

SISTEM KENDALI DUAL MOTOR PROPELLER PADA ALAT SELF BALANCING MENGGUNAKAN KONTROLER PID DENGAN TUNING CHR

Prayuda Ari Guntoro

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
e-mail : prayudaguntoro16050874007@mhs.unesa.ac.id

Muhamad Syariffuddien Zuhrie, Bambang Suprianto, I Gusti Putu Asto Buditjahjanto,

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas negeri Surabaya
e-mail : zuhrie@unesa.ac.id, bambangsuprianto@unesa.ac.id, asto@unesa.ac.id

Abstrak

Pesawat Tanpa Awak atau yang dikenal dengan *UAV (Unmanned Aerial Vehicle)* adalah wahana terbang yang tidak memiliki awak pesawat dimana dalam satu dekade terakhir banyak dikembangkan baik oleh para peneliti, mahasiswa maupun oleh perusahaan – perusahaan teknologi. *Multirotor* termasuk kedalam salah satu jenis wahana yang memiliki kemampuan lepas landas secara vertikal serta mampu mempertahankan posisinya pada saat terbang. Dalam menerbangkan *Multirotor* terkadang dibutuhkan ketinggian yang stabil untuk menjalankan misi tertentu. Permasalahan pada *Multirotor* adalah keseimbangan terbang pada saat beban pada *Multirotor* tidak seimbang. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang *Multirotor* dengan skala yang lebih kecil digunakan untuk menghasilkan sistem yang stabil dengan menggunakan kontroler PID dengan metode CHR sehingga diharapkan metode ini nantinya dapat diaplikasikan pada wahana *Multirotor* yang lebih besar. Hasil dari simulasi implementasi menggunakan kontroler *Proportional Integral Derivative (PID)* pada sistem pengendali *self balancing* pada *Dual Motor Propeller* didapatkan nilai terbaik $K_p = 9.01$ $K_i = 0.52$ dan $K_d = 0.13$ dapat memperbaiki respon sistem dengan $Ess = 0.99\%$ Maksimal $overshoot = 3.13\%$ $t_d = 2,45 s$, $t_r = 3.95 s$, $t_s(5\%) = 0.75 s$.

Kata Kunci: UAV, *Multirotor*, Stabilitas Sudut, Kontroler PID.

Abstract

Unmanned Aircraft or known as UAV (Unmanned Aerial Vehicle) is a vehicle that does not have a crew, which in the last decade has been developed by researchers, students and technology companies. Multirotor included in one type of vehicle that has the ability to take off vertically and be able to maintain its position when flying. In flying a Multirotor sometimes it takes a stable height to carry out certain missions. The problem with Multirotor is the balance of flight when the load on the Multirotor is not balanced. The purpose of this research is to design a smaller scale Multirotor used to produce a stable system using a PID controller with the CHR method so that this method is expected to be applied later on a larger Multirotor vehicle. The results of the implementation simulation using the Proportional Integral Derivative (PID) controller on the self balancing control system on the Dual Motor Propeller obtained the best value $K_p = 9.01$ $K_i = 0.52$ and $K_d = 0.13$ can improve the system response with $Ess = 0.99\%$ Maximum overshoot = 3.13% $t_d = 2.45 s$, $t_r = 3.95 s$, $t_s(5\%) = 0.75 s$.

Keywords: UAV, *Multirotor*, Degree Stability, PID Controller.

PENDAHULUAN

Pesawat Tanpa Awak atau yang dikenal dengan *UAV* adalah wahana terbang yang tidak memiliki awak pesawat dimana dalam satu dekade terakhir banyak dikembangkan baik oleh para peneliti, mahasiswa maupun oleh perusahaan – perusahaan teknologi. Kendaraan udara tak berawak (*UAV*) tersebar luas baik dalam aplikasi militer maupun sipil. Beberapa *UAV* yang terkenal karena sistem kontrol penerbangan otomatisnya yang kuat memastikan tingkat keselamatan penerbangan yang sebanding dengan pesawat berawak. Mengenai peraturan nasional, ada aturan umum yang tidak perlu menerapkan autopilot pada sistem namun untuk mengimplementasikan autopilot yang

terpasang dapat mendukung operator *UAV* dalam melaksanakan misi penerbangan, mengatur parameter penerbangan yang sesuai, memastikan otomatisasi pengembalian yang aman ke rumah dan jika memerlukan pendaratan darurat otomatis juga dapat dilakukan secara otomatis (Agrawal dkk., 2013: 1).

Multirotor merupakan salah satu jenis wahana tanpa awak yang memiliki kemampuan lepas landas secara vertikal serta mampu mempertahankan posisinya pada saat terbang. Dalam menerbangkan *multirotor* terkadang dibutuhkan ketinggian yang stabil untuk menjalankan misi tertentu. Dengan ketinggian yang stabil akan memudahkan pilot dalam mengendalikan pesawat untuk bergerak ke suatu arah, yang menjadi permasalahan dalam *multirotor*

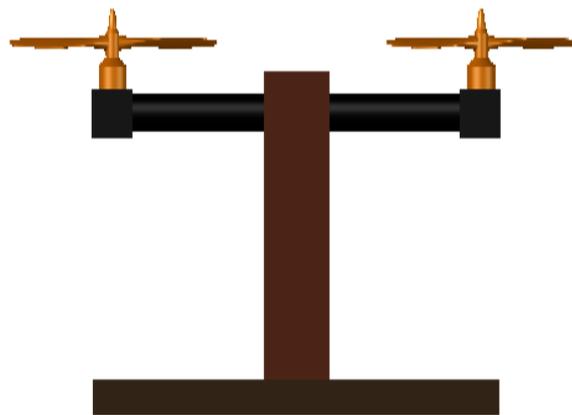
yaitu dalam keseimbangan terbang pada saat beban *multirotor* tidak seimbang (Hudha, 2019:1).

