

ID: 42

Pengujian Akurasi Posisi Sudut Sistem Kemudi Kendaraan Otonom dengan *Unity Feedback System*

Experiments on Autonomous Vehicle Steering System with Unity Feedback System

**Muhammad Haniff^{1*}, Hendri Maja Saputra², Eki Ahmad Zaki Hamidi³, M Nurohman Firdaus⁴,
Saip Ardo Pratama⁵**

^{1,3,5}Jurusan Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Gunung Djati Bandung
Jl. A.H. Nasution No. 105A, Cibiru, Bandung, Indonesia

^{2,4}Pusat Riset Tenaga Listrik dan Mekatronik
Badan Riset dan Inovasi Nasional

Jl. Cisitno No. 21/154D Sangkuriang – Bandung 40135, Indonesia

1187070052@student.uinsgd.ac.id^{1*}, hendri.maja@gmail.com², ekiahmadzaki@uinsgd.ac.id³,
muhamadnurohmanf7@gmail.com⁴, 1187070075@student.uinsgd.ac.id⁵

Abstrak – Perkembangan kendaraan otonom sebagai solusi dari transportasi ramah lingkungan saat ini berkembang cukup cepat. Penelitian ini berfokus pada sistem kemudi loop tertutup dengan unity feedback system untuk kendaraan otonom roda tiga menggunakan Motor BLDC dan Absolute Rotary Encoder. Rotary encoder memberikan feedback perubahan sudut dari kemudi kendaraan otonom. Kendali kemudi yang diusulkan pada penelitian ini ialah dengan menentukan perubahan sudut yang diperlukan untuk kendaraan otonom. Perbandingan sudut yang diinginkan dengan feedback nilai sudut dari rotary encoder dilakukan agar didapatkan hasil yang akurat. Pada penelitian ini dilakukan pengujian dengan 3 variasi kecepatan rotasi putaran kemudi yakni 20 PWM, 50 PWM, dan 100 PWM. Variasi kecepatan diberikan terhadap sudut input berupa sudut lancip yang merepresentasikan belokan tajam (20° - 90° setiap 10°) dan sudut tumpul untuk belokan tidak tajam (120°, 180°, dan 270°). Berdasarkan percobaan, nilai error pada pengujian sudut lancip lebih besar dibandingkan dengan sudut tumpul. Kenaikan nilai error juga meningkat terhadap kenaikan kecepatan putaran rotasi kemudi.

Kata Kunci: Absolute rotary encoder, Kendali Sistem Kemudi, Motor BLDC, Kendaraan Otonom Roda Tiga, Pengaturan Posisi Sudut, Unity Feedback System

Abstract – The development of autonomous vehicles as a solution for environmentally friendly transportation is currently developing quite fast. This study focuses on closed loop steering system for three wheel autonomous vehicles with unity feedback system using BLDC Motor and Absolute Rotary Encoder. Rotary encoder as a transducer provides feedback of changing angle position of three wheel autonomous vehicle steering. Steering system that is proposed in this study is to determine the required angle change for the autonomous vehicle. Comparing the desired angle with actual feedback angle value from the rotary encoder that connected to a BLDC motor, so the precise steering angle value can be achieved. The experiments carried out in this research are run with 3 various steering speed rotation; 20 PWM, 50 PWM, and 100 PWM according to input angle; acute angle that represent sharp turn (20° - 90° every 10°) and obtuse angle that represent non-sharp turn (120°, 180°, and 270°). According to the experiment, sharp turn represent input has bigger error rate than non-sharp turn. Error rate is increasing according to steering rotation speed increment.

Keywords: Absolute Rotary Encoder, Angle positioning, BLDC Motor, Steering control, Three Wheel Autonomous Vehicle, Unity Feedback System.

1. Pendahuluan

Perkembangan penelitian kendaraan otonom dalam beberapa tahun terakhir cukup meningkat, khususnya penelitian yang berfokus pada strategi kontrol kemudi untuk mencapai kendali kendaraan yang stabil dan optimal [1]. Kendaraan otonom telah merubah akses transportasi pada berbagai kota di seluruh dunia. Pengembangan model dari kendaraan otonom menjadi topik penelitian yang cukup banyak dilakukan. Kendaraan telah menjadi sarana transportasi yang tidak terlepas dari kehidupan manusia. Sarana transportasi yang semula-nya dikendalikan oleh manusia, sekarang ini dapat menentukan arah kemudi secara otomatis yang. Peningkatan penelitian terkait kendaraan otonom dapat memberikan kemudahan dalam aspek transportasi bagi manusia, salah satu potensi dari kendaraan otonom yakni memberikan kemudahan mobilitas terhadap orang disabilitas dan lansia. Pada penelitian [2] telah dijelaskan implementasi dari kendaraan otonom perlu diperhatikan pengetahuan mengenai model dinamis kendaraan, sehingga dapat diketahui hubungan antara input yang diberikan seperti putaran kemudi kendaraan, kecepatan kendaraan, dan masih banyak lagi, terhadap output yang dihasilkan. Output yang diharapkan ialah bagaimana reaksi kendaraan terhadap input yang diberikan dapat berjalan dengan baik.

Kendaraan otonom roda tiga merupakan salah satu model yang cukup banyak dikembangkan dari topik penelitian kendaraan otonom. Kendaraan roda tiga banyak dimanfaatkan untuk transportasi umum dan juga transportasi intra-bangunan seperti antar terminal di bandar udara dan masih banyak lagi. Keunggulan kendaraan roda tiga seperti desain yang aerodinamis, kendaraan otonom roda tiga sangat efektif untuk transportasi masa depan [3]. Strategi sistem kemudi pada kendaraan otonom bergantung pada model dinamis dari mekanik rangka kendaraan. Kendali kemudi dari kendaraan roda tiga yang umum menggunakan model *front steering* atau kemudi dengan roda didepan. Kontrol dan kestabilan merupakan tantangan yang paling besar dalam pengembangan kendaraan roda tiga. Pada penelitian [4] dan beberapa referensi lainnya telah memberikan penelitian dari kestabilan kendaraan roda tiga.

