

Rancang Bangun Purwarupa Sistem Kendali Kecepatan Motor Dc Pada Speedboat Tenaga Surya

Julsen Kadri¹, Rusman², Wendhi Yuniarto³

^{1,2}Elektro, Teknologi Rekayasa Sistem Elektronika, Politeknik Negeri Pontianak
Jl. Jend. Ahmad Yani, Bansir Laut, Pontianak, (0816)736180
<https://polnep.ac.id>

¹ jkd8426@gmail.com, ² rusman.dn@gmail.com, ³ tepelongkeng@gmail.com

ABSTRACT

This study aims to design and test a 12 V DC motor speed control system for a solar-powered speedboat prototype using the Pulse Width Modulation (PWM) method. The system is controlled by an Arduino Uno with a full-bridge motor driver. Speed regulation is performed by varying the PWM duty cycle using two control methods: analog control with a potentiometer and digital control via Bluetooth communication. The system is also equipped with an ACS712 current sensor and a voltage divider circuit for overcurrent and overvoltage protection. Experimental results show that increasing the PWM duty cycle from 10% to 80% raises the motor voltage from 1.2 V to 10.2 V and the speed from 761.6 RPM to 7,664.4 RPM. The protection system is activated when the current exceeds 10 A.

Keywords: DC motor, PWM, Arduino Uno, speed control

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji sistem kendali kecepatan motor DC 12 V pada purwarupa speedboat tenaga surya menggunakan metode Pulse Width Modulation (PWM). Sistem dikendalikan oleh Arduino Uno dengan motor driver full-bridge. Pengaturan kecepatan dilakukan melalui variasi duty cycle PWM dengan dua metode, yaitu kontrol analog menggunakan potensiometer dan kontrol digital melalui Bluetooth. Sistem juga dilengkapi sensor arus ACS712 dan pembagi tegangan sebagai proteksi overcurrent dan overvoltage. Hasil pengujian menunjukkan peningkatan duty cycle PWM dari 10% hingga 80% meningkatkan tegangan motor dari 1,2 V menjadi 10,2 V dan kecepatan dari 761,6 RPM menjadi 7.664,4 RPM. Sistem proteksi aktif saat arus melebihi 10 A.

Kata kunci: motor DC, PWM, Arduino Uno, kendali kecepatan

1. PENDAHULUAN

Penggunaan speedboat sebagai sarana transportasi di wilayah pesisir Indonesia masih didominasi oleh mesin berbahan bakar fosil. Penggunaan bahan bakar tersebut menimbulkan berbagai permasalahan seperti tingginya biaya operasional, keterbatasan distribusi bahan bakar di daerah terpencil, serta dampak emisi gas buang terhadap lingkungan (Firmansyah & Susanto, 2023). Selain itu, ketergantungan terhadap bahan bakar fosil juga meningkatkan risiko fluktuasi biaya operasional akibat perubahan harga energi (Lestari dkk., 2020). Oleh karena itu diperlukan alternatif sistem propulsi yang lebih efisien dan ramah lingkungan

untuk mendukung transportasi perairan yang berkelanjutan.

Salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah pemanfaatan energi terbarukan, khususnya energi surya, sebagai suplay daya pada sistem propulsi speedboat. Sistem ini memanfaatkan panel surya sebagai sumber tegangan yang disimpan pada baterai untuk menggerakkan motor listrik sebagai penggerak utama kapal (Widodo & Sihombing, 2023). Penelitian yang dilakukan oleh Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN, 2021), mencatat bahwa Pemanfaatan motor listrik pada sistem propulsi kapal memiliki beberapa keunggulan, antara lain efisiensi energi yang lebih tinggi, tingkat kebisingan yang lebih rendah, serta emisi yang

lebih kecil dibandingkan mesin berbahan bakar fosil.

Namun demikian, penggunaan motor DC sebagai penggerak memerlukan sistem kendali kecepatan yang tepat agar konsumsi energi dapat dioptimalkan. Tanpa sistem kendali yang baik, motor DC cenderung beroperasi pada kecepatan maksimum sehingga energi yang digunakan menjadi tidak efisien. Salah satu metode yang umum digunakan sebagai pengendali kecepatan motor DC adalah Pulse Width Modulation (PWM), dengan cara kerja mengatur tegangan rata-rata motor melalui variasi *duty cycle* sinyal PWM (Rashid, 2014).

