rad s^{-1}$]
- r : Kecepatan sudut *Quadrotor* pada sumbu z acuan *B-frame* [$rad s^{-1}$]
- m : Massa total *Quadrotor* [kg]
- U_1 : *thrust* (daya angkat) [N]
- U_2 : Torsi *Roll* [N m]
- U_3 : Torsi *Pitch* [N m]
- U_4 : Torsi *Yaw* [N m]
- I_{XX} : Momen inersia sumbu x [$N m s^2$]
- I_{YY} : Momen inersia sumbu y [$N m s^2$]
- I_{ZZ} : Momen inersia sumbu z [$N m s^2$]
- J_{TP} : Total rotasi momen inersia disekitar sumbu baling-baling [$N m s^2$]
- Ω : Vektor kecepatan semua baling-baling [$rad s^{-1}$]
- ϕ : Sudut pada sumbu x acuan *B-frame* [rad]
- θ : Sudut pada sumbu y acuan *B-frame* [rad]
- ψ : Sudut pada sumbu z acuan *B-frame* [rad]
- g : Percepatan gravitasi bumi [$m s^{-2}$]
- l : Jarak antara pusat *Quadrotor* dengan pusat baling-baling [m]
- b : Faktor *thrust* [$N s^2$]
- d : Faktor *drag* [$N m s^2$]
- K_E : Konstanta elektrik motor [$V s rad^{-1}$]
- K_M : Konstanta mekanik motor [$N m A^{-1}$]

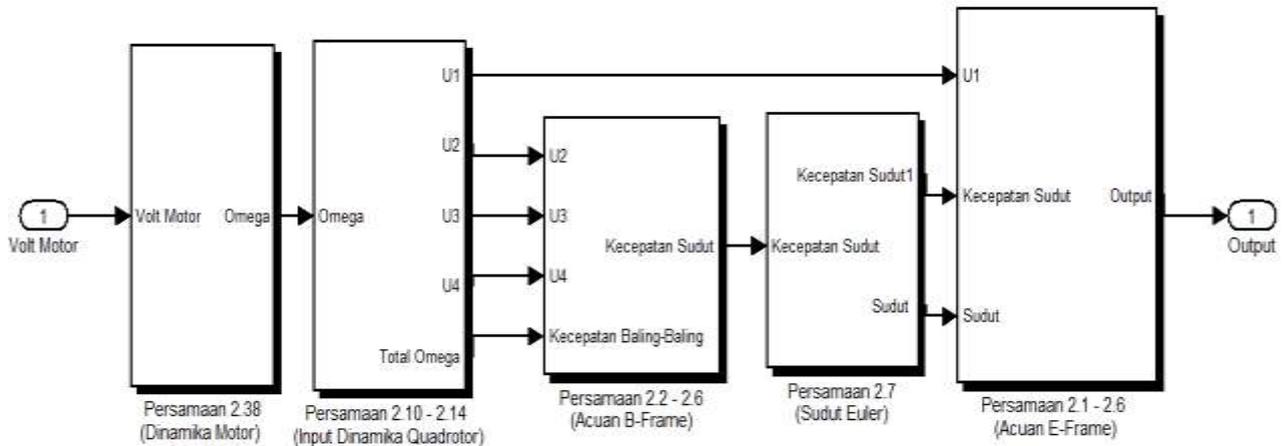
3. Hasil dan Analisa

3.1. Nilai Parameter *Quadrotor*

Tabel 3.1 Parameter model dinamika *Quadrotor*

Simbol	Nilai	Satuan
b	$54,2 \times 10^{-6}$	$N.s^2$
d	$1,1 \times 10^{-6}$	$N.m.s^2$
g	9,81	$m.s^{-2}$
I_{xx}	$8,3 \times 10^{-3}$	$N.m.s^2$
I_{yy}	$8,8 \times 10^{-3}$	$N.m.s^2$
I_{zz}	$15,5 \times 10^{-3}$	$N.m.s^2$
J_M	$5,39 \times 10^{-6}$	$N.m.s^2$
J_{TP}	$2,3 \times 10^{-5}$	$N.m.s^2$
K_E	$5,8 \times 10^{-3}$	$V.s/rad$
K_M	$5,8 \times 10^{-3}$	$N.m/A$
l	0,23	m
m	1,2	kg
R	$41,2 \times 10^{-3}$	ohm