Kontrol pesawat UAV ada dua variasi utama, variasi pertama yaitu dikontrol melalui perangkat dengan kemampuan kendali jarak jauh seperti *remote* atau juga dapat terbang secara mandiri berdasarkan program yang sudah ditanamkan sebelumnya, dengan menggunakan sensor dan flight control yang diperlukan maka wahana dapat bergerak sesuai dengan rencana berdasarkan kondisi – kondisi yang ada dilingkungan sekitar. *Twinrotor* yaitu sebuah alat dimana sistem tersebut dirancang memiliki dua buah motor *brushless* dengan *propeller* sebagai penggerakannya (Wicaksono, 2013:3). *Propeller* tersebut dirancang pada ujung-ujung tuas kanan dan kiri dari badan dan baling-baling UAV menggunakan Sistem *Vertical Take Off* sehingga tidak perlu menggunakan landasan yang panjang untuk dapat lepas landas dikarenakan *propeller* dapat digerakkan secara vertical sehingga menciptakan gaya dorong kebawah yang membuat sistem dapat melakukan posisi *hovering* (Firman, 2016: 1).

Permasalahan pada *Multirotor* adalah keseimbangan terbang pada saat beban pada *multirotor* tidak berada pada posisi seimbang sehingga dapat berpengaruh pada kestabilan *multirotor* yang dapat menyebabkan *crash multirotor* saat berada di udara. Berdasarkan pada alasan tersebut maka dirancang sebuah penelitian terkait dengan rancang bangun pada sistem pengendalian *self balancing* pada *dual motor propeller* menggunakan kontroler PID dengan *tuning CHR*. Pada penelitian ini diharapkan dapat memperbaiki respon dari hasil penelitian sebelumnya yang pernah dilakukan (Futuhul dkk., 2014: 3).

PEMODELAN SISTEM

Twinrotor adalah salah satu jenis kopter yang bergerak menggunakan dua motor *brushless* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. *Propeller* didesain sehingga berputar berlawanan arah antara satu dengan yang lainnya (*Clock Wise (CW)* dan *Counter Clock Wise (CCW)*) (Prayogo, 2012: 3). Karena kecepatan rotor sangat cepat sehingga apabila kedua motor bekerja maka pergerakan akan sangat sulit stabil. Kestabilan dipengaruhi oleh kecepatan putar motor (*Rotary Per Minute*) sehingga akan berakibat pada perubahan sudut yang sangat dinamis. Diperlukan sebuah pengontrolan yang dapat membuat kopter dapat bergerak dengan stabil. Dengan adanya kontrol yang ditanamkan pada sistem akan membuat sistem dapat bergerak dengan aman. Perubahan gerak vertikal yang tidak terlalu besar dari nilai yang ditentukan sehingga respon menjadi lebih halus dan tidak berbahaya baik untuk lingkungan sekitar maupun kopter itu sendiri (H. Lim dan S. N. Sinha, 2015: 1).



Gambar 1. Desain Sistem Mekanik

MODEL PLANT

Dalam memodelkan sistem ini metode yang dipakai adalah metode Newton. Dengan menggunakan prinsip kerja tuas maka kita akan dapat menuliskan persamaan gaya dan torsi. Massa total dari balok terletak pada masing-masing ujung sisi balok. M_1 dan M_2 adalah total dari motor massa dan massa balok terkonsentrasi pada ujung sisi-sisi balok. Notasi B , j dan L adalah koefisien redaman, momen inersia dan setengah panjang balok. Dari model tersebut pada gambar 2 dapat kita tuliskan persamaan 1 sebagai berikut:

$$j\ddot{\theta} = \sum T = F_1L - F_2L - M_1Lg\cos\theta + M_2Lg\cos\theta - B\dot{\theta} \quad (1)$$

Keterangan:

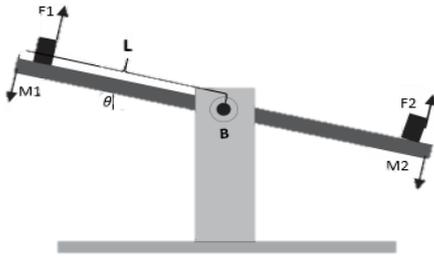
- j = Momen inersia turunan kecepatan (Kg/m^2)
- F_1 = Gaya angkat (thrust) pada motor 1 (kg)
- F_2 = Gaya angkat (thrust) pada motor 2 (kg)
- L = Jarak titik pusat lengan ke ujung lengan (Cm)
- θ = sudut kemiringan lengan (rad)
- $\dot{\theta}$ = perubahan sudut dari kemiringan (rad/s)
- g = gaya gravitasi bumi (m/s^2)
- B = koefisien redaman (g/mL)
- M_1 = massa ujung kiri (kg)
- M_2 = massa ujung kanan (kg)
- T = gaya dorong yang disediakan oleh motor brushless DC (Nm/kg)

Persamaan linier dari sistem menggunakan 2 variabel keadaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} x_1 &= \theta \\ x_2 &= \dot{\theta} \end{aligned} \quad (2)$$