Penentuan arah kendaraan otonom umumnya dilakukan dengan memanfaatkan sensor yang memberikan informasi keadaan sekitar seperti, kamera, sensor ultrasonik, *IR Obstacle*, dan sensor lainnya yang akan memberikan informasi terhadap jalur kendaraan. Penelitian dan pengembangan kendaraan otonom terus meningkat. GPS (*Global Positioning System*) juga sudah banyak diimplementasikan dalam kendaraan otonom sebagai peningkatan akurasi kemudi kendaraan. Sensor akan memberikan informasi jalur yang akan dilalui kendaraan, seperti menunjukkan terdapat halangan pada jalur, sehingga arah kendaraan akan berubah sesuai pembacaan sensor dengan mengatur kecepatan rotasi roda kiri dan kanan. Apabila pembacaan sensor telah menunjukkan tidak adanya halangan, maka kendaraan akan bergerak lurus [4, 5].

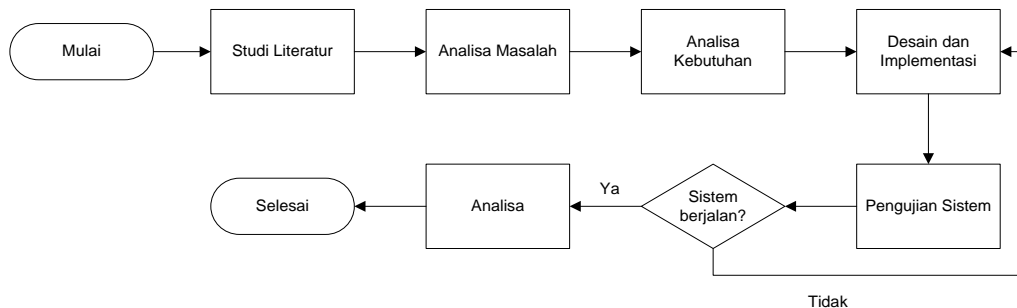
Kemudi kendaraan otonom biasanya mengalami error pada arah kemudinya, sehingga perlu diperhatikan juga strategi untuk pemrosesan arah kemudi yang baik. *Absolute rotary encoder* merupakan transduser yang memberikan nilai pembacaan rotasi seperti posisi putaran dan perubahan kecepatan putaran. Sensor ini banyak dimanfaatkan pada pengembangan kendaraan otonom [7]. Implementasi *rotary encoder* ke motor BLDC dapat dimanfaatkan untuk mendapatkan nilai perubahan posisi sudut dari putaran motor, sehingga pengaturan arah pada motor BLDC dapat diterapkan. Informasi perubahan posisi kemudi dari *rotary encoder* dapat dikendalikan dengan memanfaatkan mikrokontroler, sehingga dapat dihasilkan putaran kemudi dengan sudut yang akurat [8]. Implementasi *rotary encoder* pada motor BLDC dapat dijadikan sebagai sistem kemudi untuk kendaraan otonom. Pembacaan *rotary encoder* dapat langsung dibandingkan dengan arah kemudi yang diinginkan. Pada artikel [9] dijelaskan *unity feedback system* merupakan sistem kendali yang melakukan proses *feedback* secara langsung tanpa adanya pengolahan terlebih dahulu. Sistem kendali ini memiliki *gain feedback* sama dengan 1, sehingga pengecekan eror dapat dilakukan dengan menentukan selisih antara input dan output.

Penelitian ini berfokus untuk melakukan uji coba dari sistem kemudi. Pengujian ditujukan untuk sistem kemudi kendaraan roda tiga model delta dengan *front steering*. Motor BLDC sebagai

penggerak putaran kemudi terhubung dengan *rotary encoder* yang memberikan nilai posisi sudut sebagai *feedback*. Sistem kemudi yang diujikan langsung membandingkan *feedback* output dengan input posisi putaran yang diinginkan. Berdasarkan pengembangan sistem kendali putaran sudut motor dengan *feedback* dari *rotary encoder*, maka sistem kemudi kendaraan otonom roda tiga yang akurat dapat diterapkan.

2. Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan metode eksperimen, yang disusun dalam diagram alir penelitian seperti pada Gambar 1 dibawah ini:



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 1, penelitian ini dimulai dengan mencari dan memperdalam studi literatur terkait kendaraan otonom seperti, dinamis kendaraan roda tiga, pengaturan posisi motor, dan beberapa literatur terkait yang dijadikan sebagai referensi. Berdasarkan beberapa referensi yang ditemukan, selanjutnya ditentukan masalah yang dapat dikembangkan serta kebutuhan proses penelitian. Sebelum dilakukan pengujian sistem dan analisa, telah disusun implementasi rangkaian mekanik dan elektrik yang dibutuhkan untuk pengujian sistem kemudi pada kendaraan otonom dengan *unity feedback system*, yang akan dibahas pada pembahasan selanjutnya

3. Perancangan Sistem

Berdasarkan referensi yang ditemukan terkait sistem kemudi pada kendaraan otonom, pengujian sistem kemudi yang dilakukan menggunakan rancangan sistem kemudi untuk kendaraan roda tiga model delta dengan satu roda didepan sebagai kemudi. Sebelum dilakukan pengujian, telah dirancang mekanik dan elektrik dari sistem kemudi yang akan dilakukan uji coba.

3.1. Desain Sistem Kemudi

Kendaraan roda tiga merupakan salah satu model kendaraan yang cukup populer, pengembangan dari kendaraan roda tiga terfokus pada keunggulan yang dimiliki seperti ukuran kendaraan yang tidak terlalu besar dengan tingkat keamanan dan kenyamanan yang lebih baik. Terdapat dua rancangan umum dari kendaraan roda tiga yakni model delta dan model tadpole yang memiliki keunggulan-nya masing-masing [10]. Model delta merupakan model kendaraan roda tiga dengan satu roda depan dan dua roda belakang. Model tadpole merupakan model kendaraan roda tiga dengan dua roda didepan dan satu roda dibelakang.