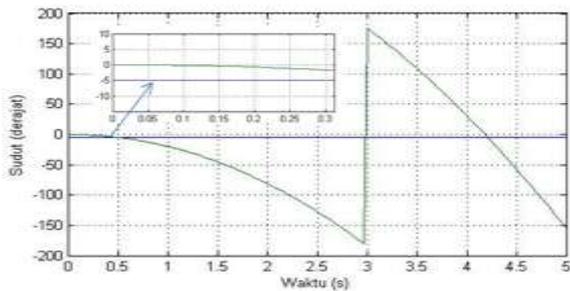
3.2. Perancangan Simulink Quadrotor



Gambar 3 Dinamika Quadrotor

3.3. Simulasi dan Analisa

3.3.1. Pengaruh Roll Terhadap Output Sudut ϕ Pada Sistem Open Loop.

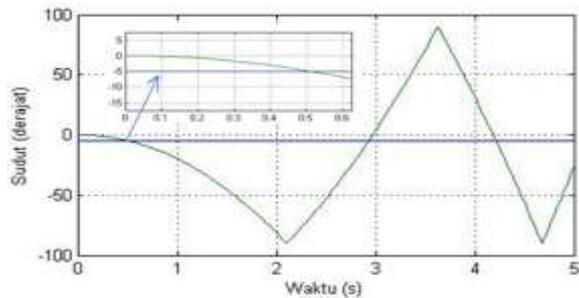


Gambar 4 Hasil simulasi input Roll -5° terhadap dinamika Quadrotor

Dari gambar 4 terlihat bahwa garis biru merupakan nilai input Roll dan kurva berwarna hijau adalah output sudut ϕ . Dengan melihat gambar 4 tampak bahwa ketika diberikan nilai input -5° maka respon output dari sistem adalah menghasilkan nilai output sudut ϕ yang semakin besar seiring dengan bertambahnya variabel waktu. Dalam simulasi ini, didapat nilai maksimum output sudut sama dengan -180° yang terjadi saat waktu di 2,9 detik.

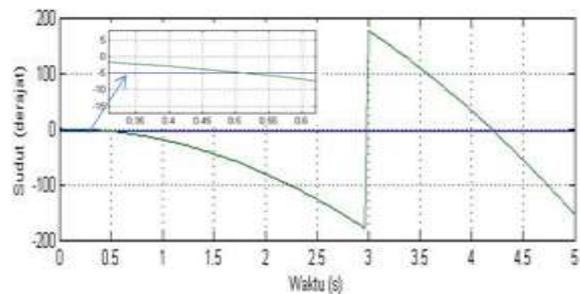
3.3.2. Pengaruh Pitch Terhadap Output Sudut θ Pada Sistem Open Loop.

Dari gambar 5 terlihat bahwa garis biru merupakan nilai input Pitch dan kurva berwarna hijau adalah output sudut θ . Dengan melihat gambar 5, tampak bahwa ketika diberikan nilai input -5° maka respon output dari sistem adalah menghasilkan nilai output sudut θ yang semakin besar seiring dengan bertambahnya nilai waktu. Dalam simulasi tersebut, didapat nilai sudut maksimum yang diperoleh adalah -90° yang terjadi saat waktu di 2,1 detik.



Gambar 5 Hasil simulasi input Pitch -5° terhadap dinamika Quadrotor

3.3.3. Pengaruh Yaw Terhadap Output Sudut ψ Pada Sistem Open Loop.

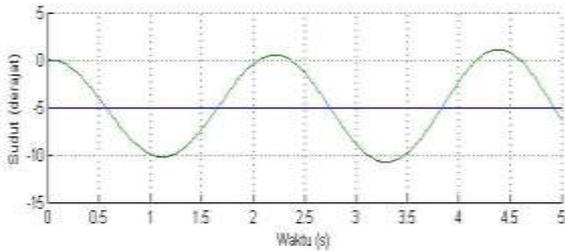


Gambar 6 Hasil simulasi input Yaw -5° terhadap dinamika Quadrotor

Dari gambar 6 terlihat bahwa garis biru merupakan nilai input Yaw dan kurva berwarna hijau adalah output sudut ψ . Dengan melihat gambar 6, tampak bahwa ketika diberikan nilai input -5° maka respon output dari sistem adalah menghasilkan nilai output sudut ψ yang semakin besar seiring dengan bertambahnya nilai waktu. Dalam simulasi tersebut, didapat nilai sudut maksimum yang

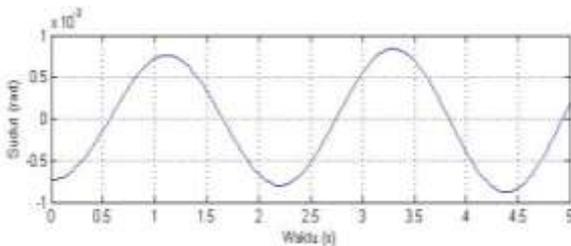
diperoleh adalah -180° yang terjadi saat waktu sama dengan 2,9 detik.