Keterangan:

- θ = sudut terbentuk dari kemiringan lengan (rad)
- $\dot{\theta}$ = perubahan sudut dari kemiringan (rad/s)



Gambar 2. Skema Gaya pada Sistem
(Sumber: Agrawal dkk., 2013)

Pada Gambar 2 adalah Skema Gaya pada sistem, berdasarkan dengan prinsip tuas kemudian didapat persamaan sistem nonliniernya yaitu:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= x_2 = f_1(t) \\ \dot{x}_2 &= \ddot{\theta} = \frac{1}{j}(F_1L - F_2L - m_1Lg\cos\theta + m_2Lg\cos\theta - B\dot{\theta}) = f_2(t) \end{aligned} \quad (3)$$

Persamaan 3 kemudian dilinierkan dengan bantuan menggunakan metode jacobian seperti pada persamaan 4:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} = J_x(0) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{Lg\sin(\theta)(m_1-m_2)}{j} & \frac{-B}{j} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial F} \\ \frac{\partial f_2}{\partial F} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{L}{j} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Pada persamaan 6 Berikut ini adalah cara mencari nilai pada persamaan 5 pada matrik baris 1 kolom 1 yaitu $\frac{\partial \omega}{\partial \theta}$, karena tidak ada nilai yang sama maka hasilnya 0.

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_1} = \frac{\partial \omega}{\partial \theta} = 0 \quad (6)$$

Kemudian $\frac{\partial f_2}{\partial \theta}$ diturunkan terhadap θ , sehingga hasilnya menjadi seperti pada persamaan 7.

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_2}{\partial x_1} &= \frac{\partial \left(\frac{1}{j}(F_1L - F_2L - m_1Lg\cos\theta + m_2Lg\cos\theta - B\dot{\theta}) \right)}{\partial \theta} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} &= \frac{Lg\sin(\theta)(m_1-m_2)}{j} \end{aligned} \quad (7)$$

Nilai dari $\frac{\partial f_1}{\partial x_2}$ diturunkan terhadap $\dot{\theta}$ karena memiliki nilai sama maka hasilnya terlihat seperti pada persamaan 8.

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_2} = \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial \dot{\theta}} = 1 \quad (8)$$

Seperti langkah sebelumnya nilai dari $\frac{\partial f_2}{\partial \dot{\theta}}$ diturunkan terhadap $\dot{\theta}$ maka hasilnya seperti pada persamaan 9.

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_2}{\partial \dot{\theta}} &= \frac{\partial \left(\frac{1}{j}(F_1L - F_2L - m_1Lg\cos\theta + m_2Lg\cos\theta - B\dot{\theta}) \right)}{\partial \dot{\theta}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \dot{\theta}} &= \frac{-B}{j} \end{aligned} \quad (9)$$

Kemudian pada matriks berikutnya dilakukan langkah yang sama seperti sebelumnya maka didapatkan hasil sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial F} &= \frac{\partial \omega}{\partial F} = 0 \\ \frac{\partial f_2}{\partial F} &= \frac{\partial \left(\frac{1}{j}(F_1L - F_2L - m_1Lg\cos\theta + m_2Lg\cos\theta - B\dot{\theta}) \right)}{\partial F} \\ \frac{\partial f_2}{\partial F} &= \frac{L}{j} \end{aligned} \quad (10)$$

Keterangan:

- $\frac{\partial f_1}{\partial F}$ = Deferensial gaya dorong motor 1
- $\frac{\partial f_2}{\partial F}$ = Deferensial gaya dorong motor 2
- $\frac{\partial x_1}{\partial \theta}$ = Deferensial posisi sudut 1
- $\frac{\partial x_2}{\partial \dot{\theta}}$ = Deferensial posisi sudut 2

Dan sekarang persamaan linear *state space* menjadi:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ \dot{x} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{Lg\sin(\theta)(m_1-m_2)}{j} & \frac{-B}{j} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{L}{j} \end{bmatrix} F \\ y &= Cx + Du \\ y &= [1 \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

Fungsi transfer sistem dari $G(s)$ adalah:

$$\begin{aligned} G(s) &= [1 \ 0] \left[\begin{array}{c|c} s & -1 \\ \hline \frac{Lg\sin(\theta)(m_1-m_2)}{j} & s + \frac{B}{j} \end{array} \right]^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{L}{j} \end{bmatrix} \\ G(s) &= \frac{L}{Js^2 + Bs} = \frac{\frac{L}{j}}{s^2 + \frac{Bs}{j}} \end{aligned} \quad (12)$$

Dan dengan mendapatkan konstanta B, j, L kita akan memiliki:

$$\begin{aligned} L &= 31,5 \text{ cm} = 0,315 \text{ m} \\ B &= 1 \\ J &= 0,33 \text{ Kg/m}^2 \end{aligned}$$

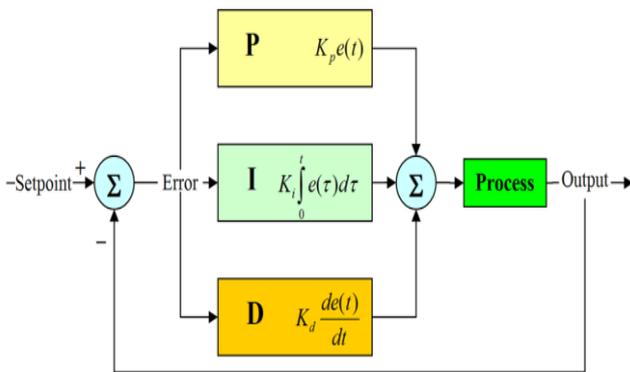
Berdasarkan fungsi transfer sistem yang didapat maka didapatkan hasil model matematika pada sistem adalah sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{\frac{L}{j}}{s^2 + \frac{Bs}{j}} = \frac{\frac{3.15}{0.33}}{s^2 + \frac{1}{0.33}s} = \frac{9.5}{s^2 + 3.0303s}$$

