

Desain Sistem Kontrol Kecepatan Motor menggunakan Kendali PID pada Solar E-Bike

Nunung Dwi Khotimah¹, Subiyantoro², Muhamad Rifa'i³

[Submission: 20-07-2021, Accepted: 30-07-2021]

Abstract—Current technology encourages humans to innovate and create a means of transportation that is environmentally friendly, energy efficient, and can reduce dependence on fuel oil (BBM). Solar E-Bike is a vehicle without fuel oil (BBM) that is driven by a 250 Watt BLDC motor and a 24V battery as a source of voltage. A speed control system is needed that can control the rotation speed of the motor while running the Solar E-Bike. Setpoint input is done by rotating the throttle for speed assistance in the form of data sent to the microcontroller. The output of the microcontroller in the form of a PWM becomes the input for driving the motor driver. By implementing the PID (Proportional Integral Derivative) tuning formula of the Ziegler Nichols 2 method the parameter values of $K_p = 0.65625$, $K_i = 0.6$, and $K_d = 0.3588277$ are obtained. Based on the results of system testing, a good system response is obtained which results in a system response of rise time (t_r) with 4s time, time delay (t_d) with 3s time, 4.5s time peak (t_p), 24s settling time (t_s), maximum overshoot (m_p) 12.5%, with a setpoint input value of 16 km / H.

Intisari— Teknologi saat ini mendorong manusia untuk berinovasi dan menciptakan suatu alat transportasi yang ramah lingkungan, hemat energi dan dapat mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar minyak (BBM). Solar E-Bike adalah kendaraan tanpa bahan bakar minyak (BBM) yang digerakkan oleh motor BLDC 250 Watt dan baterai 24V sebagai sumber tegangannya. Diperlukan sebuah sistem pengontrol kecepatan yang dapat mengendalikan kecepatan putaran motor pada saat Solar E-Bike berjalan. Input setpoint dilakukan dengan memutar throttle untuk mengatur kecepatan berupa data yang dikirim ke mikrokontroler. Keluaran dari mikrokontroler berupa PWM menjadi masukan untuk penggerak driver motor. Dengan mengimplementasikan rumus tuning PID (Proportional Integral Derivative) metode Ziegler Nichols 2 diperoleh nilai parameter $K_p = 0.65625$, $K_i = 0.6$, dan $K_d = 0.3588277$. Berdasarkan hasil pengujian sistem, didapatkan respon sistem yang baik menghasilkan respon sistem rise time (t_r) dengan waktu 4s, time delay (t_d) dengan waktu 3s, time peak (t_p) 4,5s, settling time (t_s) 24s, maksimum overshoot (m_p) 12,5%, dengan nilai input setpoint sebesar 16 km/H.

Kata Kunci— Solar E-Bike, motor BLDC, PID, metode Ziegler Nichols 2

I. PENDAHULUAN

Sepeda merupakan alat transportasi yang sering digunakan oleh masyarakat sejak lama sebagai alat bantu dalam pekerjaan sehari-hari, baik untuk mengangkut orang maupun barang. Masyarakat Indonesia menganggap bersepeda sebagai aktivitas yang dilakukan pada hari libur, dengan tujuan bepergian ataupun olahraga. Pada sebagian masyarakat, sepeda menjadi alat transportasi alternatif untuk bepergian seperti ke sekolah, ke tempat kerja, ke pasar, dan lain-lain.

Teknologi saat ini telah mendorong manusia untuk berinovasi dan menciptakan suatu alat transportasi yang ramah lingkungan, hemat energi dan dapat mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar minyak (BBM) yang sewaktu-waktu akan habis. Contohnya hampir semua kendaraan bermotor di dunia menggunakan energi bahan bakar minyak (BBM). Pada saat ini mulai bermunculan alat transportasi dengan menggunakan energi listrik.

Sampai saat ini upaya pengembangan kendaraan listrik sebagai antisipasi semakin menipisnya cadangan bakar minyak telah banyak dilakukan, misalnya: *Electric Motorcycle* [1]. *Solar E-Bike* adalah kendaraan tanpa bahan bakar minyak (BBM) yang digerakkan oleh motor dan baterai. Untuk mengetahui apakah motor pada *Solar E-Bike* dapat bekerja dengan baik atau stabil, diperlukan sebuah sistem pengontrol kecepatan yang dapat mengendalikan kecepatan putaran motor pada saat *Solar E-Bike* berjalan. Untuk memperoleh respon motor yang bagus yaitu menggunakan pengendali PID, diperlukan penentuan (*tuning*) parameter K_p , K_i , K_d yang tepat [7]. Pada penelitian ini, penentuan parameter PID dilakukan dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols II.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. PID (*Proportional Integral Derivative Controller*)

Kontroler PID (*Proportional-Integral-Derivative Controller*) merupakan kontroler mekanisme umpan balik yang biasanya dipakai pada sistem kontrol industri.

p-ISSN: 2356-0533; e-ISSN: 2355-9195

¹Mahasiswa, Program Studi D-IV Teknik Elektronika Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Malang, Jln. Soekarno Hatta no. 9 Malang. e-mail: dwinunung13@gmail.com

^{2,3}Dosen, Program Studi D-IV Teknik Elektronika Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Malang, Jln. Soekarno Hatta no. 9 Malang. e-mail: subiyantoro@polinema.ac.id, m.rifai@polinema.ac.id



Kontroler mencoba untuk meminimalkan nilai kesalahan setiap waktu dengan penyetelan variabel kontrol, seperti posisi keran kontrol, damper, atau daya pada elemen pemanas, ke nilai baru yang ditentukan oleh jumlahan [2]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (1)$$

dengan

K_p : Gain proporsional, parameter tuning

K_i : Gain Integral, parameter tuning

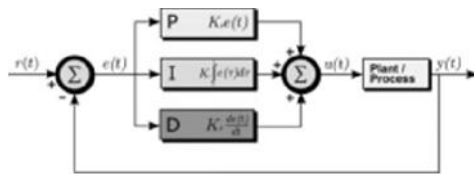
K_d : Gain Derivatif, parameter tuning e: Error = $Y_{sp} - Y_m$

Y_{sp} : Setpoint

Y_m : Variabel proses

T : Waktu

t : Variabel integrasi; nilainya diambil dari waktu nol sampai t.