3.3.4. Pengaruh Roll Terhadap Output Sudut ϕ Pada Sistem Close Loop.



Gambar 7 Hasil simulasi input Roll -5° pada sistem close loop

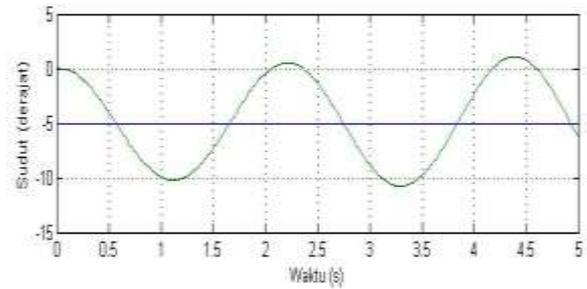
Dari gambar 7 terlihat bahwa garis biru merupakan nilai input Roll dan kurva berwarna hijau adalah output sudut ϕ . Dengan melakukan perbandingan antara respon sistem *open loop* dan *close loop* terlihat bahwa nilai output untuk sistem *close loop* lebih stabil dengan nilai osilasi pada rentang 10° . Penyebab dari nilai output sudut ϕ seperti kurva tersebut adalah blok *feedback* sudut. Blok ini hanya ada untuk sistem *close loop* yang berfungsi sebagai umpan balik dari sudut ϕ terhadap nilai input Roll.



Gambar 8 Hasil simulasi error antara Roll dan sudut ϕ

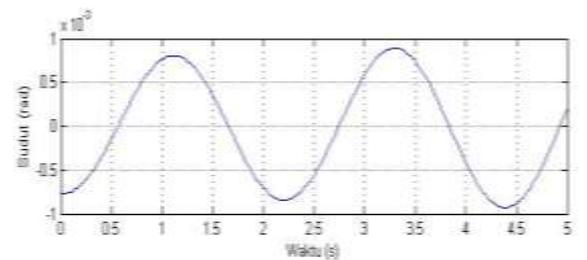
Gambar 8 merupakan hasil simulasi sinyal output dari blok *feedback* sudut. Tidak seperti halnya pada sistem *open loop* dimana sinyal input Roll tetap pada nilai tertentu, namun dalam sistem *close loop*, sinyal untuk input sistem mengalami osilasi sehingga output dari sudut ϕ juga beresilasi.

3.3.5. Pengaruh Pitch Terhadap Output Sudut θ Pada Sistem Close Loop.



Gambar 9 Hasil simulasi input Pitch -5° pada sistem close loop

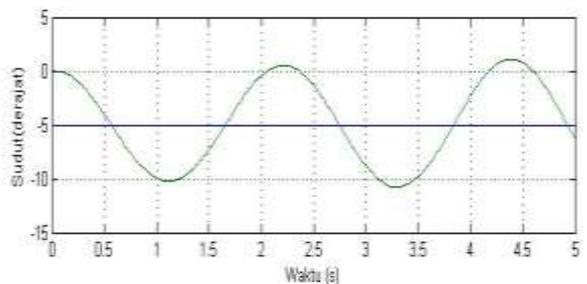
Dari gambar 9 terlihat bahwa garis biru merupakan nilai input Pitch dan kurva berwarna hijau adalah output sudut θ . Dengan melakukan perbandingan antara respon sistem *open loop* dan *close loop* terlihat bahwa nilai output untuk sistem *close loop* lebih stabil dengan nilai osilasi pada rentang 10° . Penyebab dari nilai output sudut θ seperti kurva tersebut adalah blok *feedback* sudut.