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa metode PWM mampu mengatur kecepatan motor DC secara efektif serta meningkatkan efisiensi penggunaan energi pada sistem kendali berbasis mikrokontroler (Prasetyo dkk., 2022). Implementasi sistem kendali berbasis Arduino juga memberikan fleksibilitas dalam pengaturan kecepatan motor serta memudahkan integrasi dengan berbagai sensor dan perangkat komunikasi seperti Bluetooth (Hidayat dkk., 2021).

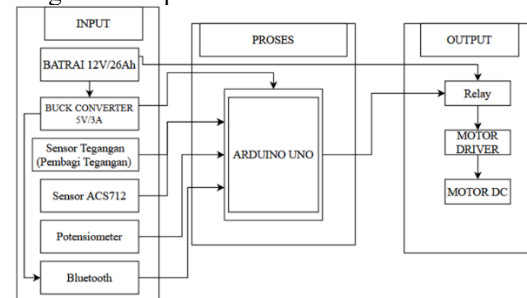
Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya menerapkan pengendalian kecepatan motor DC menggunakan metode PWM berbasis mikrokontroler, penelitian ini mengintegrasikan dua mode kendali dalam satu sistem, yaitu kendali analog menggunakan potensiometer dan kendali digital melalui komunikasi Bluetooth pada purwarupa speedboat tenaga surya. Selain itu, sistem dilengkapi dengan mekanisme proteksi *overcurrent* dan *overvoltage* berbasis sensor arus ACS712, sensor tegangan, serta relay yang bekerja secara otomatis untuk memutus suplai daya ketika parameter operasi melebihi batas aman. Integrasi kedua metode kendali dan sistem proteksi tersebut menjadi kontribusi utama penelitian dalam meningkatkan fleksibilitas pengoperasian sekaligus menjaga keamanan sistem kendali motor DC pada purwarupa speedboat tenaga surya.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Perancangan Sistem

Perancangan sistem pada penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem kendali kecepatan motor DC pada purwarupa speedboat tenaga surya menggunakan metode Pulse Width

Modulation (PWM). Sistem dirancang dengan memanfaatkan mikrokontroler Arduino Uno sebagai pengendali utama yang mengatur variasi *duty cycle* PWM untuk mengontrol kecepatan motor melalui motor driver. Selain itu, sistem dilengkapi dengan sensor arus ACS712 dan rangkaian pembagi tegangan sebagai proteksi terhadap kondisi *overcurrent* dan *overvoltage* guna menjaga keamanan komponen dan kestabilan operasi sistem. Berikut merupakan diagram blok pada sistem:



Gambar 1. Diagram Blok Sistem

Berdasarkan diagram blok pada gambar 1, komponen yang berperan sebagai pengatur tegangan dan arus pada rangkaian yaitu Motor Driver melalui pengaturan input sinyal Analog Potensiometer dan Digital Bluetooth sebagai pengaturan sinyal PWM Arduino Uno, Sensor tegangan dan Sensor arus (ACS712) mendeteksi kondisi tegangan dan arus pada motor, Relay digunakan sebagai penghubung dan pemutus rangkaian. Diagram blok ini merupakan gambaran umum dari cara kerja sistem meliputi input, proses dan output yang dihasilkan.

2.1.1 Baterai 12V / 26Ah dan Buck Converter 5V / 3A

Baterai 12V/26Ah berfungsi sebagai sumber daya utama sistem yang menyuplai energi listrik ke seluruh rangkaian. Buck converter 5V/3A digunakan untuk menurunkan tegangan 12V dari baterai menjadi 5V yang stabil agar sesuai dengan kebutuhan Arduino Uno dan komponen kontrol lainnya.

2.1.2 Sensor Tegangan (Pembagi Tegangan) dan Sensor ACS712

Sensor tegangan dengan metode pembagi tegangan berfungsi untuk menurunkan dan membaca nilai tegangan baterai atau motor agar dapat diproses oleh Arduino melalui pin ADC. Sensor arus ACS712 digunakan untuk mendeteksi besar arus yang mengalir ke motor DC, sehingga sistem dapat memonitor konsumsi arus secara real-time.