Gambar 1 : Blok diagram PID [2]

Dengan K_p , K_i , and K_d , semuanya positif, menandakan koefisien untuk term proporsional, integral, dan derivatif, secara berurutan (atau P, I, dan D)[8]. Pada model ini:

- P bertanggung jawab untuk nilai kesalahan saat ini. Contohnya, jika nilai kesalahan besar dan positif, maka keluaran kontrol juga besar dan positif.
- I bertanggung jawab untuk nilai kesalahan sebelumnya. Contoh, jika keluaran saat ini kurang besar, maka kesalahan akan terakumulasi terus menerus, dan kontroler akan merespon dengan keluaran lebih tinggi.
- D bertanggung jawab untuk kemungkinan nilai kesalahan mendatang, berdasarkan pada rate perubahan tiap waktu.

TABEL 1

KARAKTERISTIK PID [3]

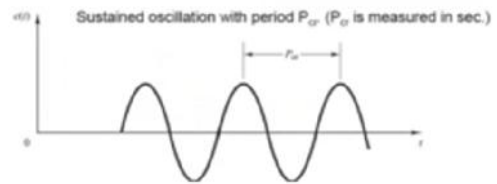
Tanggapan Loop Tertutup	Waktu Naik	Overshoot	Waktu Turun	Error Steady State
Proporsional	Menurun	Meningkat	Perubahan	Menurun

(Kp)			Kecil	
Integral (Ki)	Menurun	Meningkat	Meningkat	Hilang
Derivative (Kd)	Perubahan Kecil	Menurun	Menurun	Perubahan Kecil

A. Metode Penalaan Ziegler Nichols II

Pada metode Ziegler Nichols tipe 2 ini proses penentuan parameter PID dihitung menggunakan respon yang diatur menggunakan *slider gain* sehingga respon beresilasi. Metode ini diaplikasikan pada sistem loop tertutup (*close loop*) atau dengan umpan balik, (K_i & K_d di set 0/off) [4]. Pada metode kedua ini, percobaan dilakukan dengan menggunakan *proportional band*. Nilai K_p dinaikkan dari 0 hingga tercapai nilai K_p yang menghasilkan osilasi yang konsisten. Nilai *slider gain* ini disebut sebagai *critical gain* (K_{cr}).

Jika harga K_p terlalu kecil, sinyal output akan teredam mencapai nilai titik keseimbangan setelah ada gangguan. Sebaliknya, jika harga K_p terlalu besar, osilasinya akan tidak stabil dan membesar, seperti gambar 2[9].



Gambar 2. Osilasi Stabil untuk Mencari Nilai Pcr [4]

Pada metode ini nilai penguatan K_p disebut K_{cr} dan nilai P_{cr} didapatkan dari mengurangkan kedua tinggi gelombang tersebut dan mengalikannya dengan nilai K_{cr} .

TABEL 2

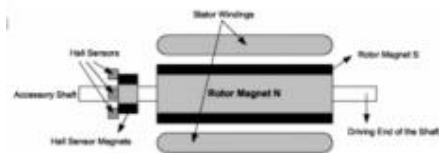
ATURAN PENYESUAIAN ZIEGLER – NICHOLS BERDASARKAN CRITICAL GAIN KCR DAN CRITICAL PERIODE PCR (METODE KEDUA) [5]

Tipe Kontrol	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_{cr}$		0
PI	$0.45 K_{cr}$	$\frac{1}{1.2} P_{cr}$	0
PID	$0.6 K_{cr}$	$0.5 P_{cr}$	$0.125 r$



B. Brushless Direct Current (BLDC) Motor

Motor BLDC adalah tipe dari motor sinkron. Hal ini berarti medan magnetik yang dihasilkan oleh *stator* dan medan magnetik yang dihasilkan oleh *rotor* berputar pada frekuensi yang sama. Motor BLDC tidak mengalami slip yang biasanya terjadi pada motor induksi. Motor BLDC terdapat dalam konfigurasi 1 fasa, 2 fasa, dan 3 fasa. Seperti namanya motor BLDC tidak menggunakan sikat untuk melakukan komutasi tetapi menggunakan komutasi elektris, untuk dapat memutar motor BLDC maka kumparan *stator* dari motor harus diberi tegangan sesuai urutan komutasi, supaya dapat melakukan hal tersebut maka posisi *rotor* harus dapat diketahui. Posisi *rotor* ini dapat diketahui dengan menggunakan sensor *hall effect* atau dengan teknik *sensorless* yaitu dengan mendeteksi ggl balik pada kumparan *stator* [6].