Gambar 10 Hasil simulasi error antara Pitch dan sudut θ

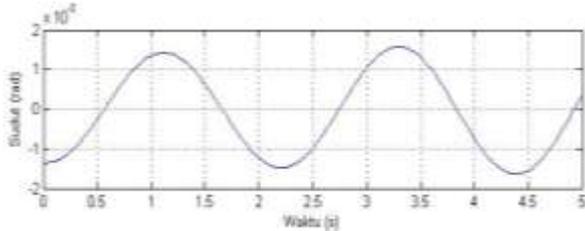
Gambar 10 merupakan hasil simulasi sinyal output dari blok *feedback* sudut. Tidak seperti halnya pada sistem *open loop* dimana sinyal input Pitch tetap pada nilai tertentu, namun dalam sistem *close loop*, sinyal untuk input sistem mengalami osilasi sehingga output dari sudut θ juga beresilasi.

3.3.6. Pengaruh Yaw Terhadap Output Sudut ψ Pada Sistem Close Loop.



Gambar 11 Hasil simulasi input Yaw -5° pada sistem close loop

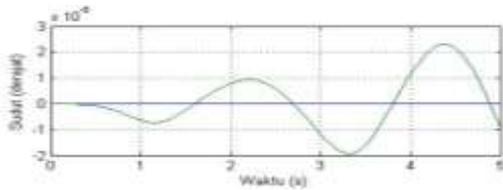
Dari gambar 11 terlihat bahwa garis biru merupakan nilai input *Yaw* dan kurva berwarna hijau adalah output sudut ψ . Dengan melakukan perbandingan antara respon sistem *open loop* dan *close loop* terlihat bahwa nilai output untuk sistem *close loop* lebih stabil dengan nilai osilasi pada rentang 10° . Penyebab dari nilai output sudut ψ seperti kurva tersebut adalah blok *feedback* sudut.



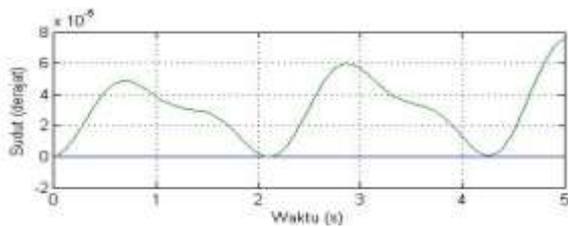
Gambar 12 Hasil simulasi eror antara *Yaw* dan sudut ψ

Gambar 12 merupakan hasil simulasi sinyal output dari blok *feedback* sudut. Tidak seperti halnya pada sistem *open loop* dimana sinyal input *Yaw* tetap pada nilai tertentu, namun dalam sistem *close loop*, sinyal untuk input sistem mengalami osilasi sehingga output dari sudut ψ juga berosilasi.

3.3.7. Pengaruh *Roll* terhadap Sudut θ dan Sudut ψ .



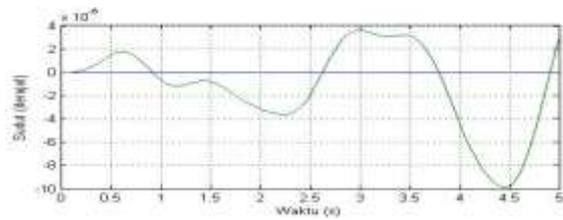
Gambar 13 Hasil simulasi nilai sudut θ ketika diberi input *Roll*



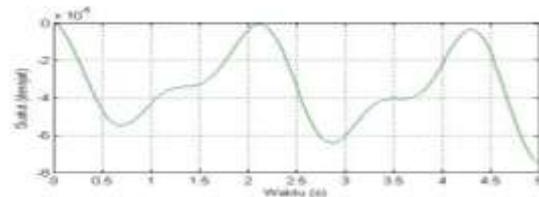
Gambar 14 Hasil simulasi nilai sudut ψ ketika diberi input *Roll*

Dari gambar 13 dan 14 didapat bahwa nilai sudut θ dan sudut ψ kurang dari 1° . Kedua nilai tersebut relatif sangat kecil sehingga perubahan pada sudut θ dan sudut ψ pada saat terjadi input *Roll* dapat diabaikan.