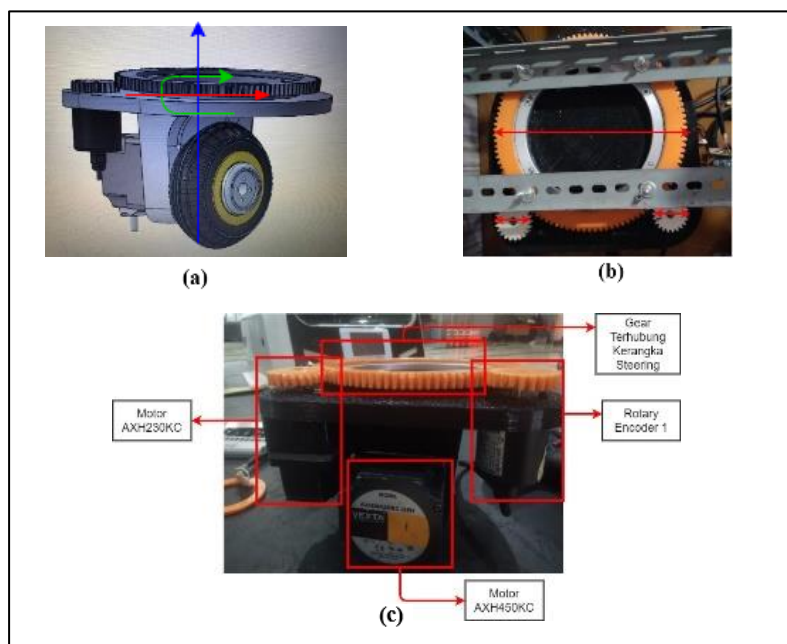
Keunggulan model kendaraan roda tiga dilihat dari segi stabilitas dan dinamis desain kendaraan, model tadpole memiliki keunggulan distribusi beban yang lebih baik selain itu desain model tadpole juga memiliki keunggulan dari segi aerodinamis. Tetapi model tadpole memiliki desain kontrol kemudi yang cukup rumit, dengan dua roda didepan sebagai kontrol kemudi, maka strategi kontrol seperti kemudi diferensial digunakan untuk kemudi kendaraan dan merubah arah

kendaraan [11]. Desain kendaraan roda tiga model delta dengan satu roda didepan sebagai kemudi, sistem kemudi model delta tentu-nya lebih mudah dilakukan, yakni hanya mengatur putaran kemudi dari satu roda didepan dengan memperhatikan model dinamis dan titik berat rangka kendaraan [12]. Masalah yang cukup rumit dalam penelitian kendaraan otonom adalah perencanaan dan modelling sistem kemudi yang dipengaruhi noise dan banyak ketidakpastian [13]. Penelitian sistem kemudi yang diajukan pada paper ini menggunakan model delta dari kendaraan roda tiga dengan satu roda didepan sebagai kemudi.

3.2. Mekanik Sistem Kemudi

Sistem kemudi merupakan proyek elektromekanika. Desain rangka mekanis untuk mensimulasikan cara kerja sistem yang diajukan sesuai pada Gambar 2. Rangka kemudi nantinya akan ditempatkan sebagai satu roda depan dari kendaraan otonom roda tiga. Desain yang diajukan menggunakan motor BLDC keluaran oriental motor AXH230KC dengan driver AXHD30K sebagai penggerak rangka yang akan merubah arah kemudi. Motor penggerak kemudi juga terhubung dengan *absolute rotary encoder* yang akan memberikan *feedback* nilai posisi rangka kemudi. Rancangan desain juga menggunakan BLDC AXH450KC sebagai penggerak satu roda kemudi.

Berdasarkan Gambar 2 dibawah ini, motor BLDC penggerak kemudi terhubung dengan gear penggerak kerangka kemudi yang digunakan sebagai penggerak putaran. Motor akan menggerakkan kemudi dengan pergerakan sesuai garis hijau pada Gambar 1(a). Pergerakan akan dibaca oleh *rotary encoder* yang juga terhubung dengan gear penggerak kerangka kemudi. *Rotary encoder* akan mengirimkan sinyal yang merepresentasikan posisi putaran kemudi. Gambar 1(b) menunjukkan perbandingan rasio gear pada kerangka kemudi. Gear penggerak kerangka kemudi memiliki diameter 20 cm dan gear kecil yang terhubung pada motor dan *rotary encoder* memiliki diameter 4 cm. Sehingga perbandingan rasio gear desain kerangka satu roda kemudi memiliki perbandingan 5 : 1. Berdasarkan rasio gear mekanik kemudi, 1 putaran rangka kemudi sama dengan 5 putaran *rotary encoder*. Perhitungan gear yang menghubungkan *rotary encoder* dengan rangka kemudi 5:1 akan dimanfaatkan pada program pengaturan posisi kemudi, sehingga nilai sudut posisi rangka kemudi (0° - 360°) sesuai dengan pembacaan dari *rotary encoder*.