Gambar 3. Konstruksi Motor BLDC [6]

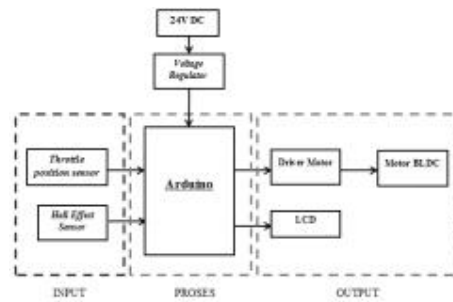
C. Driver Motor BLDC

Driver motor BLDC atau biasa disebut dengan penggerak elektronik daya pada motor BLDC merupakan suatu rangkaian sistem elektronik yang berfungsi untuk menggerakkan motor listrik. Komponen utama pada *driver* motor BLDC ini merupakan transistor yang berfungsi sebagai *switching* atau penyakelaran. Transistor yang digunakan untuk motor listrik BLDC ini bukan transistor biasa, akan tetapi menggunakan transistor-transistor daya seperti MOSFET (*metal oxide semiconductor field effect transistor*), IGBT (*insulated gate bipolar transistor*), dan sebagainya [10].

III. METODOLOGI PENELITIAN

Metode dalam penelitian ini yaitu berupa perancangan dan pembuatan alat yang terdiri dari dua bagian, yaitu bagian mekanik dan bagian elektrik. Perancangan dan pembuatan alat dilakukan secara bertahap untuk memudahkan analisa sistem. Beberapa aspek yang perlu dijelaskan yaitu meliputi perencanaan masing-masing blok rangkaian dan perencanaan sistem secara keseluruhan.

A. Diagram Blok Sistem



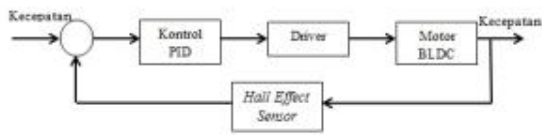
Gambar 4 Diagram Blok Sistem

Dari gambar 4 dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. 24V DC
Berfungsi untuk memberikan tegangan kepada setiap komponen atau rangkaian elektrik.
2. Voltage Regulator
Berfungsi untuk mengatur tegangan sebesar 0-5 Volt sebagai *supply* ke Arduino.
3. Throttle position sensor
Berfungsi untuk mengambil data *set point* kecepatan pada *handle grip* gas sepeda. *Throttle position sensor* mengubah data dari bukaan *throttle* menjadi *signal* analog DC 0-5 Volt.
4. Hall Effect Sensor
Berfungsi untuk mendeteksi medan magnet yang berada pada motor yang akan menghasilkan sebuah tegangan dengan kekuatan medan magnet yang diterima.
5. Arduino
Digunakan untuk memproses informasi analog dari *throttle* menjadi 10 bit biner dengan fasilitas ADC dan kemudian diproses menggunakan algoritma dengan output keluaran pada pin PWM Arduino.
6. Driver
Digunakan untuk memicu titik kerja berfungsi untuk menggerakkan motor BLDC.
7. Motor BLDC
Berfungsi untuk menggerakkan roda *Solar E-Bike*.
8. LCD
Berfungsi untuk menampilkan data yang telah diproses oleh Arduino Nano.



B. Diagram Blok Kontrol



Gambar 5 Diagram Blok Kontrol

Dari gambar tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut :

- 1) Kontrol PID digunakan untuk mengontrol besaran PWM yang masuk ke driver motor.
- 2) *Driver* berfungsi untuk memicu titik kerja dari motor saat *setpoint* diinputkan.
- 3) Motor BLDC digunakan untuk menjalankan roda *Solar E-Bike*.
- 4) *Hall Effect Sensor* digunakan untuk melihat apakah kecepatan motor sudah seperti *setpoint* yang telah ditentukan, dengan meletakkan sensor pada poros motor, maka setiap perubahan kecepatan akan terbaca oleh sensor tersebut.

C. Prinsip Kerja

Data kecepatan pada *handle grip* gas sepeda diambil oleh *throttle position sensor* dan diubah menjadi signal analog DC 0-5 Volt. *Hall effect sensor* yang berfungsi mendeteksi magnet pada poros motor akan memberikan data putaran motor ke Arduino. Lalu arduino akan memproses informasi analog tersebut menjadi 10 bit biner dengan fasilitas ADC dan kemudian diproses menggunakan algoritma dengan output berupa PWM. Selanjutnya data PWM akan diterima oleh *driver* (penggerak) motor agar dapat digunakan untuk menggerakkan motor BLDC sehingga roda *Solar E-Bike* dapat berputar.

D. Perancangan Mekanik

1. Spesifikasi Alat

Berikut spesifikasi dari alat yang akan digunakan dalam penelitian :

- a. Panjang alat : 120 cm
- b. Lebar alat : 70 cm
- c. Tinggi alat : 50 cm
- d. Berat : 25 Kg
- e. Bahan : Besi
- f. Jenis Motor : BLDC
- g. Kecepatan Maks : 30 km/H

- h. Beban Maks (penumpang) : 80 kg
- i. Display : LCD 20x6
- j. Tegangan kerja : 24V DC

2. Gambar Mekanik Alat



Gambar 6 Mekanik *Solar E-Bike* tampak samping

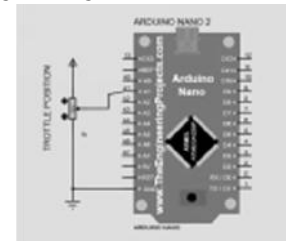


Gambar 7 Mekanik *Solar E-Bike* tampak belakang

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perancangan Elektrik

1. Perancangan Rangkaian *Throttle Position Sensor*



Gambar 8 Rangkaian *Throttle Position Sensor*

Throttle position sensor mengubah data dari bukaan *throttle* menjadi *signal* analog DC 0-5 Volt. Pada Arduino informasi analog tersebut sebesar 10 bit biner yang memiliki nilai resolusi pembacaan ADC sebesar 0 – 1023 dengan tegangan referensi sebesar 5V, sehingga untuk menghitung nilai resolusi setiap bit atau *step size* pada nilai dapat menggunakan persamaan :