2.1.3 Potensiometer dan Bluetooth

Potensiometer berfungsi sebagai input analog untuk mengatur kecepatan motor secara manual dengan mengubah nilai tegangan yang dibaca Arduino. Bluetooth berfungsi sebagai input digital nirkabel untuk mengontrol atau mengatur kecepatan motor melalui perangkat seperti smartphone.

2.1.4 Arduino Uno

Arduino Uno berperan sebagai pusat kendali sistem yang menerima seluruh sinyal input dari sensor dan perangkat kontrol, kemudian mengolah data tersebut untuk menghasilkan sinyal PWM sebagai pengatur kecepatan motor.

2.1.5 Relay

Relay berperan sebagai saklar elektronik yang menghubungkan atau memutuskan suplai daya ke motor driver atau motor DC, sehingga dapat digunakan sebagai sistem pengaman atau kontrol ON/OFF.

2.1.6 Motor Driver

Motor driver berfungsi sebagai penguat daya yang menerima sinyal PWM dari Arduino Uno dan mengatur besar tegangan serta arus yang diberikan ke motor DC sesuai dengan duty cycle, sehingga kecepatan motor dapat dikontrol.

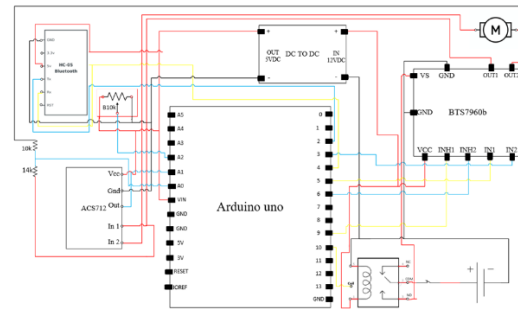
2.1.7 Motor DC

Motor DC merupakan komponen utama yang mengkonversi energi listrik menjadi energi mekanik berupa putaran. Kecepatan putaran motor bergantung pada besar sinyal PWM yang diberikan melalui motor driver. Untuk mengetahui kecepatan rotasi putaran motor DC dapat dilakukan dengan perhitungan menggunakan rumus berikut:

$$RPM = \frac{Duty\ cycle}{100\%} \times RPM_{max} \quad (1)$$

2.2 Perancangan Elektronik

Perancangan elektronik pada penelitian ini dilakukan untuk merealisasikan sistem kendali kecepatan motor DC pada purwarupa speedboat tenaga surya. Pada perancangan elektronik terdapat skematik sistem. Berikut merupakan skematik rangkaian sistem:



Gambar 2. Skematik Rangkaian Sistem

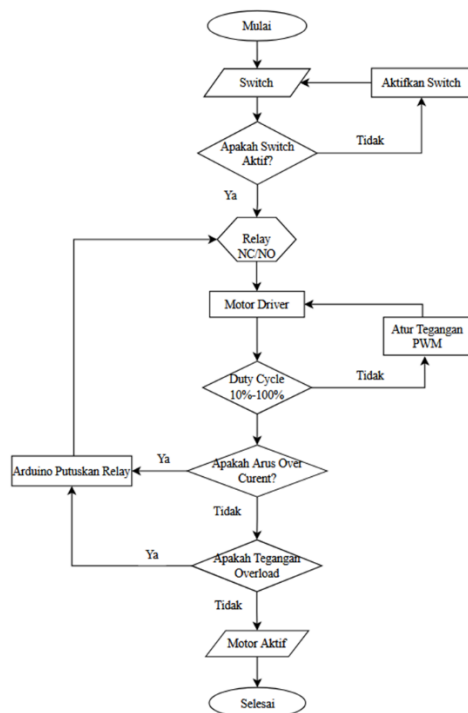
Tabel 1. Keterangan Keseluruhan Komponen

Komponen	Fungsi	Keterangan / Pin
Buck Converter	Menurunkan tegangan dari 12V menjadi 5V	Input 12V, Output 5V
Arduino Uno	Kontroler sistem	Menggunakan Pin analog, digital dan PWM
BTS 7960b	Penguat dan pengendali daya antara mikrokontroler (Arduino Uno) dan motor DC	INH1, INH2, IN1 dan IN2 terhubung ke Pin PWM D9, D5, D6 dan D3
Potensiometer	Pengatur lebar pulsa (PWM) dengan sinyal analog	Output terhubung pada A3
Bluetooth	Pengatur lebar pulsa (PWM) dengan sinyal digital	TX dan RX terhubung pada RXD dan TXD
Relay	Kontak internal rangkaian	In terhubung pada D10
ACS712	Pembaca arus yang masuk pada motor DC	Output terhubung pada A1