3.3.8. Pengaruh *Pitch* terhadap Sudut ϕ dan Sudut ψ .



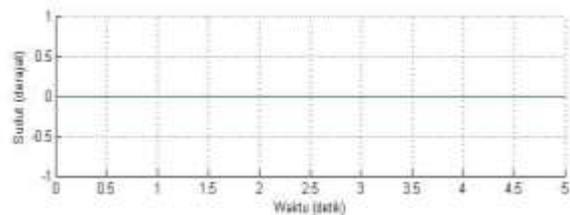
Gambar 15 Hasil simulasi nilai sudut ϕ ketika diberi input *Pitch*



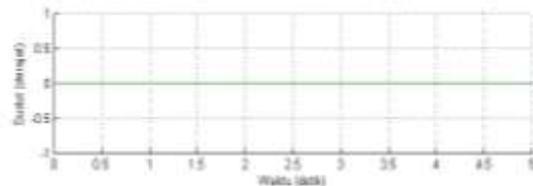
Gambar 16 Hasil simulasi nilai sudut ψ ketika diberi input *Pitch*

Dari gambar 15 dan 16 didapat bahwa nilai sudut ϕ dan sudut ψ kurang dari 1° . Kedua nilai tersebut relatif sangat kecil sehingga perubahan pada sudut ϕ dan sudut ψ pada saat terjadi input *Roll* dapat diabaikan.

3.3.9. Pengaruh *Yaw* terhadap Sudut ϕ dan Sudut θ .



Gambar 17 Hasil simulasi nilai sudut ϕ ketika diberi input *Yaw*

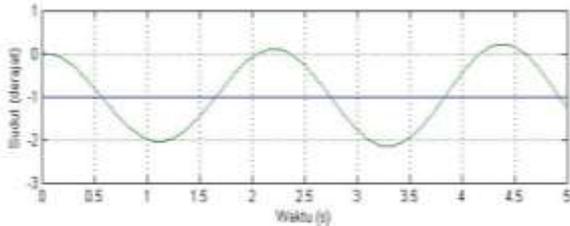


Gambar 18 Hasil simulasi nilai sudut θ ketika diberi input *Yaw*

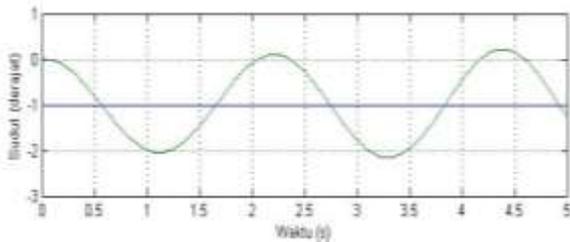
Dari gambar 17 dan 18 didapat bahwa nilai sudut ϕ dan sudut θ maksimum adalah 0° artinya pergerakan terhadap sumbu *z* tidak mempengaruhi nilai sudut ϕ dari

pergerakan terhadap sumbu x dan nilai sudut θ dari pergerakan terhadap sumbu y.

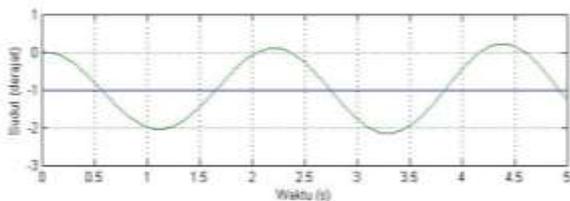
3.3.10. Pengaruh Nilai Input 1° Terhadap Nilai Output Sudut



Gambar 19 Hasil simulasi input *Roll* -1° terhadap output sudut ϕ



Gambar 20 Hasil simulasi input *Pitch* -1° terhadap output sudut θ

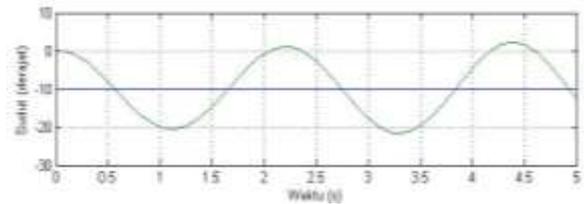


Gambar 21 Hasil simulasi input *Yaw* -1° terhadap output sudut ψ

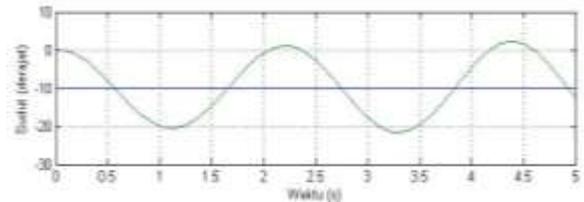
Persamaan antara hasil simulasi nilai input -5° (gambar 7, gambar 9 dan gambar 11) dan -1° (gambar 19 sampai gambar 21), pada saat diberikan sinyal input -5° respon output dari sistem beresilasi pada rentang 10° yang merupakan dua kali dari nilai input, demikian juga halnya dengan hasil simulasi -1° , dimana respon output sistem juga beresilasi pada rentang 2° yang juga merupakan kelipatan dari nilai input.