Diketahui :



Vreferensi = 5V (datasheet)

Full scale = 1023

$$Stepsize = \frac{Nilai\ ADC}{Fullscale} \times Vref \quad (2)$$

Jika nilai ADC misal 1 bit, maka :

$$Stepsize = \frac{1}{1023} \times 5V$$

$$Stepsize = 0,00488758V$$

Jadi, tegangan keluaran ADC tiap bitnya adalah 0,00488758V. Tegangan per bit adalah tegangan hasil pengkonversian dari analog ke digital yang dibaca oleh ADC. Untuk mengetahui nilai sensitivitas sensor dapat diketahui dari output data hasil pengujian sensor dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Sensitivitas = \frac{\text{selisih nilai output tegangan (Volt)}}{\text{selisih nilai sudut throttle (derajat)}} \times A(\text{derajat}) \quad (3)$$

$$= \frac{(V_2 - V_1) \text{ Volt}}{(X_2 - X_1) \text{ derajat}} \times A(\text{derajat})$$

Dimana :

V_1 : nilai output tegangan data nomor 1

V_2 : nilai output tegangan data nomor 2

X_1 : nilai sudut data nomor 1

X_2 : nilai sudut data nomor 2

A : selisih nilai perubahan sudut throttle (derajat) yang dikehendaki

Sehingga, nilai sensitivitas sensor dapat diketahui dengan menggunakan persamaan (3) dengan nilai $X_1 = 0$ derajat, $X_2 = 10$ derajat, $V_1 = 0,88$ Volt, $V_2 = 1,22$ Volt, dan $A = 20$ derajat, sebagai berikut :

$$Sensitivitas = \frac{\text{selisih nilai output tegangan (Volt)}}{\text{selisih nilai sudut throttle (derajat)}} \times A(\text{derajat})$$

$$= \frac{(V_2 - V_1) \text{ Volt}}{(X_2 - X_1) \text{ derajat}} \times A(\text{derajat})$$

$$= \frac{1,22 - 0,88}{10 - 0} \times 20$$

$$= \frac{0,34}{10} \text{ Volt/derajat} \times 20 \text{ derajat}$$

$$= 0,68 \text{ Volt}$$

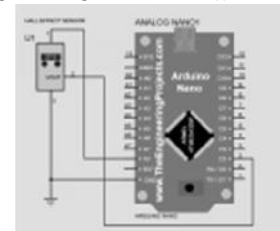
Setelah mengetahui nilai sensitivitas sensor tersebut yaitu lebih besar dari nilai tegangan per bit ADC maka sensor dapat digunakan dan tidak memerlukan rangkaian pengkondisi penguat sinyal.

TABEL 3

WIRING THROTLE POSITION SENSOR KE ARDUINO NANO

Pin Throttle	Interface
Pin 1	A0 Arduino nano
Pin 2	5V
Ground	Ground

- 1)
2. Perancangan Rangkaian Hall Effect Sensor



Gambar 9 Rangkaian Hall Effect Sensor

Hall Effect Sensor berfungsi untuk mendeteksi medan magnet yang berada pada motor pada saat motor berputar yang mempengaruhi nilai tegangan yang dihasilkan. Tegangan tersebut selanjutnya akan dikonversi dengan bantuan mikrokontroler melalui port ADC yaitu sebesar 0 – 1023 dengan tegangan referensi sebesar 5V, sehingga untuk menghitung nilai resolusi setiap bit atau step size pada nilai dapat menggunakan persamaan :

Diketahui :

Vreferensi = 5V (datasheet)

Full scale = 1023

$$Stepsize = \frac{Nilai\ ADC}{Fullscale} \times Vref \quad (2)$$

Jika nilai ADC misal 1 bit, maka :

$$Stepsize = \frac{1}{1023} \times 5V$$

$$Stepsize = 0,00488758V$$



Jadi, tegangan keluaran ADC tiap bitnya adalah 0,00488758V. Tegangan per bit adalah tegangan hasil pengkonversian dari analog ke digital yang dibaca oleh ADC. Untuk mengetahui nilai sensitivitas sensor dapat diketahui dari output data hasil pengujian sensor dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Sensitivitas} &= \frac{\text{selisih nilai output tegangan (Volt)}}{\text{selisih nilai kecepatan (Rpm)}} \times Z \quad (5) \\ &= \frac{(V_2 - V_1) \text{ Volt}}{(Y_2 - Y_1) \text{ rpm}} \times Z (\text{rpm}) \end{aligned}$$

Dimana :

V_1 : nilai output tegangan data nomor 1

V_2 : nilai output tegangan data nomor 2

Y_1 : nilai rpm data nomor 1

Y_2 : nilai rpm data nomor 2

Z : selisih nilai perubahan kecepatan (rpm) yang dikehendaki

Sehingga, nilai sensitivitas sensor dapat diketahui dengan menggunakan persamaan (5) dengan nilai $Y_1 = 225$ rpm, $Y_2 = 219$ rpm, $V_1 = 0,39$ Volt, $V_2 = 0,355$ Volt, dan $Z = 5$ rpm, yaitu sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Sensitivitas} &= \frac{\text{selisih nilai output tegangan (Volt)}}{\text{selisih nilai kecepatan (rpm)}} \times Z (\text{rpm}) \\ &= \frac{(V_2 - V_1) \text{ Volt}}{(Y_2 - Y_1) \text{ rpm}} \times Z (\text{rpm}) \\ &= \frac{0,39 - 0,355}{225 - 219} \times 5 \\ &= \frac{0,035}{6} \times 5 \\ &= 0,00583333 \text{ Volt/rpm} \times 5 \text{ rpm} \\ &= 0,0291666 \text{ Volt} \end{aligned}$$