Pembagi	Pembaca	Output
Tegangan	tegangan yang masuk pada motor DC	Terhubung pada A0

2.2 Perancangan Logika Sistem

Perancangan logika sistem dilakukan untuk mengatur proses kerja sistem kendali kecepatan motor DC menggunakan mikrokontroler Arduino Uno. Logika coding program dirancang mengikuti alur flowchart program yang mengatur pembacaan sensor arus dan tegangan, proses pengolahan data, serta pengaturan sinyal PWM untuk mengendalikan kecepatan motor. Program juga mengatur logika sistem proteksi agar rangkaian dapat bekerja secara aman dan stabil selama proses pengoperasian. Perancangan logika dan coding program mengikuti alur dari flowchart.



Gambar 3. Flowchart

Flowchart pada gambar 3 menjelaskan proses kerja sistem yang diawali dengan switch sebagai pengaktif sistem. Tegangan dari baterai dialirkan melalui relay yang dikendalikan oleh Arduino. Dalam kondisi normal relay akan aktif sehingga daya dapat mengalir ke motor melalui motor driver. Kecepatan motor diatur menggunakan sinyal PWM dari Arduino dengan mengubah nilai *duty cycle* sehingga tegangan rata-rata yang

diterima motor dapat dikontrol. Sensor arus ACS712 dan sensor tegangan digunakan untuk memantau kondisi sistem secara real-time. Data sensor kemudian dianalisis oleh Arduino untuk mendeteksi kemungkinan terjadinya arus lebih atau tegangan lebih. Jika tidak terjadi *overload*, sistem akan tetap bekerja secara normal. Namun jika terdeteksi kondisi *overload*, Arduino akan memutus relay sehingga suplai daya ke motor terhenti sebagai langkah proteksi untuk mencegah kerusakan pada sistem. Sistem dapat diaktifkan kembali setelah kondisi kembali normal.

2.3 Metode Pengujian

Pada tahap ini menjelaskan metode yang digunakan untuk menguji kinerja sistem kendali kecepatan motor DC pada purwarupa speedboat tenaga surya. Pengujian dilakukan untuk mengetahui hubungan antara sinyal PWM yang diberikan oleh mikrokontroler terhadap tegangan, arus, serta kecepatan putar motor DC. Pengujian dilakukan dengan beberapa pengaturan variasi *duty cycle* PWM dan hasil pengukuran dicatat untuk dianalisis.

2.4.1 Pengujian Duty Cycle

Pengujian *duty cycle* PWM dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan nilai *duty cycle* terhadap kinerja motor DC. Nilai PWM diatur melalui program pada mikrokontroler Arduino dengan beberapa variasi *duty cycle*. Setiap perubahan *duty cycle* akan diamati pengaruhnya terhadap tegangan keluaran motor dan kecepatan putaran motor.

2.4.2 Pengujian Tegangan

Pengujian tegangan dilakukan untuk mengetahui seberapa besar nilai tegangan yang disupay ke motor DC pada setiap variasi *duty cycle* PWM. Pengukuran tegangan dilakukan menggunakan multimeter pada terminal motor untuk melihat perubahan tegangan yang dihasilkan oleh motor driver.

2.4.3 Pengujian Arus

Pengujian arus dilakukan untuk mengetahui arus yang mengalir pada motor DC selama sistem beroperasi. Pengukuran arus dilakukan menggunakan sensor arus ACS712 yang terhubung dengan mikrokontroler Arduino. Data arus yang diperoleh digunakan untuk mengetahui konsumsi daya motor pada setiap variasi kecepatan.

2.4.4 Pengujian Kecepatan Motor (RPM)

Pengujian kecepatan motor dilakukan untuk mengetahui kecepatan putaran (RPM) motor DC pada setiap variasi nilai PWM. Pengukuran kecepatan motor dilakukan menggunakan alat ukur RPM meter atau tachometer. Data yang diperoleh digunakan untuk menganalisis hubungan antara nilai PWM dan kecepatan putar motor.