KONTROLLER PID

Metode Kontrol adalah suatu cara yang digunakan oleh kontroler dalam memperbaiki sinyal *error* dan menghasilkan output sebagai tanggapan atas kesalahan error yang dideteksinya. PID banyak sekali diadopsi pada pengontrolan proses dalam industri yang sangat mementingkan kestabilan pada sistem karena memiliki struktur yang sangat sederhana serta dapat dilakukan dengan mudah dalam melakukan *tuning* untuk menentukan parameter kontrolnya. Kontrol PID terdiri dari tiga macam kontroler, yaitu pengontrol Proporsional (*P*), pengontrol Integral (*I*) dan pengontrolan Derivatif (*D*). Diagram Blok Sistem PID seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

Jika model matematis plant dapat diturunkan, maka dimungkinkan untuk menerapkan berbagai teknik perancangan untuk menentukan parameter pengontrol yang akan memenuhi spesifikasi *transien* dan *steady state* dari sistem lup tertutup. Namun jika plant sangat rumit sehingga model matematisnya tidak mudah didapat, maka pendekatan analitis atau komputasi terhadap perancangan pengendali PID tidak memungkinkan. Kemudian harus menggunakan pendekatan eksperimental untuk penyetelan pengendali PID (Patel, 2015:1)



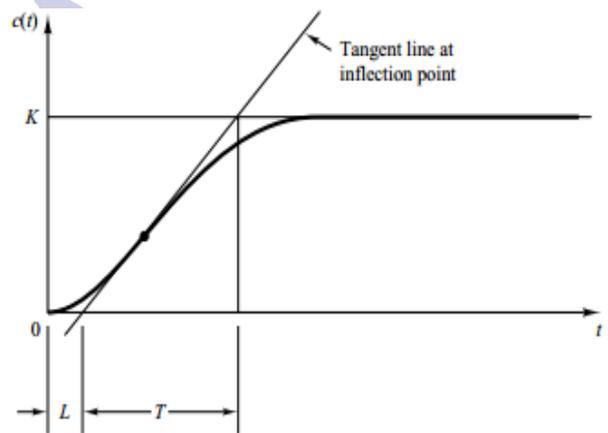
Gambar 3. Diagram blok kontrol PID pada plant
(Sumber: Wisnu dkk., 2016)

TUNING CHR

Tuning PID dengan menggunakan Metode Chien Hrones Reswick (CHR) adalah suatu pengembangan metode *tuning* dari metode Ziegler Nichols, metode yang diciptakan pada tahun 1952 yang mana menghasilkan kompensator yang lebih baik untuk aplikasi proses kontrol. Metode ini adalah

salah satu metode yang menggunakan Metode Lup Terbuka dari *tuning* Ziegler Nichols dimana step response dipakai untuk menentukan nilai dari variabel K, L, T dan a (Hidayat dan Mardiyanto, 2016: 1). Pada *Tuning* Chien-Hrones-Reswick (CHR) terdapat dua regulasi yaitu *set point* tracking yaitu dengan mengubah *set point* pada sistem atau penolakan terhadap gangguan (*disturbance rejection*) berikut ini adalah formula yang digunakan menggunakan aturan *tuning* CHR seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Aturan perpotongan garis lurus terjadi pada kondisi linier dari kurva S repon sistem. Pengambilan perpotongan harus tepat karena ini sangat penting karena menentukan parameter T dan L yang menjadi acuan dari kontroler seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva S Analisa Grafis nilai L dan T
(Sumber: Ogata, 1995)

Tabel 1. Formula Kontroler PID CHR
(Sumber: Sheel dan Gupta, 2012)

Controller Type	With 0% Overshoot			With 20% Overshoot		
	Kp	Ti	Td	Kp	Ti	Td
P	0.3/a	-	-	0.7/a	-	-
PI	0.6/a	4*t	-	0.7/a	2.3*t	-
PID	0.95/a	2.4*t	0.42*L	1.2/a	2*t	0.42*L

Keterangan:

- Kp* = Konstanta Proporsional
- Ti* = Integral Time
- Td* = Derivatif Time

PENDEKATAN PENELITIAN

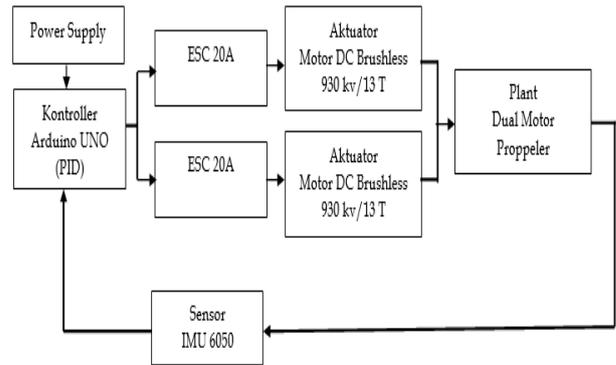
Penelitian ini menggunakan jenis pendekatan penelitian kuantitatif. Penelitian Kuantitatif adalah suatu cara untuk menemukan sebuah pengetahuan melalui pengambilan data sehingga dapat disajikan kedalam bentuk diagram tabel grafik yang memuat informasi. Pada penelitian ini menggunakan software LabVIEW 2014 untuk mencari fungsi alih dari sistem sehingga dapat mempermudah pengguna untuk merancang kontroler PID dengan metode *tuning* CHR serta dapat menunjukkan respon dari sistem hardware *plant* yang sedang melakukan kontrol keseimbangan ketika pada salah satu sisi lengan diberikan beban. Sedangkan software Arduino IDE adalah salah satu perangkat lunak yang digunakan untuk memprogram mikrokontroler dari hardware. Software Arduino IDE sudah banyak dikembangkan untuk mempermudah pengguna dalam melakukan *programming* arduino.

RANCANG BANGUN HARDWARE

1. Desain Sistem

Nilai masukan ke sistem berupa nilai posisi sudut (derajat) kemiringan. Program kontroler PID ditanamkan pada arduino yang nantinya akan berfungsi sebagai pengontrol pergerakan dari *selfbalancing*. Nilai keluaran dari hasil pengontrolan akan dikirimkan ke *Electrical Speed Controller* (ESC) dengan kapasitas 20A. ESC akan berfungsi sebagai converter antara tegangan keluaran dari Arduino ke tegangan yang dibutuhkan oleh *Motor Brushless DC* yang akan berpengaruh pada kecepatan putaran motor. Sensor MPU5060 yang didalamnya terdapat sensor *accelerometer* dan sensor *gyroscope* kemudian akan mengukur nilai kemiringan sudut plant karena adanya perbedaan kecepatan putaran motor. Nilai dari hasil pembacaan sensor akan digunakan sebagai *feedback* dari sistem (Mostafa dkk., 2015: 5).

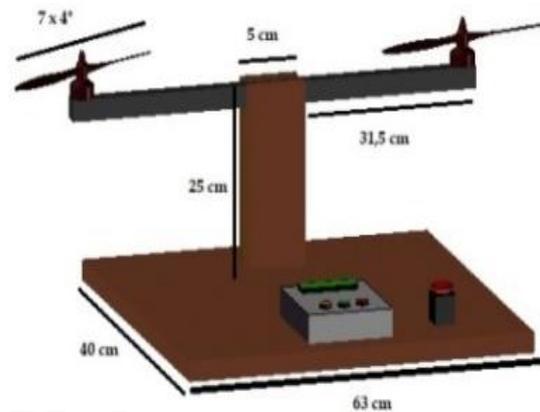
Balancing pada *Dual Motor Proppeler* yang terdiri dari Modul MPU6050 sebagai sensor yang berguna memberikan data posisi sudut yang harus dipertahankan oleh sistem, Arduino Mega 2560 sebagai *microcontroller* yang berfungsi sebagai pengolah, pengendali dengan tujuan membaca nilai masukan dan mengatur nilai keluaran pada sinyal PWM, 2 (dua) buah ESC (*Electrical Speed Control*) dengan kapasistas 20A digunakan untuk mengkonversi nilai PWM dan *Motor DC Brushless* sebanyak 2 (dua) buah yang dipasang dengan *Proppeler* untuk menghasilkan gaya dorong sehingga menghasilkan perubahan sudut (Hari, 2019:5). Diagram Blok Sistem *Dual Motor Propeller* Ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Desain Sistem Hardware

2. Rancangan *Plant* Dual Motor Propeller

Sistem ini menggunakan dudukan yang terbuat dari papan dan menggunakan aluminium persegi ukuran 3x4 sebagai tuasnya seperti ditunjukkan pada gambar 6. Kemudian dimensi dengan ukuran Panjang = 40 cm, lebar = 63 cm dan tinggi = 25 cm. Gambar 6 menunjukkan desain rancangan dari *Self Balancing Dual Motor Proppeler*:

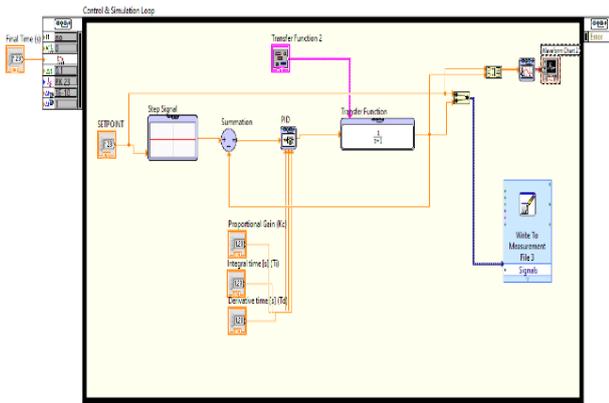


Gambar 6. Perancangan Mekanik Sistem

RANCANG BANGUN SOFTWARE

Software yang digunakan adalah Labview 2014. Fungsi alih dari sistem yang telah ditemukan model matematisnya dimasukkan kedalam *transfer fuction* kemudian diberikan kontroler PID sehingga sistem dapat bekerja sesuai dengan keadaan yang dibutuhkan dan hasil dari perhitungan akan ditampilkan pada *Graphical User Interface* (GUI) dan *Log Data* yang sudah tersedia didalam fitur Software Labview 2014 dan disimpan kedalam Microsoft Excel sehingga penulis dapat dilihat dengan detail setiap perubahan data yang terjadi. Hal ini sangat penting karena keakuratan data yang digunakan akan sangat berpengaruh pada hasil perhitungan pengontrolan kontroler yang akan dirancang pada pengontrolan PID.