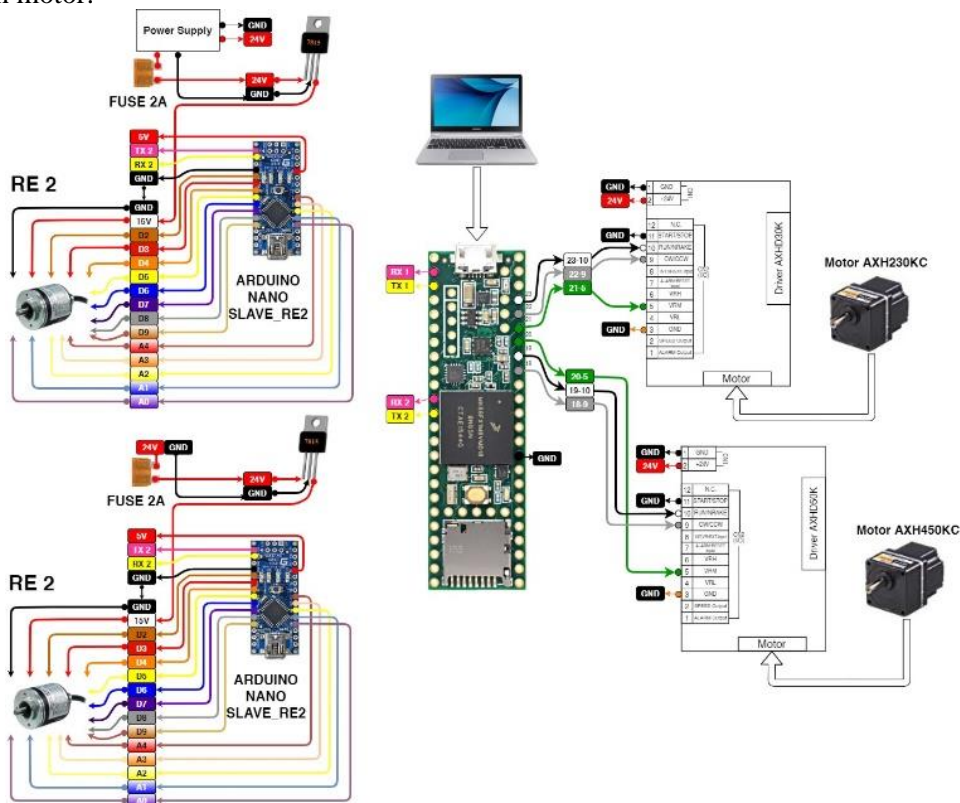
Gambar 2. Desain Mekanik Rangka Kemudi

3.3. Elektrik Sistem Kemudi

Perancangan sistem kemudi untuk kendaraan otonom roda tiga pada penelitian ini menggunakan mikrokontroler *teensy 3.6* sebagai master untuk mengendalikan putaran motor kemudi. Mikrokontroler master juga mendapatkan input berupa pembacaan nilai dari *absolute rotary encoder* melalui komunikasi serial. Pembacaan posisi dari *rotary encoder* dilakukan dengan mikrokontroler Arduino nano. Motor BLDC akan mengendalikan arah putaran dan posisi rangka kemudi, ketika motor berputar maka kerangka kemudi akan berputar sesuai putaran motor. *Absolute rotary encoder* yang digunakan merupakan keluaran EP50S8-1024-1R-N-24 untuk memberikan nilai putaran sudut. *Rotary encoder* ini memberikan nilai dalam kode BCD 13 bit yang dibaca Arduino nano. Untuk mendapatkan nilai posisi sudut, pada mikrokontroler Arduino nano dilakukan konversi kode BCD menjadi nilai sudut desimal yang dilakukan sesuai dengan Persamaan (1).

$$\theta^\circ = \frac{BCD\ Code}{1023} \times 360 \tag{1}$$

Nilai output pembacaan dari *rotary encoder* yang memberikan pembacaan BCD 13 bit dirubah kedalam nilai desimal, dengan total nilai 2^{13} atau 1024 dalam rentang 0 – 1023. Kemudian nilai desimal dikonversikan menjadi nilai sudut dengan Persamaan (1). Hasil perhitungan sudut *rotary encoder* pada mikrokontroler Arduino nano (0° - 360°) akan dikirimkan ke mikrokontroler master dari sistem kemudi melalui komunikasi serial. Nilai posisi sudut dari *rotary encoder* dijadikan sudut pembanding antara sudut yang diinginkan dan sudut nyata dari putaran motor.



Gambar 3. Rangkaian Elektrik Sistem Kemudi.

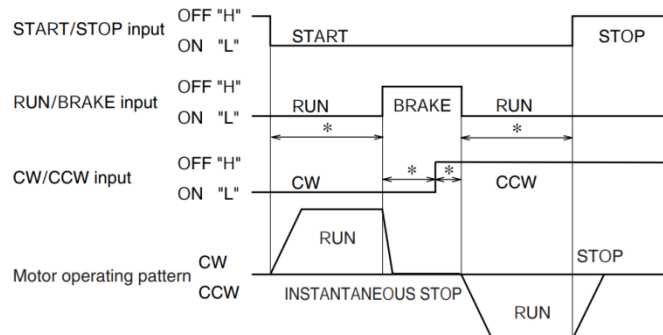
Sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 3, Mikrokontroler master dari desain yang diajukan mendapatkan input dari komputer melalui serial USB. Rangkaian mikrokontroler Arduino nano juga digunakan untuk membaca putaran kemudi, dimana Arduino nano memberikan *feedback* berupa nilai sudut 0-360°. 15 pin *absolute rotary encoder* terhubung ke

Arduino nano yang melakukan komunikasi serial ke mikrokontroler master. Driver Motor memiliki 12 pin kendali tetapi pada penelitian ini hanya digunakan 6 pin yang sesuai dengan Tabel 1. Motor driver akan bekerja dengan tegangan supply 24 V dan *absolute rotary encoder* bekerja pada tegangan 24V. Motor driver dan *rotary encoder* dihubungkan dengan power supply 24 VDC. Pada motor driver kecepatan motor dapat diatur dengan beberapa metode, pada penelitian ini diatur dengan menggunakan PWM yang dimiliki pin digital dari mikrokontroler yang digunakan. Pin PWM Mikrokontroler terhubung ke pin VRM driver motor dengan fungsi sesuai pada tabel 1, dimana sesuai dengan fungsi yang tertera pin START/STOP, VRL, dan GND dihubungkan ke ground pada mikrokontroler.