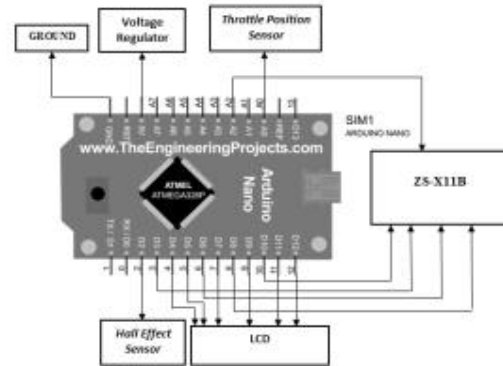
Dengan diketahui nilai tegangan keluaran per bit ADC dan nilai sensitivitas sensor, maka dapat diketahui apakah sensor memerlukan rangkaian pengkondisi penguat sinyal ataupun tidak.

TABEL 4

WIRING HALL EFFECT SENSOR KE ARDUINO NANO

Pin Regulator	Pin Arduino Nano
Vin	5V
Vout	D2
Ground	Ground

3. Perancangan Rangkaian Arduino Nano



Gambar 10 Rangkaian Arduino Nano

Arduino nano sebagai kontroler utama dan mengolah data I/O. Arduino nano memiliki 14 digital pin yang bisa digunakan sebagai input dan output dan 8 pin input analog.

4. Perancangan Kontrol PID

Pada perancangan *software* menggunakan pendekatan *Ziegler Nichols 2* dengan menentukan nilai K_p , K_i , dan K_d , dimana ketiga konstanta ini berpengaruh terhadap respon sistem. Untuk perencanaan pengujian sistem keseluruhan dilakukan menggunakan parameter PID sesuai kontroler yang digunakan pada sistem ini, yaitu sebagai berikut :

1) Waktu naik (*rise time*)

Waktu naik (t_r) adalah waktu yang diperlukan tanggapan anai dari presentase 10%-90% dari nilai akhir.

2) Waktu tunda (*delay time*)

Waktu tunda (t_d) adalah waktu yang dibutuhkan tanggapan untuk mencapai setengah nilai akhir yang pertama kali.

3) Waktu puncak (*peak time*)

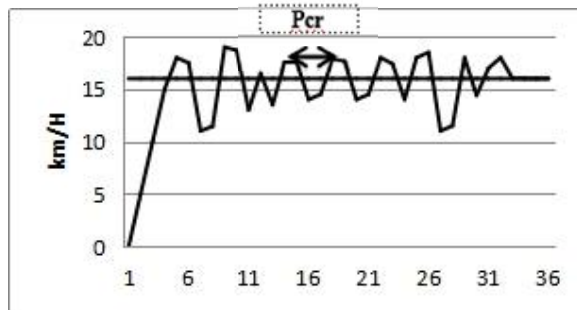


Waktu puncak (t_p) adalah waktu yang dibutuhkan tanggapan untuk mencapai puncak lewatan yang pertama kali.

- 4) Lonjakan maksimum (*maximum overshoot*)
 Lonjakan maksimum adalah nilai puncak maksimum kurva tanggapan terhadap nilai pada keadaan tunaknya.

- 5) *Error steady state*
Error steady state adalah selisih *steady state* sistem dengan *setpoint* yang sudah ditentukan. Untuk mengetahui *error steady state*, terlebih dahulu harus diketahui nilai *steady state* pada sistem.

$$Error\ steady\ state = \frac{steady\ state - setpoint}{setpoint} \times 100\%$$



Gambar 11 Respon Osilasi motor BLDC

Gambar grafik diatas adalah respon osilasi motor BLDC tanpa beban. Dari grafik diatas dapat ditemukan titik puncak yang sama yaitu pada titik ke-18 dan titik ke-14, nilai $t_2 = 18$ $t_1 = 14$. Grafik diatas merupakan hasil yang diperoleh dari gain nilai $K_p=1,09375$, $K_i=0$, dan $K_d=0$.

Pada metode ini nilai penguatan K_p disebut K_{cr} , sehingga nilai K_{cr} sebesar 1,09375 dan nilai P_{cr} didapatkan dari mengurangi kedua tegangan tinggi gelombang tersebut dan mengalikan dengan nilai K_{cr} . Berdasarkan grafik diatas, nilai output yang diperoleh sebesar 17.5 km/H dan *setpoint* sebesar 16 km/H. Berikut nilai K_{cr} dan P_{cr} yang diperoleh :

Nilai P_{cr} didapatkan dari persamaan yaitu sebagai berikut :

$$\begin{aligned} P_{cr} &= (X_2 - X_1) \cdot K_{cr} \\ &= (18 - 14) \cdot 1,09375 \\ &= 4 \cdot 1,09375 \\ &= 4,375 \end{aligned}$$

Berdasarkan parameter tersebut, didapatkan nilai parameter K_p , T_i , dan T_d yaitu sebagai berikut :

$$\begin{aligned} K_p &= 0,6 \cdot K_{cr} \\ &= 0,6 \cdot 1,09375 \\ &= 0,65625 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_i &= 0,5 \cdot P_{cr} \\ &= 0,5 \cdot 4,375 \\ &= 2,1875 \end{aligned}$$

Setelah nilai T_i diperoleh, maka selanjutnya mencari nilai T_d yaitu sebagai berikut :

$$\begin{aligned} T_d &= 0,125 \cdot P_{cr} \\ &= 0,125 \cdot 4,375 \\ &= 0,546785 \end{aligned}$$