Perbedaan dari input -5° dan -1° adalah waktu, dimana saat input -5° waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai -1° adalah 0,25 detik sedangkan pada input -1° waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai -1° adalah 0,56 detik. Dari hasil simulasi tersebut terlihat bahwa nilai input -5° memiliki waktu yang lebih cepat untuk mencapai nilai -1° dikarenakan nilai input -5° lebih besar dari nilai input -1° .

3.3.11. Pengaruh Nilai Input 10° Terhadap Nilai Output Sudut

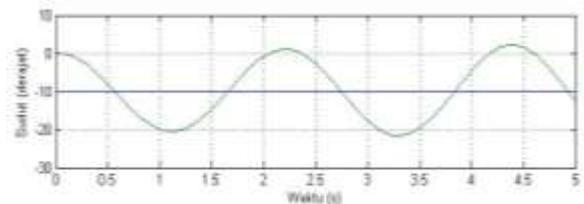


Gambar 22 Hasil simulasi input *Roll* -10° terhadap output sudut ϕ



Gambar 23 Hasil simulasi input *Pitch* -10° terhadap output sudut θ

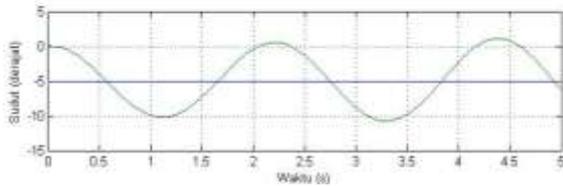
Persamaan antara hasil simulasi nilai input -5° (gambar 7, gambar 9 dan gambar 11) dan -10° (gambar 22 sampai gambar 24) terletak pada output sistem, dimana pada saat diberikan sinyal input -5° respon output dari sistem beresilasi pada rentang 10° yang merupakan dua kali dari nilai input, demikian juga halnya dengan hasil simulasi -10° dimana respon output sistem juga beresilasi pada rentang 20° yang juga merupakan kelipatan dari nilai input.



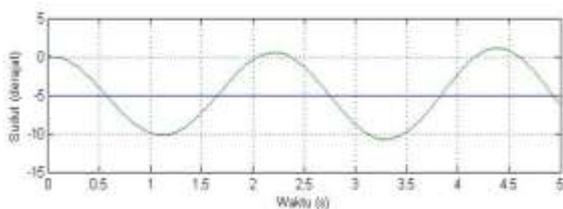
Gambar 24 Hasil simulasi input *Yaw* -10° terhadap output sudut ψ

Perbedaan dari input -5° dan -10° adalah waktu, dimana saat input -5° waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai -5° adalah 0,56 detik sedangkan pada input -10° waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai -5° adalah 0,38 detik. Dari hasil simulasi tersebut terlihat bahwa nilai input -5° memiliki waktu yang lebih lama untuk mencapai nilai referensi -5° dibandingkan ketika nilai inputnya -10° .

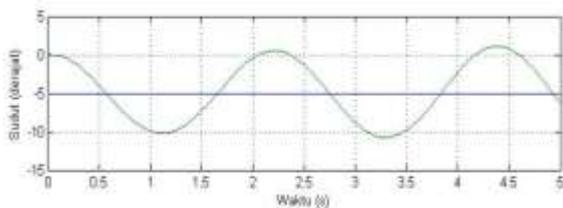
3.3.12. Pengaruh Perubahan Nilai Momen Inersia Terhadap Output Sistem Close Loop.