3.HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil pengujian dari sistem kendali kecepatan motor DC pada purwarupa speedboat tenaga surya yang telah dirancang. Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem dalam mengatur kecepatan motor melalui variasi *duty cycle* PWM, serta untuk menganalisis parameter listrik yang meliputi tegangan, arus, dan kecepatan putaran motor (RPM). Data hasil pengujian selanjutnya dianalisis untuk mengetahui hubungan antara perubahan *duty cycle* PWM terhadap performa motor DC serta efektivitas sistem kendali yang telah dirancang.

3.1 Pengujian Kecepatan Putaran Motor DC

Pengujian kontrol motor driver bertujuan untuk memastikan bahwa sistem mampu mengatur kecepatan putaran motor DC secara efektif melalui variasi nilai sinyal PWM yang diberikan ke driver motor. Pengujian dilakukan dalam dua metode pengendalian, yaitu kontrol analog menggunakan potensiometer dan kontrol digital berbasis Bluetooth. Kedua metode diuji untuk membandingkan respons dan kestabilan motor pada perubahan nilai *duty cycle*, konsumsi arus, serta keterlambatan respons sistem (delay). Pada pengujian kontrol motor driver terbagi menjadi 2 yaitu pengujian melalui kontrol analog dan digital.

3.1.1 Sinyal Analog

Pengujian kontrol analog dilakukan dengan menggunakan potensiometer sebagai input manual untuk mengatur kecepatan motor. Potensiometer dibaca sebagai sinyal analog oleh Arduino dan dikonversi menjadi nilai *duty cycle* PWM pada driver motor.

Tabel 2. Pengujian Kecepatan Melalui Pengaturan Sinyal Analog

Nilai ADC	Speed Output (Duty Cycle)	Nilai PWM	Pengukuran (Rpm)
107	10.8%	27.54	776,8
208	20.6%	52.53	1.619,8
311	30.4%	77.52	2.845
412	40.2%	102.5	3.562,8
		1	
515	50.0%	127.5	4.772,9
616	60.8%	155.0	5.748,3
		4	
720	70.6%	180.0	6.722
		3	
819	80.4%	205.0	7.664,4
		2	
-	-	-	-
-	-	-	-



Gambar 4. Proses Pengukuran Kecepatan Menggunakan Tacho Meter

Dapat dilihat dari hasil pengukuran yang dilakukan pada tabel pengujian dengan sinyal analog, terlihat adanya hubungan linier antara nilai ADC (Analog to Digital Converter) dengan nilai PWM (Pulse Width Modulation) serta kecepatan putaran motor yang dinyatakan dalam satuan putaran per menit (RPM). Peningkatan nilai ADC yang berasal dari perubahan posisi potensiometer menyebabkan kenaikan nilai PWM yang diberikan ke motor DC. Hal ini berdampak langsung pada peningkatan *duty cycle* sinyal PWM dan kecepatan putaran motor.

Pada nilai ADC 107, PWM yang dihasilkan sebesar 27.54 dengan *duty cycle* 10,8%, sehingga motor menghasilkan kecepatan terukur sebesar 776,8 RPM. Ketika nilai ADC meningkat menjadi 208, nilai PWM naik menjadi 52.53 dengan *duty cycle* 20.6%, yang mengakibatkan kecepatan motor meningkat menjadi 1.619,8 RPM. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem kendali mampu merespons perubahan input ADC dengan baik.

Selanjutnya, pada rentang *duty cycle* 30,4% hingga 80,4%, peningkatan kecepatan motor terjadi secara bertahap dan relatif proporsional terhadap kenaikan nilai PWM. Sebagai contoh, pada *duty cycle* 50.0% dengan PWM sebesar 127.5, kecepatan motor mencapai 4.772,9 RPM, sedangkan pada *duty cycle* 80.4% dengan PWM 204.2, kecepatan motor meningkat menjadi 7.664,4 RPM. Hal ini menunjukkan karakteristik motor DC yang kecepatan putarnya sebanding dengan tegangan efektif yang diberikan melalui pengaturan PWM.

Namun, pada *duty cycle* di atas 90% hingga 100%, data kecepatan motor tidak tercatat. Hal ini disebabkan system proteksi pada rangkaian membaca arus atau tegangan yang berlebih sehingga system proteksi mengaktifkan mode cut off untuk menjaga kondisi motor dari *overvoltage* atau *overcurrent*. Meskipun demikian, secara perhitungan teoritis kecepatan motor tetap mengalami peningkatan hingga mencapai nilai maksimum pada *duty cycle* 100%.