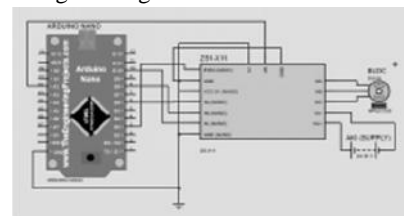
Apabila parameter T_i dan T_d sudah diketahui, maka konstanta K_i dan K_d dapat ditentukan, yaitu sebagai berikut :

$$\begin{aligned} K_i &= 2 \cdot \frac{K_p}{T_i} \\ &= 2 \cdot \frac{0,65625}{2,1875} \\ &= 2 \cdot 0,3 \\ &= 0,6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_d &= K_p \cdot T_d \\ &= 0,65625 \cdot 0,546785 \\ &= 0,3588277 \end{aligned}$$

Jadi, diperoleh nilai K_p sebesar 0.65625, K_i sebesar 0.6, dan K_d sebesar 0.3588277.

1. Perancangan Rangkaian ZS-X11B



Gambar 12 Rangkaian ZS-X11B



Rangkaian ZS-X11B adalah rangkaian driver (penggerak) motor BLDC. Berdasarkan spesifikasi, rangkaian ini bekerja pada tegangan kerja 5-36V, arus maksimum sebesar 16 Ampere, dan daya maksimum sebesar 360 Watt. Motor BLDC dengan spesifikasi daya sebesar 250 Watt, Dalam menggunakan rangkaian driver yaitu ZS-X11B harus memperhatikan beban yang akan digunakan. Pada sistem ini, driver yang digunakan memiliki daya maksimum sebesar 360 Watt dan tegangan input sebesar 24 Volt. Oleh karena itu driver mampu dibebani arus sebesar :

$$P = V \times I$$

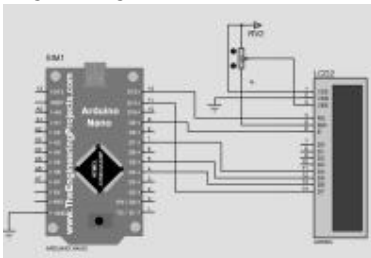
$$360 \text{ Watt} = 24 \text{ V} \times I$$

$$I = \frac{360 \text{ Watt}}{24 \text{ V}}$$

$$= \pm 15 \text{ Ampere}$$

Berdasarkan spesifikasi, rangkaian driver ZS-X11B mampu dibebani arus maksimum sebesar 16 Ampere dan tegangan maksimum sebesar 36 Volt.

2. Perancangan Rangkaian LCD



Gambar 13 Rangkaian LCD

Rangkaian display ini berfungsi untuk menampilkan data-data yang sebelumnya telah diproses oleh mikrokontroler dan ditentukan data yang akan ditampilkan pada LCD.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Throttle Position Sensor

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai tegangan output pada *throttle* dengan kondisi putaran *throttle* yang diputar pada kondisi minimal (0 derajat) hingga kondisi maksimal (180 derajat).

TABEL 5
PENGUJIAN *THROTTLE POSITION SENSOR*

No	Posisi putar (derajat)	Throttle (V)	ADC
1	0	0.88	180
2	20	1.22	250
3	40	1.56	319
4	60	1.51	309
5	80	2.24	459
6	100	2.58	528
7	120	2.93	600
8	140	3.27	670
9	160	3.59	735
10	180	3.93	805

Berdasarkan hasil pengujian *Throttle Position Sensor* dapat dilihat dari Tabel 5. bahwa *Throttle* memiliki output *Voltase*. Pengujian dilakukan dengan memutar *throttle* pada posisi minimal hingga posisi maksimal. Pada kondisi minimal output *throttle* berada di *voltase* rendah dan ketika diputar pada kondisi maksimal nilai *voltase* mengalami kenaikan. Kondisi ini juga dapat dilihat pada nilai ADC *throttle* yang mengalami perubahan nilai sesuai dengan nilai tegangan analog.

B. Pengujian Hall Effect Sensor

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah sensor dapat mendeteksi magnet yang terdapat dalam motor. Prosedur pengujian dilakukan dengan menghubungkan sensor dengan motor, kemudian masukkan program Arduino, dan pengukuran dilakukan menggunakan multimeter digital.

TABEL 6
PENGUJIAN *HALL EFFECT SENSOR*

No	RPM sistem	RPM Tachometer	Error(%)	Tegangan (V)	ADC
1	225	223	0.89	0.39	79.9
2	219	218	0.46	0.355	72.7
3	214	213	0.47	0.32	65.6



4	209	208	0.48	0.285	58.4
5	204	203	0.49	0.25	51.2
6	199	198	0.51	0.215	44.1
7	194	193	0.52	0.18	36.9
8	188	188	0	0.145	29.7
9	183	183	0	0.11	22.5
10	178	178	0	0.075	15.4
Rata – rata error			0.38		

Berdasarkan hasil pengujian dapat dilihat dari Tabel 6. bahwa perbandingan hasil pembacaan putaran motor dengan tachometer terdapat selisih. Akan tetapi selisih tersebut apabila dipresentasikan tidak mencapai 3%, sehingga *error* tersebut masih bisa ditoleransi. Data dari *Hall Effect Sensor* ini akan masuk dan diolah oleh kontroler yang digunakan sebagai *feedback* dari sistem.

Untuk perhitungan nilai error seperti data diatas, menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\%Error = \frac{RPM\ sistem - RPM\ Tachometer}{RPM\ Tachometer} \times 100\%$$

C. Pengujian Driver

Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui daya output dengan mengetahui nilai arus keluaran dan tegangan keluaran pada driver.