Tabel 1. Penggunaan kabel motor driver dan fungsinya

Kabel	Warna Kabel	Fungsi
START/STOP	Hitam	Motor akan start Ketika input = 0 Motor akan stop Ketika input = 1
RUN/BREAK	Putih	Motor akan run Ketika input = 0 Motor akan break Ketika input = 1
CW/CCW	Abu-abu	Putaran CW Ketika input = 0 Putaran CCW Ketika input = 1
VRM	Hijau	Mengatur kecepatan motor (+)
VRL	Kuning	Mengatur kecepatan motor (-)
GND	Orange	Ground

Kinerja penggerakan kemudi dengan motor BLDC dan driver motor yang digunakan sesuai konfigurasi pada datasheet. Mikrokontroler digunakan untuk mengirimkan kondisi sinyal operasi motor. Pin snyal driver motor memiliki konfigurasi keadaan *Normally HIGH*, dimana dalam keadaan normal memiliki logika “*HIGH*”.



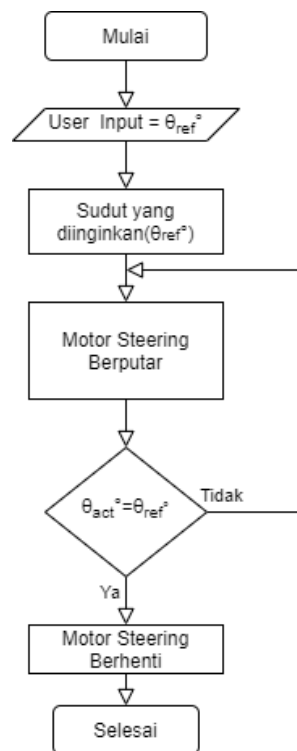
Gambar 4. Grafik sinyal I/O driver motor AXHD30K.

Berdasarkan grafik logika sinyal operasi motor sesuai Gambar 4, pin 11 (*START/STOP*) pada driver motor dengan kabel hitam dihubungkan dengan pin ground pada mikrokontroler sehingga memberikan logika *LOW* atau kondisi “*START*”. Kemudian pin 10 (*RUN/BRAKE*) dengan kabel putih dihubungkan ke pin digital pada mikrokontroler yang memberikan sinyal kendali, ketika motor akan dijalankan maka mikrokontroler akan memberikan logika *LOW*, sebaliknya ketika motor akan dihentikan maka mikrokontroler akan memberikan logika *HIGH*. Pin 9 (*CW/CCW*) digunakan untuk mengatur arah rotasi motor, perubahan arah motor untuk berputar searah jarum jam (*clockwise (CW)*) akan diberikan logika *LOW*, sebaliknya untuk membuat motor berputar berlawanan arah jarum jam (*counter-clockwise (CCW)*), maka mikrokontroler akan memberikan logika *HIGH* [14]. Kinerja pengaturan kecepatan motor dapat dilakukan dengan menggunakan tegangan DC eksternal 0-5V yang diberikan pada pin 5 (*VRM*) dengan kabel hijau, pin 5 terhubung dengan pin PWM mikrokontroler yang dapat memberikan tegangan 0-5V DC.

3.4. Algoritma Sistem Kemudi

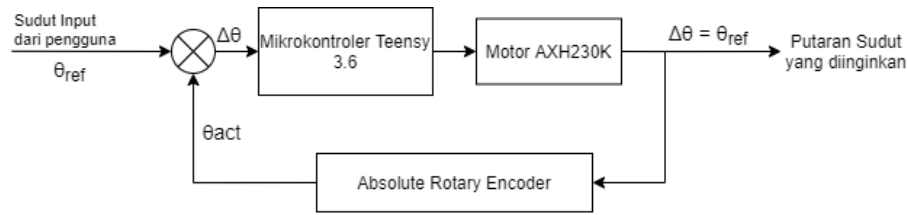
Sistem kemudi untuk kendaraan otonom yang diajukan dikendalikan dengan menggunakan putaran sudut dari motor penggerak kemudi. Pada penelitian ini simulasi dijalankan dengan menjadikan sudut yang diinginkan sebagai input dari sistem. Sudut yang diinginkan merupakan input dari pengguna. Dalam pengaturan arah putaran motor *clockwise* ataupun *counterclockwise*, sudut input diberikan kode tertentu. Pada putaran sudut arah *counterclockwise*, sudut input yang diberikan ditambah angka 1. Sebagai contoh apabila ingin melakukan putaran 90° arah *counterclockwise* maka diberikan sudut input 91, sedangkan apabila diinginkan putaran 90° arah *clockwise*, maka cukup berikan 90 sebagai input dari sistem.

Ketika sistem mendapatkan input maka motor penggerak kemudi akan berputar, putaran sudut dari motor akan dibaca oleh *rotary encoder*. Apabila sudut putaran motor tidak sama dengan sudut input sebagai sudut yang diinginkan, maka motor akan terus berputar sehingga tercapai sudut yang diinginkan. Diagram flowchart sistem kemudi ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Algoritma Putaran Sudut Kemudi.

Prinsip kerja kemudi yang diajukan sesuai dengan diagram alur pada Gambar 5. Motor penggerak kemudi akan berputar ketika diberi input oleh pengguna berupa nilai sudut yang diinginkan (θ_{ref}). Putaran motor yang terhubung dengan *rotary encoder* akan memberikan nilai posisi sudut yang sebenarnya (θ_{act}) dari rangka kemudi. Apabila sudut yang diinginkan telah tercapai atau ketika $\theta_{ref} = \theta_{act}$, maka motor penggerak putaran kemudi akan berhenti. Akan tetapi ketika sudut yang diinginkan belum tercapai maka motor penggerak kemudi akan terus berputar hingga sudut yang diinginkan tercapai.



Gambar 6. Blok Diagram Sistem Kemudi.