3.1.2 Sinyal Digital

Pengujian kontrol digital dilakukan menggunakan modul Bluetooth sebagai media komunikasi untuk mengatur kecepatan motor melalui aplikasi pada Handphone. Perintah kecepatan dikirim ke Arduino dalam bentuk nilai digital, kemudian Arduino mengubah perintah tersebut menjadi nilai PWM yang dikirim ke driver motor.

Tabel 3. Pengujian Kecepatan Melalui Pengaturan Sinyal Digital

Variasi <i>Duty Cycle</i>	PWM	V Out	I Out	Pengukuran RPM
10%	25.5	1.28	0.58	761,6
20%	51	2.55	0.96	1.619,8
30%	76.5	3.84	1.53	2.826
40%	102	5.12	2.45	3.562,8
50%	127.5	6.40	3.60	4.754

60%	153	7.68	4.73	5.748,3
70%	178.5	8.96	5.87	6.703
80%	204	10.2	7.01	7.664,4
		4		
90%	-	-	-	-
100%	-	-	-	-



Gambar 5. Gelombang *Duty Cycle* Osiloscope

Dapat dilihat pada tabel pengujian dengan sinyal digital, hasil dari pengukuran dapat dianalisis pengaruh variasi *duty cycle* PWM terhadap tegangan keluaran (V_{out}), arus keluaran (I_{out}), serta kecepatan putaran motor DC yang dinyatakan dalam satuan radius per menit (RPM). Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan *duty cycle* PWM berbanding lurus dengan kenaikan tegangan dan arus yang diberikan ke motor, sehingga menyebabkan peningkatan kecepatan putaran motor.

Pada *duty cycle* 10%, nilai PWM sebesar 25,5 menghasilkan tegangan keluaran 1,28 V dan arus sebesar 0,58 A. Kondisi ini menghasilkan kecepatan motor terukur sebesar 761,6 RPM, yang relatif mendekati hasil perhitungan teoritis sebesar 1.200 RPM. Selisih antara nilai teoritis dan pengukuran ini disebabkan oleh adanya rugi-rugi sistem, seperti rugi gesek mekanik dan rugi daya pada rangkaian pengendali.

Seiring dengan peningkatan *duty cycle* menjadi 20% hingga 50%, tegangan dan arus keluaran meningkat secara signifikan. Pada *duty cycle* 50%, tegangan keluaran mencapai 6,40 V dengan arus 3,60 A, sehingga motor mampu berputar hingga 4.754 RPM. Peningkatan ini menunjukkan bahwa metode pengaturan *duty cycle* PWM efektif dalam mengendalikan daya yang disuplai ke motor DC.

Pada *duty cycle* menengah hingga tinggi, yaitu 60% sampai 80%, arus keluaran meningkat cukup besar dari 4,73 A hingga 7,01 A, diikuti dengan kenaikan kecepatan motor hingga 7.664,4 RPM pada *duty cycle* 80%. Hal ini menunjukkan bahwa motor bekerja mendekati kondisi optimal, di mana peningkatan daya listrik secara langsung dikonversi menjadi energi mekanik berupa kecepatan putar.

Namun, pada *duty cycle* 90% dan 100%, data kecepatan motor hasil pengukuran tidak diperoleh, kondisi ini disebabkan oleh proteksi sistem (mode cut off) untuk menghindari kondisi motor dari kondisi *overvoltage* atau *overcurrent*. Secara teoritis, kecepatan motor tetap meningkat hingga mencapai nilai maksimum pada *duty cycle* 100%.

3.2 Perbandingan Kecepatan Perhitungan Dan Pengukuran

Perhitungan pada kecepatan digunakan sebagai pembandingan atau acuan secara teoritis pada pengukuran nilai kecepatan. Terdapat dua pengukuran yaitu Analog dan Digital.

3.2.1 Analog

Perbandingan antara perhitungan dan pengukuran pada kecepatan motor DC melalui pengaturan input sinyal analog digunakan sebagai acuan teoritis pengukuran.