TABEL 7
 PENGUJIAN DRIVER

No	PWM	Arus (Ampere)	Tegangan (V)
1	100%	2.07	24.34
2	48,2%	1.7	24.22
3	98%	1.82	24.17
4	97,3%	1.58	24.06
5	61,9%	1.95	24.02
6	97,3%	1.58	24.02
7	48,2%	1.7	24.01

8	98,8%	2.07	24.02
9	98%	1.82	24

Dari Tabel 7, dapat dilihat bahwa driver dalam kondisi normal. Nilai PWM pada rangkaian driver motor BLDC sangat berpengaruh pada kecepatan putaran motor BLDC. Semakin besar nilai PWM yang diberikan maka kecepatan putar motor semakin bertambah dan sebaliknya semakin kecil nilai PWM yang diberikan maka kecepatan motor semakin berkurang.

D. Pengujian Motor

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui berapa kecepatan putaran motor yang dihasilkan sesuai dengan kondisi *throttle*.

TABEL 8
 PENGUJIAN MOTOR

No	Throttle (V)	Kecepatan (Km/H)
1	2.17	13.02
2	2.55	15.3
3	2.67	16.02
4	2.54	15.24
5	2.66	15.96
6	2.66	15.96
7	2.67	16.02
8	2.66	15.96
9	2.68	16.08
10	2.51	15.06

Dari data Tabel 8 dapat dilihat bahwa besar nilai kecepatan motor dipengaruhi oleh kondisi *throttle*. Ketika *throttle* diputar dengan kondisi minimal ataupun maksimal nilai kecepatan yang terdapat pada LCD akan berubah nilainya.

Untuk perhitungan nilai kecepatan seperti data diatas, menggunakan rumus sebagai berikut :

$$V_{ref\ analog} = 0 - 5V$$

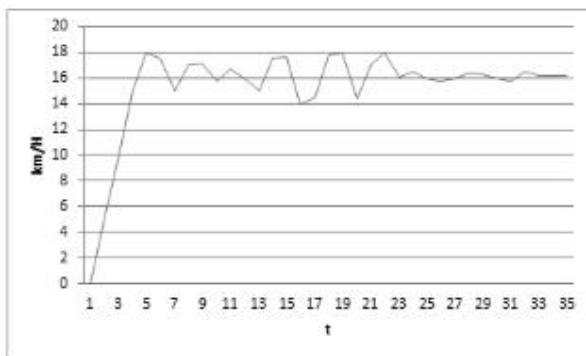


Nilai kecepatan maks (spesifikasi kontroler(driver)) = 0 – 30 km/H

$$\text{kecepatan} = \frac{\text{Vanalog terbaca}}{\text{Vanalog max}} \times \text{kecepatan ma}$$

E. Pengujian Parameter PID

Pada pengujian parameter PID menggunakan metode Ziegler-Nichols 2 dilakukan dengan memasukkan nilai $K_p=0.65625$, $K_i=0.6$, dan $K_d=0.3588277$ yang diperoleh dari perhitungan pada bab sebelumnya dan nilai *setpoint* 16km/H, untuk selanjutnya menganalisa respon motor yang telah terkontrol dengan menggunakan metode PID tersebut. Dengan menganalisa respon motor ketika sistem diaktifkan, motor bergerak tanpa menggunakan *throttle* sebagai pengaturan kecepatan.



Gambar 14 Grafik Respon Motor

Berdasarkan pada Gambar 14 diperoleh grafik respon sistem dengan menggunakan kontrol PID tanpa menggunakan beban, kurva reaksi diatas menunjukkan respon sistem yang dapat dihitung dengan perhitungan respon sebagai berikut :

a. *Overshoot* maksimum = M_p

Overshoot maksimum adalah nilai puncak kurva respons diukur dari satuan, sehingga nilai M_p mencapai = 18

$$\begin{aligned} m_p &= \frac{\text{nilai overshoot} - \text{nilai setpoint}}{\text{nilai setpoint}} \times 100 \\ &= \frac{18 - 16}{16} \times 100\% \\ &= 12,5\% \end{aligned}$$

b. Waktu naik (*rise time*) = t_r

Waktu naik (t_r) adalah waktu yang diperlukan tanggapan untuk naik mencapai nilai akhir dari tanggapan sehingga nilai $t_r = 4s$

c. Waktu tunda (*delay time*) = t_d

Waktu tunda (t_d) adalah waktu yang dibutuhkan oleh respon untuk mencapai setengah harga akhir pada saat lonjakan pertama, maka dapat diketahui untuk mencapai $t_d = 3s$

d. Waktu puncak (*peak time*) = t_p

Waktu puncak (t_p) adalah waktu yang dibutuhkan oleh respon untuk mencapai puncak saat lonjakan pertama (maksimum). Berdasarkan grafik maka diperoleh $t_p = 4,5s$

e. Waktu tetap (*settling time*) = t_s

Waktu tetap (t_s) adalah waktu yang dibutuhkan oleh respon untuk mencapai harga tertentu dan berada tetap dalam range harga akhir (biasanya 5% atau 2%). Berdasarkan grafik maka diperoleh $t_s 2\% = 26s$ dan $t_s 5\% = 24s$.

f. *Error steady state*

Error steady state adalah selisih *steady state* sistem dengan *setpoint* yang sudah ditentukan. Untuk mengetahui *error steady state* , terlebih dahulu harus diketahui nilai *steady state* pada sistem yaitu 16,1 km/H.

F. Pengujian Sistem dengan menggunakan Beban

Pengujian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui apakah motor yang telah dikontrol akan mengalami recovery atau tidak ketika motor tersebut mengalami pembebanan. Pengujian ini diambil dengan beban 40 Kg, 46 Kg, 52 Kg, 55 Kg dan 80 Kg pada medan jalan mendatar dengan nilai input *setpoint* sebesar 17 Km/H.