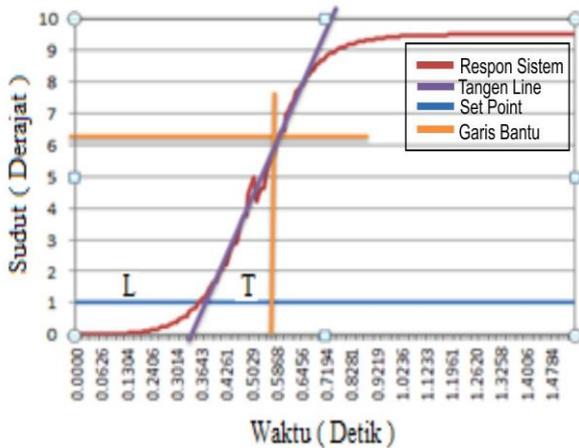
Pada Gambar 7 ditunjukkan program yang digunakan penulis untuk melakukan simulasi dari sistem.



Gambar 7. Rancangan kontrol PID pada Software Labview 2014

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan data dilakukan menggunakan *Software Labview 2014*. *Transfer Function* yang didapat dari perhitungan matematis dimasukkan kedalam program sehingga didapatkan hasil dari respon lup terbuka. Kemudian hasil dari sistem *open loop* digunakan untuk menentukan nilai dari K, L dan T. Berikut ini adalah cara menganalisa nilai L dan T seperti ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Menentukan nilai K, L dan t

Dari grafik didapatkan nilai L = 0,33 s dan t = 0,22 s

$$K = Y_{ss}/X_{ss}$$

$$= 6,326/1$$

$$= 6,326$$

$$a = K \times L / T$$

$$= 6,326 \times 0,33 / 0,22$$

$$= 9,489$$

Keterangan:

- K = Nilai input dibagi dengan rata-rata output.
- L = Waktu yang diperlukan dari awal sampai batas garis singgung dititik belok (s).
- T = Waktu yang dibutuhkan dari batas garis singgung dititik belok sampai batas kanan (s).
- a = notasi yang digunakan pada formula CHR.

Setelah mendapatkan nilai dari K dan a maka akan dilakukan perhitungan nilai K_p, T_i dan T_d dengan menggunakan aturan formula *tuning* pada metode CHR seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Formula Kontroler PID CHR

Jenis Kendali	K _p	T _i	T _d
PID	0,9a	2,4t	0,42L

$$K_p = 0,95 \times a$$

$$= 0,95 \times 9,489$$

$$= 9,014$$

$$T_i = 2,4 \times t$$

$$= 2,4 \times 0,22$$

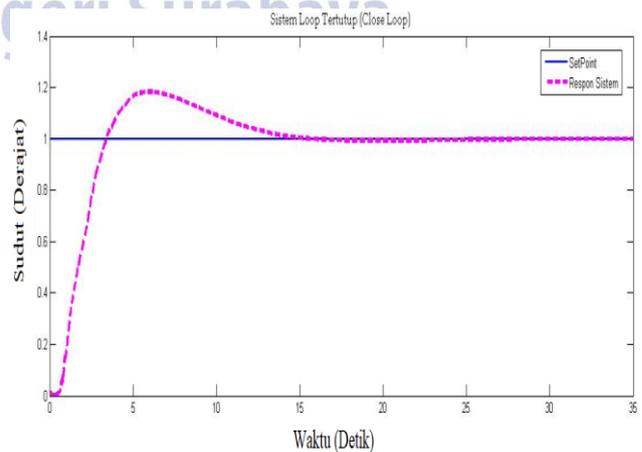
$$= 0,528$$

$$T_d = 0,42 \times L$$

$$= 0,42 \times 0,33$$

$$= 0,138$$

Berdasarkan pada hasil perhitungan dengan formula CHR maka didapatkan nilai dari K_p, K_i dan K_d kemudian nilai tersebut ditanamkan pada program Labview maka didapatkanlah hasil seperti ditunjukkan pada Gambar 9.