Tabel 4. Perbandingan Perhitungan Dan Pengukuran Pada Kecepatan Motor DC Dengan Pengaturan Sinyal Analog

Speed Output (<i>Duty Cycle</i>)	Perhitungan Radius Per-Menit (Rpm)	Radius Per-Menit (Rpm)	Persentase Error
10.8%	1.296	776,8	40,06%
20.6%	2.472	1.619,8	34,47%
30.4%	3.648	2.845	22,01%
40.2%	4.824	3.562,8	26,14%
50.0%	6.000	4.772,9	20,45%
60.8%	7.296	5.748,3	21,22%
70.6%	8.472	6.722	20,66%
80.4%	9.648	7.664,4	20,56%
90.2%	10.824	-	-

100%	12.000	-	-
------	--------	---	---

Berdasarkan hasil perhitungan error pada tabel perbandingan perhitungan dengan sinyal analog terlihat adanya selisih antara nilai kecepatan motor hasil perhitungan teoritis dengan hasil pengukuran aktual pada setiap variasi *duty cycle*. Pada *duty cycle* rendah, yaitu 10,8% dan 20,6%, persentase error tergolong paling besar, masing-masing sebesar 40,06% dan 34,47%. Nilai ini menunjukkan bahwa pada kondisi kecepatan rendah, pengaruh rugi-rugi sistem seperti gesekan mekanik, torsi awal (starting torque), serta drop tegangan pada driver lebih dominan sehingga kecepatan aktual jauh di bawah nilai teoritis.

Memasuki *duty cycle* 30,4%, error menurun menjadi 22,01%, namun pada 40,2% terjadi sedikit kenaikan menjadi 26,14%. Setelah *duty cycle* mencapai 50,0% hingga 80,4%, persentase error cenderung lebih stabil pada kisaran 20–21%. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada kecepatan menengah hingga tinggi, karakteristik putaran motor mulai lebih mendekati model teoritis dan sistem bekerja dalam kondisi yang lebih stabil.

Perbedaan antara nilai teoritis dan aktual ini disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain rugi gesek mekanik pada poros dan bearing, rugi daya pada rangkaian driver PWM, penurunan tegangan akibat pembebanan, serta karakteristik motor DC yang tidak sepenuhnya linear terhadap tegangan efektif PWM. Selain itu, keterbatasan akurasi alat ukur dan resolusi sensor pembaca RPM juga turut mempengaruhi hasil pengukuran.

Pada *duty cycle* 90% dan 100%, data pengukuran tidak diperoleh karena sistem berada pada batas kerja maksimum (mendekati 12.000 rpm), sehingga pengujian dihentikan untuk menghindari risiko *overcurrent* dan peningkatan temperatur berlebih pada motor, khususnya pada motor tipe RS775 yang digunakan. Oleh karena itu, analisis error dibatasi hingga *duty cycle* 80,4%.

Secara keseluruhan, meskipun terdapat perbedaan antara nilai teoritis dan hasil pengukuran aktual, tren kenaikan kecepatan motor tetap konsisten dan menunjukkan hubungan yang hampir linear terhadap

peningkatan *duty cycle* PWM. Dengan demikian, model perhitungan yang digunakan masih relevan sebagai pendekatan teoritis, sementara hasil pengukuran memberikan gambaran performa sistem pada kondisi operasional.

3.2.2 Digital

Perbandingan antara perhitungan dan pengukuran pada kecepatan motor DC melalui pengaturan input sinyal digital digunakan sebagai acuan teoritis pengukuran.

Tabel 5. Perbandingan Perhitungan Dan Pengukuran Pada Kecepatan Motor DC Dengan Pengaturan Sinyal Digital

Speed Output (<i>Duty Cycle</i>)	Perhitungan Radius Per-Menit (Rpm)	Radius Per-Menit (Rpm)	Persentase Error
10%	1.200	761,6	36,5%
20%	2.400	1.619,8	32,51%
30%	3.600	2.826	21,50%
40%	4.800	3.562,8	25,77%
50%	6.000	4.754	20,77%
60%	7.200	5.748,3	20,16%
70%	8.400	6.703	20,20%
80%	9.600	7.664,4	20,16%
90%	10.800	-	-
100%	12.000	-	-

Berdasarkan hasil perhitungan error pada tabel perbandingan perhitungan dengan sinyal digital ditunjukkan perbandingan antara kecepatan putaran motor hasil perhitungan teoritis dan hasil pengukuran aktual pada berbagai variasi *duty cycle* PWM. Persentase error dihitung untuk mengetahui tingkat kesesuaian antara nilai teoritis dengan kondisi aktual sistem.