TABEL 9
PENGUJIAN DENGAN MENGGUNAKAN BEBAN

No	Beban	Setpoint	Kecepatan
1	40 Kg	17 km/H	16,99 km/H
2	46 Kg	17 km/H	16,60 km/H
3	52 Kg	17 km/H	16,20 km/H
4	55 Kg	17 km/H	15,81 km/H
5	80 Kg	17 km/H	7,79 km/H



Dari Tabel 9, terlihat bahwa terjadi perubahan pada speed. Respon yang dihasilkan motor dari beban yang terendah hingga tertinggi menghasilkan nilai kecepatan menurun. Nilai setpoint sebesar 17 Km/H, menghasilkan nilai kecepatan yang berbeda yang mendekati nilai setpoint. Semakin rendah beban maka kecepatan akan semakin tinggi, begitu juga sebaliknya semakin tinggi beban maka kecepatan akan semakin rendah.

Nilai beban maksimum yaitu sebesar 80 kg (berat penumpang), sedangkan berat keseluruhan alat meliputi besi, motor, baterai, control box, dll. dapat dilihat pada bab sebelumnya yaitu sebesar 25 kg. berikut berat beban total yang dihasilkan :

$$\begin{aligned} \text{Berat beban total} &= \text{berat maks penumpang} + \text{berat alat} \\ &= 80 + 25 \\ &= 105 \text{ kg} \end{aligned}$$

Jadi, berat beban maksimum atau berat beban total pada Solar E-Bike sebesar 105 kg, dengan kecepatan yang dihasilkan sebesar 7,79 km/H.

V. PENUTUP

A. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa Solar E-Bike telah berhasil dibuat dan sistem juga berjalan. Berdasarkan pengujian dapat diambil beberapa kesimpulan bahwa:

1. Solar E-Bike adalah sepeda listrik yang menggunakan solar cell sebagai sumber energi listrik yang kemudian digunakan untuk mengisi aki. Lalu motor BLDC akan berputar sehingga menggerakkan roda Solar E-Bike.
2. Dengan menggunakan kontrol PID dapat mengatur dan menstabilkan kecepatan motor pada Solar E-Bike. Nilai parameter PID yang sesuai adalah $K_p=0.188$, $K_i=0.12$, $K_d=5.2$. Metode PID mampu bekerja sesuai dengan setpoint yang ditentukan. Akan tetapi mengakibatkan overshoot system. Percent overshoot (mp) yang ditimbulkan pada starting yaitu sebesar 12,5%.
3. Nilai beban maksimum atau berat beban total pada Solar E-Bike sebesar 105 kg, dengan kecepatan yang dihasilkan sebesar 7,79 km/H.

B. Saran

Dari hasil penelitian masih banyak kekurangan, untuk memperbaiki dan menyempurnakan alat ini disarankan :

1. Penggunaan baterai yang lebih ringan agar beban sepeda listrik lebih ringan
2. Penggunaan driver motor yang sesuai dengan motor BLDC untuk mengontrol putaran motor BLDC
3. Algoritma PID yang digunakan diperbaiki lagi agar mencapai sistem yang lebih stabil.
4. Algoritma yang digunakan dapat diganti dengan algoritma Fuzzy Logic untuk membandingkan respon putaran.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]Nurhadi. 2018. Pengembangan Sepeda Motor Listrik sebagai Sarana Transportasi Ramah Lingkungan. Jurnal SENIATI 2018. ISSN:2085-4218.
- [2]Demin, Lazar. 2019. Build a PID Controller with Python 2019. Onion Corporation.
- [3]Simanjuntak, Bernard Daniel. 2019. Analisis Perbandingan Pengaturan Kecepatan Motor BLDC dengan Menggunakan Kontrol PI dan PID. Skripsi Universitas Sumatera Utara.
- [4]Simamora, Kristianingsih. 2015. Desain Kendali Pid Pada Plant Debit Air Dengan Metode Ziegler-Nichols Dan Cohen-Coon Menggunakan Matlab Dan Arduino. Skripsi Teknik Elektronika Politeknik Negeri Bandung.
- [5]Wijaya, Mochammad Iqbal Try. 2015. Perancangan dan Realisasi Sistem Kendali Kontinu & Digital pada Plant Debit Air dengan Metode Ziegler Nichols & Coohen-Coon menggunakan Matlab dan Arduino. Skripsi Teknik Elektronika Politeknik Negeri Bandung.
- [6]Yulianta, Agung Dwi. 2015. Pengendalian Kecepatan Motor Brushless DC (BLDC) menggunakan Metode Logika Fuzzy. Jurnal Sains, Teknologi dan Industri, Vol. 12, No. 2.
- [7]Sari, Amalia Venita. 2016. Kontrol Kecepatan Motor DC Pada ESP Dengan Metode PID. Skripsi. Malang. Politeknik Negeri Malang.
- [8]Astrom, Karl J dan Hagglund T. 1995. PID Controller 2nd Edition: Theory, Design and Tuning. Instrument Society of America.
- [9]Al-Akbary, Putri Cepvie Muji. 2019. Rancang Bangun Sistem Kontrol Kecepatan Motor Pada Hybrid Electric Bike Dengan Menggunakan Metode PI. Skripsi Teknik Elektronika Politeknik Negeri Malang.
- [10]Tianur. Happiyanto, 2017. Kontrol Kecepatan Motor Induksi menggunakan Metode PID. Skripsi Politeknik Elektronika Negeri Surabaya.