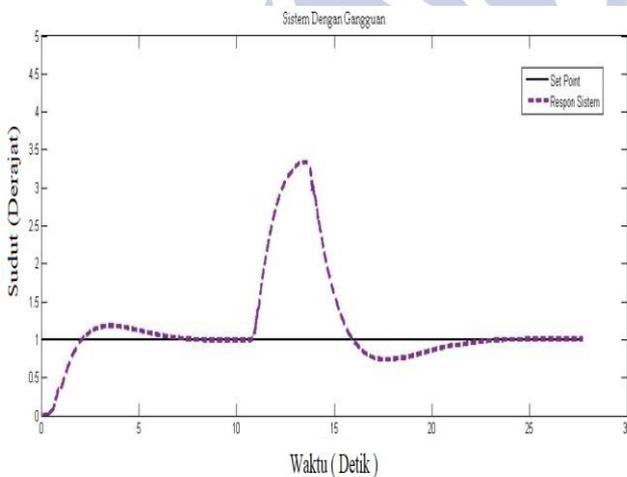


Gambar 9. Hasil Kontrol PID

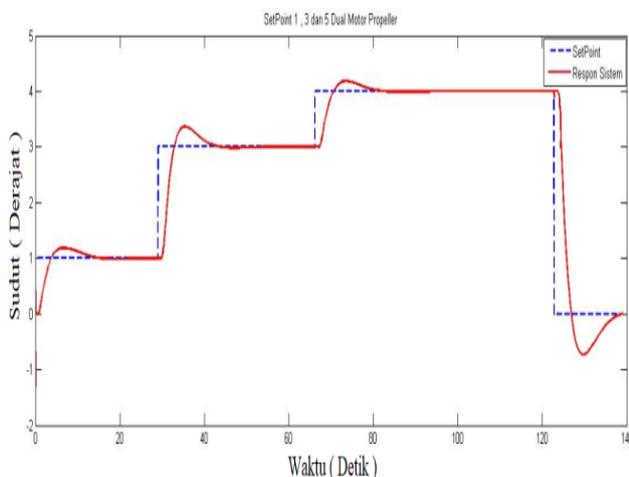
Pada Gambar 10 adalah hasil pengujian dengan memberikan gangguan pada sistem, gangguan berupa input sinyal step yang dimasukkan kedalam sistem sehingga menyebabkan osilasi pada sistem dan mempengaruhi kestabilan, kemudian sistem akan otomatis menghitung nilai kesalahan yang kemudian akan dijadikan sinyal koreksi pada sistem agar sistem dapat kembali stabil mengikuti *set point* yang diberikan. Pada grafik tersebut ditunjukkan bahwa sistem dapat mencapai kestabilan pada waktu 13.8s, namun sistem masih terdapat osilasi.

Berdasarkan pada Gambar 11 ditunjukkan ketika sistem dilakukan perubahan *set point* maka respon dari sistem dapat mengikuti *set point* dengan sangat baik. Dalam grafik tersebut *risetime*(tr) sangat baik, respon dapat dengan cepat bergerak menuju kepada *set point* dan mencapai kondisi *steady state*. Pada sistem ini respon masih terdapat *overshoot* terhadap perubahan *set point* namun *overshoot* tidak terlalu besar.

Berdasarkan data yang telah diperoleh dari hasil simulasi maka dapat dilakukan analisa pada respon dari sistem yang hasilnya akan ditunjukkan pada Tabel 3.



Gambar 10. Respon dengan gangguan



Gambar 11. Respon Sistem Perubahan Set Point

Tabel 3. Perbandingan Respon Sistem Set Point Open Loop

No	Sistem	Mp	tr	tp
1.	Open Loop	8.0	3.6	24.7
2.	Close Loop	1.17	3.4	5.51

Data dari respon sistem setelah diberikan control PID (*Proportional-Integral-Integratif*) dengan *tuning* Chien-Hrones-Reswick. Berdasarkan hasil analisa sistem setelah diberikan control PID menjadi sangat stabil (dapat mencapai *steady state*) dan mampu mengikuti *set point* yang diberikan, osilasi yang dihasilkan juga sangat kecil dan *rise time* dari respon sistem menjadi lebih cepat. Hasil dari simulasi sangat sesuai dengan karakteristik PID yang menghilangkan *steady state error* dan mampu mempercepat respon.

Diketahui nilai Nilai dari *Maximum Peak (MP)* adalah 1.18 sehingga dari data tersebut bisa kita dapatkan nilai *overshoot* sistem adalah sebesar 0.18 dalam waktu 0.6 s. Sistem kembali kedalam keadaan *steady state* pada waktu 1.5s nilai kesalahan dari kestabilan (*Ess*) atau *Error Steady State* diperoleh dari hasil perhitungan berdasarkan nilai rata-rata dari keadaan stabil terhadap *set point*. Berdasarkan hasil yang diperoleh dari perhitungan didapatkan nilai *steady state error* yaitu 0.99 derajat.

Dari percobaan tersebut dapat diketahui bahwa kendali PID dengan *Tuning CHR* dapat melakukan kontrol terhadap sistem dengan baik. Pada Tabel 4 adalah tabel respon sistem dari hasil pengontrolan PID pada sistem:

Tabel 4. Hasil Respon Sistem dengan Kontrol PID

Data ke	Waktu	Set Point	Respon
1	0.1	1	0.17
2	0.2	1	0.59
3	0.3	1	0.91
4	0.4	1	1.08
5	0.5	1	1.16
6	0.6	1	1.18
7	0.7	1	1.17
8	0.8	1	1.14
9	0.9	1	1.11
10	1.0	1	1.09
11	1.1	1	1.06
12	1.2	1	1.04
13	1.3	1	1.02
14	1.4	1	1.01
15	1.5	1	1.00

Pada Tabel 5 ditunjukkan hasil analisa data dari respon sistem dengan dilakukan perubahan *set point* pada sistem, *set point* yang digunakan dalam percobaan ini yaitu 1 derajat, 3 derajat dan 4 derajat yang mana hasil analisisnya ditampilkan pada tabel 4 dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 5. Hasil Analisis Terhadap Respon Sistem

Pengujian	Mp	t_p	t_r	E_{ss}	t_s	t_d
Set point 1	1.17	5.51	3.4	0.99	13.8	1.8
Set point 3	3.54	6.6	4.16	0.99	14	2.41
Set point 4	4.7	7.3	4.3	0.99	17.6	3.16
	%	detik	detik	derajat	detik	detik

Pada pengujian simulasi dilakukan dengan beberapa tahap yaitu tanpa gangguan, dengan gangguan dan pergantian *set point* pada sistem, gangguan yang diberikan berupa sinyal *disturbance* yang dimasukkan kedalam sistem. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan kontrol *Proportional Integral Derivatif* dengan nilai $K_p = 9.01$ $K_i = 0.52$ dan $K_d = 0.13$.