Strategi kemudi satu roda depan yang diajukan pada penelitian ini merupakan sistem loop tertutup dengan *unity feedback system* sesuai blok diagram yang ditunjukkan pada Gambar 6. BLDC motor digunakan sebagai penggerak posisi kemudi dan *rotary encoder* akan memberikan *feedback* nilai posisi dari putaran kemudi yang sebenarnya tanpa dilakukan perhitungan *gain* dari *feedback* sistem loop tertutup (*feedback gain* = 1). Perhitungan nilai rata-rata kesalahan sistem kendali loop tertutup dengan *unity feedback system* sesuai dengan Persamaan (2), dimana R(s) merupakan input atau sudut referensi dan C(s) merupakan variabel output sistem [9]. Berdasarkan pemrosesan nilai *feedback* sudut dari *rotary encoder* dengan nilai input sudut yang diinginkan oleh pengguna, maka sudut posisi putaran kemudi yang sebenarnya dapat tercapai.

$$E(s) = R(s) - C(s) \tag{2}$$

Rancangan yang diusulkan pada penelitian ini akan menjadikan sudut akhir dari putaran motor menjadi sudut awal, sehingga apabila diberikan sudut input 90° maka motor akan berputar sampai mencapai sudut 90° dari sudut sebelumnya. Apabila sebelumnya telah dilakukan putaran sudut 10° dari titik 0, kemudian diberikan input putaran kembali sejauh 80°, maka putaran sudut motor akan berada pada titik 90° dari titik 0.

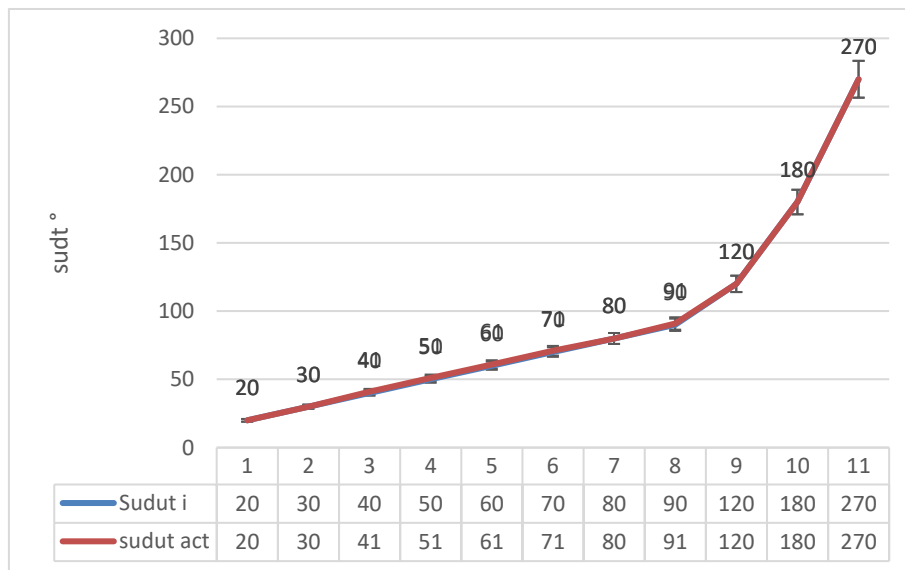
4. Hasil dan Pembahasan

Pengujian sistem kemudi kendaraan otonom roda tiga dilakukan dengan memberikan input nilai sudut. Input yang diberikan berupa sudut lancip yang merepresentasikan belokan tajam dan sudut tumpul yang merepresentasikan belokan tidak tajam. Sudut representasi belokan tajam diantaranya; 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80°, dan 90°. Sudut yang merepresentasikan belokan tidak tajam diantaranya; 120°, 180°, dan 270°. Pengujian juga dilakukan dengan memberikan nilai kecepatan putaran kemudi dalam nilai PWM mikrokontroler sebanyak 3 variasi kecepatan berbeda diantaranya, 20 PWM sebagai kecepatan lambat, 50 PWM sebagai kecepatan sedang, dan 100 PWM sebagai kecepatan tinggi. Hasil pengujian kecepatan dengan variasi sudut dan kecepatan ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil percobaan putaran prototipe kemudi.

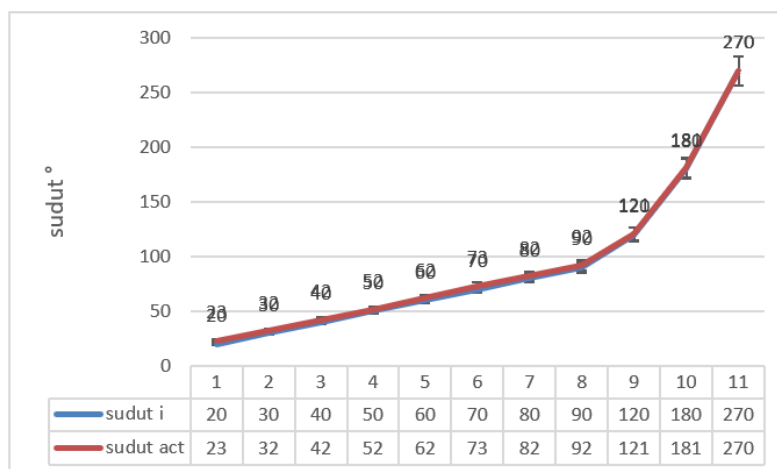
PWM = 20		PWM = 50		PWM = 100	
Sudut input (θ_{ref}°)	Sudut aktual (θ_{act}°)	Sudut input (θ_{ref}°)	Sudut aktual (θ_{act}°)	Sudut input (θ_{ref}°)	Sudut aktual (θ_{act}°)
20	20	20	23	20	27
30	30	30	32	30	36
40	41	40	42	40	46
50	51	50	52	50	56
60	61	60	62	60	64
70	71	70	73	70	74
80	80	80	82	80	85
90	91	90	92	90	94
120	120	120	121	120	123
180	180	180	181	180	183
270	270	270	270	270	272
<i>error rate = 0.45%</i>		<i>error rate = 1.81%</i>		<i>error rate = 4.54%</i>	