Gambar 25 Hasil simulasi penambahan momen inersia 5% terhadap output sudut ϕ

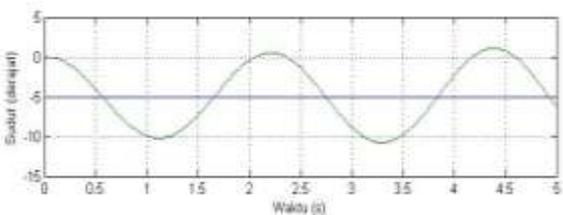


Gambar 26 Hasil simulasi penambahan momen inersia 5% terhadap output sudut θ

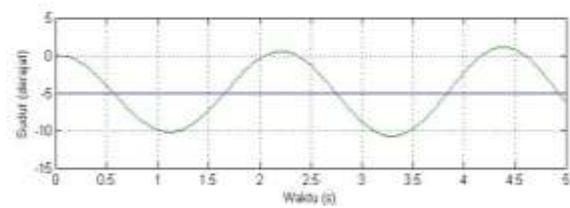


Gambar 27 Hasil simulasi penambahan momen inersia 5% terhadap output sudut ψ

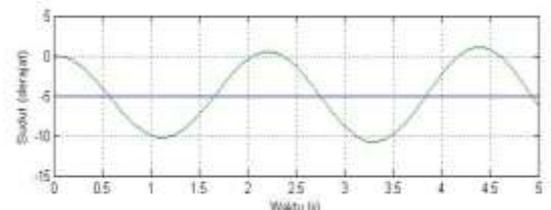
Dari hasil simulasi (gambar 25 sampai gambar 27), terlihat bahwa ketika penambahan momen inersia sebesar 5% tidak terlalu mempengaruhi nilai output sudut. Hal ini dikarenakan nilai output sudutnya sama dengan nilai output sudut saat simulasi menggunakan momen inersia sebenarnya.



Gambar 28 Hasil simulasi pengurangan momen inersia 5% terhadap output sudut ϕ



Gambar 29 Hasil simulasi pengurangan momen inersia 5% terhadap output sudut θ



Gambar 30 Hasil simulasi pengurangan momen inersia 5% terhadap output sudut ψ

Dari hasil simulasi (gambar 28 sampai gambar 30), terlihat bahwa ketika pengurangan momen inersia sebesar 5% juga tidak terlalu mempengaruhi nilai output sudut. Hal ini dikarenakan nilai output sudutnya sama dengan nilai output sudut saat simulasi menggunakan momen inersia sebenarnya.

4. Kesimpulan

Dari hasil simulasi, disimpulkan bahwa nilai output sudut ϕ (phi) ditentukan oleh nilai input *Roll*, nilai output sudut θ (theta) ditentukan oleh nilai input *Pitch* dan nilai output sudut ψ (psi) ditentukan oleh nilai input *Yaw*. Pada pengujian perubahan besar nilai input, besar nilai output sudut langsung berubah sesuai besar nilai input. Pada pengujian perubahan momen inersia Quadrotor tidak terlihat pengaruh yang signifikan terhadap nilai output sudut.

Saran untuk tahap pengembangan dimasa mendatang, hasil dari pemodelan ini dapat divalidasi dengan *Quadrotor* sebenarnya. Perlu ditambahkannya sistem kontrol agar respon outputsudut dapat sesuai dengan nilai input.

Referensi

- [1] Balas, C., *Modelling and Linear Control of A Quadrotor*, Master Thesis, Cranfield University, 2007.
- [2] Goel, Rahul., Shah, Sapan., Gupta, Nitin., and Ananthkrishnan, N., *Modeling, Simulation and Flight Testing of an Autonomous Quadrotor*, Proceeding of ICEAE, 2009.
- [3] Gupta, Nitin., Goel, Rahul., and Ananthkrishnan, N., *Role of Modeling and Simulation in Design and Development of Mini/Micro Air Vehicles: Case of an Autonomous Quadrotor*, 2009.

- [4] D. Schmidt, Michael,. *Simulation and Control of a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle*, Master Thesis, University of Kentucky, 2011
- [5] Bouabdallah, Samir,.*Design and Control of Quadrotors with Application to Autonomous Flying*, Master Thesis, Ecole Polytechnique Federal Lausanne, 2007.
- [6] Bresciani, T., *Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter*, Master Thesis, Lund University, 2008.
- [7] D. Budi, Suyanto,. *Disain Kontrol Kestabilan Quadrotor Unmanned Aerial Vehicles Pada Kondisi Hover*, Tugas Akhir, Universitas Diponegoro, 2011
- [8] Arhami, Muhammad,. Desiani, Anita,. *Pemrograman Matlab*, Penerbit Andi, Yogyakarta, 2005.
- [9] ----, *Data Sheet Baling-baling*, <http://www.hobbyking.com>, Juli 2012.
- [10] ----, *Data Sheet Baterai*, <http://www.hobbyking.com>, Juli 2012.
- [11] ----, *Data Sheet ESC*, <http://www.hobbyking.com>, Juli 2012.
- [12] ----, *Data Sheet Motor DC*, <http://www.hobbyking.com>, Juli 2012.