Berdasarkan pada hasil pengujian pada Tabel 5 didapatkan hasil *settling time* (t_s) paling cepat saat pada *set point 1 Error steady state* sangat kecil yaitu hanya 0.1 derajat, selisih nilai *rise time* (t_r) sangat cepat apabila dibandingkan dengan sistem *open loop* hal ini menunjukkan bahwa kendali PID dengan *tuning CHR* sangat baik dalam melakukan pengontrolan pada sistem.

SIMPULAN

Berdasarkan data yang didapatkan dari hasil penelitian yang telah dilakukan dan telah diuji dengan melakukan simulasi maka hasil simulasi *Dual Motor Propeller* dengan pengendali PID dengan model matematik yang didapatkan dari sistem mekanik berhasil bekerja dengan baik. Alat dapat melakukan kontrol dan bekerja mengikuti *set point* yang ditentukan. Hasil dari simulasi implementasi menggunakan kontroler PID pada sistem pengendalian *self balancing* pada *Dual Motor Propeller* didapatkan nilai terbaik $K_p = 9.01$ $K_i = 0.52$ dan $K_d = 0.13$ dapat memperbaiki hasil dari respon sistem dengan $E_{ss} = 0.99\%$ Maksimal *overshoot* = 3.13% $t_d = 2,45$ s, $t_r = 3.95$ s, $t_s(5\%) = 0.75$ s.

SARAN

Saran-saran yang dapat diteruskan pada penelitian selanjutnya adalah Model matematika yang digunakan hanya dapat digunakan untuk plant ini, dalam penelitian

selanjutnya dapat diupgrade parameter-parameter yang ada sehingga dapat menghasilkan model matematika baru dan mencoba berbagai *tuning* yang ada guna mengimplementasikan ilmu yang didapat dari perkuliahan sehingga kita dapat mengetahui hasil respon terhadap *tuning* tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

Agrawal, Shlok. Apoorva Mohan dan Kamlesh Kumar. 2013. *Design And Fabrication Of Twinrotor UAV*. India: Department of Mechatronics. Manipal University.

Firman, Beny. 2016. *Implementasi Sensor Imu MPU 6050 Berbasis Serial I2C Pada Self-Balancing Robot*. Jurusan Teknik Elektro: Institut Sains & Teknologi AKPRIND Yogyakarta.

Futuhul, Arifin. Ricky Arifandi Daniel dan Didit Widiyanto. 2014. *Autonomous Detection And Tracking Of An Object Autonomously Using Drone Quadcopter*. Jurnal Ilmu Komputer Dan Informasi (Journal Of Computer Science And Information). 7/1 (2014), 11-17

Hari, Armanda. 2019. Rancang Bangun Sistem Pengendalian Self Balancing Pada Dual Motor Proppeler Berbasis Fuzzy Logic Controller. Jurnal Teknik Elektro. Univesitas Negeri Surabaya.

Hidayat, Rahmad dan Mardiyanto, Ronny. 2016. *Pengembangan Sistem Navigasi Otomatis Pada UAV (Unmanned Aerial Vehicle) dengan GPS (Global Positioning System) Waypoint*. Jurnal Teknik ITS Vol.5, No.2

Hudha, Mohamad. 2019. Rancang bangun sistem pengendalian self balancing pada dual motor proppeler menggunakan kontroler PID. Jurnal Teknik Elektro. Univesitas Negeri Surabaya.

H. Lim dan S. N. Sinha. 2015. *Monocular Localization of a moving person onboard a Quadrotror MAV*.in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 2182-2189

Mostafa , S. A., Mustapha, A., Shamsudin, A. U., Ahmad, A., Ahmad M. S., dan Gunasekaran, S. S.. 2018. *A Real-Time Autonomous Flight Navigation Trajectory Assessment For Unmanned Aerial Vehicles*. In 2018 International Symposium On Agent, Multi-Agent Systems And Robotics (Isamsr) (Pp. 1-6). Ieee.

Ogata, Katsuhiko. Edi Leksono. 1995. *Teknik Kontrol Automatik Jilid 1*. Bandung.

Prayogo, Rudito. 2012. *Pengaturan PWM (Pulse Width Modulation)*. Jurusan Teknik Elektro. Universitas Brawijaya.

- Patel, Vinod KR Singh dan A.K.Pandey. 2013. *Modeling and Performance Analysis of PID Controlled BLDC Motor and Different Schemes of PWM Controlled BLDC Motor*. Department of Electrical Engineering, M.M.M. Engineering College. Gorakhpur (U.P.).
- Sheel, Dr. Satya dan Gupta, Omhari. 2012. *New Techniques of PID Controller Tuning of a DC Motor Development of a Toolbox*. MIT International Journal of Electrical and Instrumentation Engineering, Vol. 2, No. 2, Aug. 2012, pp. (65-69). India
- Wicaksono, Hendi. 2013. *Self Stabilizing 1 Axis QuadCopter Using T2-Fuzzy Controller*. Jurusan Teknik Elektro, Universitas Surabaya.
- Wisnu, Danu. Arif Wahjudi dan Hendro Nurhadi 2016. *Perancangan Sistem Kontrol PID Untuk Pengendali Sumbu Azimuth Turret Pada Turret-gun Kaliber 20mm*. Jurnal Teknik ITS: Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat LPPM-ITS.