Berdasarkan data pada Tabel 2, didapati bahwa nilai rata-rata error pada nilai kecepatan rotasi kemudi 20 PWM sebesar 0.45%, pada kecepatan rotasi kemudi 50 PWM sebesar 1.81%, dan pada kecepatan 100 PWM didapati nilai rata-rata error sebesar 4.54%. Data hasil percobaan menunjukkan semakin besar nilai kecepatan putaran motor kemudi yang diberikan maka nilai rata-rata error juga semakin besar, sudut posisi hasil putaran kemudi memiliki selisih yang semakin besar dengan posisi sudut input yang diinginkan. Begitu juga dengan ketajaman sudut yang diberikan, semakin tajam belokan yang ingin dicapai yakni semakin kecil sudut input yang diberikan maka selisih nilai posisi sudut putaran yang sebenarnya dengan posisi sudut putaran yang diinginkan akan semakin besar. Perbedaan nilai antara sudut yang sebenarnya dengan sudut yang diinginkan dengan tiga variasi kecepatan yang diberikan dapat dilihat pada grafik pada Gambar 7, 8, dan 9.



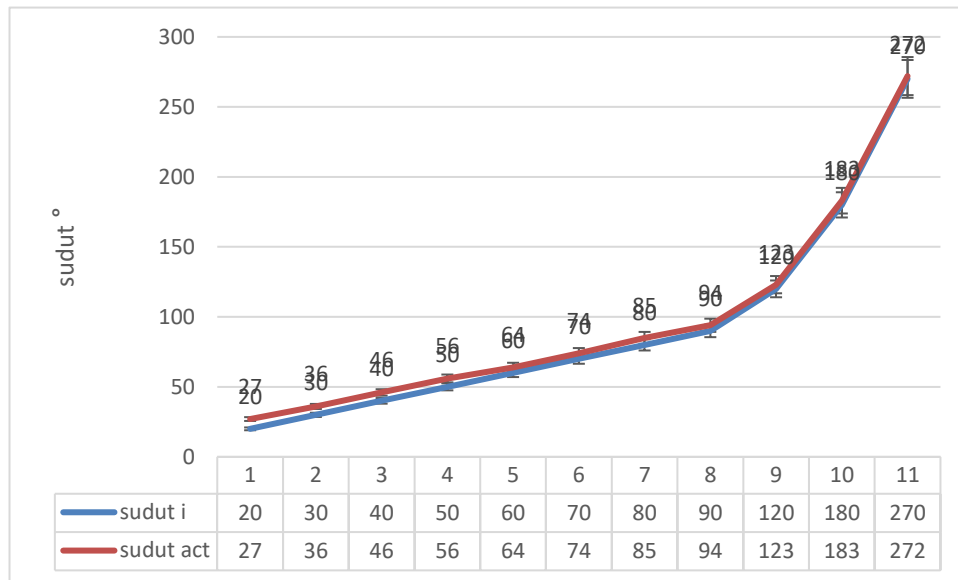
Gambar 7. Grafik perbandingan sudut yang diinginkan dengan sudut sebenarnya (PWM 20).

Berdasarkan grafik pada Gambar 7, percobaan pengaturan posisi sudut kemudi dengan kecepatan 20 PWM. Pada belokan tajam dengan sudut input 40°, 50°, 60°, 70°, dan 90°, menunjukkan hasil putaran posisi sudut kemudi yang sebenarnya selisih 1° dengan sudut yang diinginkan. Pada kecepatan ini nilai rata-rata error sebesar 0.45 %.



Gambar 8. Grafik perbandingan sudut yang diinginkan dengan sudut sebenarnya (PWM 50).

Sebagaimana grafik yang ditunjukkan pada Gambar 8 yang menunjukkan grafik perbandingan percobaan sudut input dengan sudut yang diinginkan pada kecepatan sedang (50 PWM). Pada belokan tajam dengan input sudut lancip, menunjukkan selisih hasil putaran rotasi kemudi sebenarnya dengan sudut yang diberikan lebih besar dibandingkan pada input sudut tumpul. Pada input sudut 20° memiliki selisih sudut 3°, dan pada sudut tumpul 120° dan 180° memiliki selisih 1°, sehingga didapati nilai rata-rata error sebesar 1.81%.



Gambar 9. Grafik perbandingan sudut yang diinginkan dengan sudut sebenarnya (PWM 100)

Berdasarkan Gambar 9, yang menunjukkan grafik perbandingan sudut input dengan sudut sebenarnya pada kecepatan PWM 100. Nilai selisih sudut antara sudut posisi hasil putaran kemudi dengan putaran sudut yang diinginkan lebih besar pada sudut lancip, pada sudut 20° memiliki selisih sebesar 7°, dan pada sudut 30° hingga 50°, memiliki selisih sebesar 4°. Selisih nilai sudut semakin kecil apabila sudut yang diberikan semakin besar dengan nilai rata-rata error untuk putaran kemudi sebesar 4,54 %. Berdasarkan grafik sesuai Gambar 7, 8, dan 9 dapat dilihat bahwa nilai selisih perbedaan antara sudut yang sesungguhnya dengan sudut yang diinginkan semakin berbeda ketika nilai kecepatan putaran motor semakin besar dan sudut yang diinginkan semakin tajam atau kecil. Pada kecepatan rendah (20 PWM), kecepatan sedang (50 PWM), dan kecepatan tinggi (100 PWM) masing masing memiliki nilai rata-rata error sebesar 0.45 %, 1.81%, dan 4,54 %. Sesuai pada [15], telah dijelaskan dalam perhitungan nilai *error rate*, dapat diambil nilai maksimum *error rate* sebesar 0.05 atau 5%, maka percobaan pengujian awal sistem kemudi kendaraan otonom roda tiga loop tertutup dengan *unity feedback system* dapat diterima. Akan tetapi pengembangan dari sistem kemudi yang diajukan perlu ditinjau lagi dengan berbagai aspek kendaraan otonom yang harus diperhatikan, penelitian yang akan dilakukan selanjutnya akan membahas lebih dalam rancangan sistem kemudi untuk kendaraan otonom roda tiga dengan memberikan hasil yang lebih stabil sehingga dapat diterapkan menjadi sarana transportasi.

5. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian sistem kemudi kendaraan otonom loop tertutup dengan *unity feedback system* yang diajukan sebagai desain awal untuk kemudi kendaraan otonom tiga dapat disimpulkan bahwa kendaraan roda tiga model delta, dengan satu roda didepan sebagai kemudi,

memiliki mekanisme sistem kemudi yang lebih mudah dibandingkan dengan model tadpole. Kemudi kendaraan roda tiga model delta dilakukan dengan mengatur putaran satu roda didepan sesuai dengan arah yang diinginkan. Rancangan kemudi yang dibuat dengan motor BLDC sebagai penggerak kemudi terhubung dengan *rotary encoder* yang memberikan nilai posisi putaran yang sebenarnya sebagai *feedback* kedalam sistem kemudi. Dengan menggunakan mikrokontroler posisi kemudi dapat diatur dengan memberikan nilai sudut sebagai input mikrokontroler. *Feedback* dari *rotary encoder* memperbesar nilai akurasi dari posisi sudut yang sebenarnya dengan posisi sudut yang diinginkan. Rancangan kemudi kendaraan roda tiga yang diajukan masih memiliki kekurangan, dimana nilai sudut yang sebenarnya memiliki rata-rata error 0,5 – 5% dari nilai yang diinginkan seiring dengan semakin cepatnya putaran kemudi yang diberikan dan ketajaman sudut yang ingin dicapai.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih disampaikan kepada pihak Pusat Riset Tenaga Listrik dan Mekatronik BRIN (Badan Riset dan Inovasi Nasional) yang telah memberikan tempat dan bahan untuk melakukan penelitian ini.

Referensi

- [1] Se-Young Oh and Younguk Yim, "Modeling of vehicle dynamics from real vehicle measurements using a neural network with two-stage hybrid learning for accurate long-term prediction," pp. 83–88, Jan. 2003, doi: 10.1109/CIRA.1999.809951.
- [2] A. Pandey, S. Jha, and D. Chakravarty, "Modeling and control of an autonomous three wheeled mobile robot with front steer," *Proceedings - 2017 1st IEEE International Conference on Robotic Computing, IRC 2017*, pp. 136–142, May 2017, doi: 10.1109/IRC.2017.67.
- [3] Tyler C. Folsom, "Self-driving Tricycles," *International Symposium on Bicycle Urbanism*, Jan. 16, 2013.
https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=HG0jqo0AAAJ&citation_for_view=HG0jqo0AAAJ:Se3iqnhoufwC (accessed Oct. 27, 2021).
- [4] J. Sindha, B. Chakraborty, and D. Chakravarty, "Rigid body modeling of three wheel vehicle to determine the dynamic stability-A practical approach," *2015 IEEE International Transportation Electrification Conference, ITEC-India 2015*, Jan. 2016, doi: 10.1109/ITEC-INDIA.2015.7386889.
- [5] L. Kamelia, E. A. D. Hamidi, W. Darmalaksana, and A. Nugraha, "Real-Time Online Attendance System Based on Fingerprint and GPS in the Smartphone," *Proceeding of 2018 4th International Conference on Wireless and Telematics, ICWT 2018*, Nov. 2018, doi: 10.1109/ICWT.2018.8527837.
- [6] A. Pandey *et al.*, "Low cost autonomous navigation and control of a mechanically balanced bicycle with dual locomotion mode," *2015 IEEE International Transportation Electrification Conference, ITEC-India 2015*, Jan. 2016, doi: 10.1109/ITEC-INDIA.2015.7386938.
- [7] T. F. Wang, Y. J. Yan, H. C. Chiang, T. L. Chen, and M. Ou-Yang, "Coding optimization for the absolute optical rotary encoder," *2018 International Automatic Control Conference, CACS 2018*, Jan. 2019, doi: 10.1109/CACS.2018.8606741.
- [8] Hendri Maja Saputra and LastName; Agam Setiawan, "EKSPERIMEN KENDALI POSISI SUDUT DAN KECEPATAN MOTOR DC BRUSHLESS AXH230KC-100 UNTUK MANIPULATOR ROBOT," *Seminar Nasional Rekayasa Energi, Mekatronik, dan Teknik Kendaraan*, pp. 181–188, Sep. 2013, Accessed: Oct. 27, 2021. [Online]. Available:
https://www.researchgate.net/publication/277668847_Experiment_for_Position_and_Speed_Control_of_AXH230KC-100_Brushless_DC_Motor_for_Robot_Manipulator

- [9] P. Bajpai, "Process Control," *Biermann's Handbook of Pulp and Paper*, pp. 483–492, 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-814238-7.00024-6.
- [10] H. Thomas, "Jetrike.Com - Tadpole or Delta?," 2007. <http://www.jetrike.com/tadpole-or-delta.html> (accessed Oct. 27, 2021).
- [11] M. Yildirim and H. Kurum, "Electronic Differential System for an Electric Vehicle with Four In-wheel PMSM," *IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 2020-May, May 2020, doi: 10.1109/VTC2020-SPRING48590.2020.9129139.
- [12] A. Ranpariya, A. Thattil, S. Vachhani, D. Raval, P. Sharma, and U. G. Students, "Design of the Tadpole Type Three-Wheel Vehicle with Dynamic Conditions," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 9001, 2008, Accessed: Oct. 29, 2021. [Online]. Available: www.irjet.net
- [13] R. M. Murray, "Optimization-Based Control".
- [14] "Brushless DC motor and Driver AXH Series OPERATING MANUAL." <https://www.orientalmotor.com/products/pdfs/opmanuals/HM-5126E.pdf> (accessed Oct. 29, 2021).
- [15] R. J. Freund, W. J. Wilson, and D. L. Mohr, "Inferences for Two or More Means," *Statistical Methods*, pp. 245–320, 2010, doi: 10.1016/B978-0-12-374970-3.00006-8.