Pada *duty cycle* 10% dan 20%, persentase error yang dihasilkan masing-masing sebesar 36,5% dan 32,51%. Nilai error yang relatif besar pada *duty cycle* rendah ini menunjukkan bahwa pada kecepatan putar rendah, pengaruh rugi-rugi sistem seperti gesekan mekanik, penurunan tegangan pada driver motor, serta ketidaklinieran

karakteristik motor DC menjadi lebih dominan terhadap hasil pengukuran.

Seiring dengan meningkatnya *duty cycle*, persentase error cenderung menurun dan relatif stabil. Pada *duty cycle* 30% hingga 80%, nilai error berada pada kisaran 20,16% hingga 25,77%. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada kecepatan menengah hingga tinggi, performa motor semakin mendekati nilai perhitungan teoritis dan sistem bekerja dengan lebih stabil.

Nilai error terkecil diperoleh pada *duty cycle* 60% dan 80% dengan persentase error sebesar 20,16%. Hal ini mengindikasikan bahwa pada rentang *duty cycle* tersebut, sistem kendali PWM bekerja lebih optimal dalam mengonversi daya listrik menjadi energi mekanik berupa kecepatan putar motor.

Pada *duty cycle* 90% dan 100%, data hasil pengukuran tidak tersedia sehingga persentase error tidak dapat dihitung. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan sistem pengujian dan pertimbangan keamanan, mengingat pada *duty cycle* tinggi motor berpotensi mengalami kondisi *overcurrent* atau *overvoltage*.

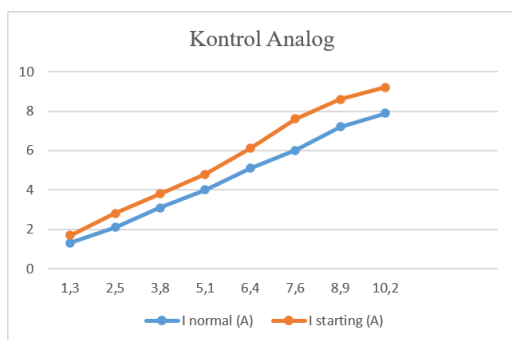
3.3 Pengujian Sistem proteksi

Pengujian sistem proteksi dilakukan untuk memastikan bahwa rangkaian mampu mendeteksi kondisi abnormal yang dapat membahayakan komponen, khususnya motor DC dan driver motor. Pada sistem ini terdapat dua bentuk proteksi utama yang diuji, yaitu proteksi *overvoltage* dan *overcurrent*. Kedua proteksi bekerja berdasarkan pembacaan sensor arus dan rangkaian pembagi tegangan secara *realtime*, dan diproses oleh Arduino untuk menentukan apakah sistem dalam kondisi aman atau berbahaya.

3.3.1 Pengujian Dengan Sinyal Analog

Analog (<i>Duty Cycle</i>)	Nilai Tegangan (V)	I _{Startin} (A)	I _{Norma} (A)	Status
10.8%	1.3	1,765	1,390	Normal
20.6%	2.5	2,870	2,127	Normal
30.4%	3.8	3,846	3,148	Normal
40.2%	5.1	4,844	4,073	Normal

50.0%	6.4	6,193	5,122	Normal
60.8%	7.6	7,305	6,055	Normal
70.6%	8.9	8,657	7,205	Normal
80.4%	10.2	9,233	7,908	Normal
90.2%	-	-	-	Overload
100%	-	-	-	Overload



Gambar 6. Grafik Perbandingan I_{start} dan I_{normal}

Berdasarkan tabel pengujian dengan sinyal analog, ditunjukkan karakteristik arus starting (I_{start}) dan arus normal (I_{normal}) motor DC terhadap variasi *duty cycle* PWM. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui respon arus motor pada saat awal beroperasi serta kondisi kerja normal, sekaligus mengidentifikasi batas aman arus dalam sistem kendali motor.

Pada *duty cycle* rendah hingga menengah, yaitu 10,8% sampai 40,2%, arus starting yang terukur berada pada rentang 1,765 A hingga 4,844 A, sedangkan arus normal berada pada rentang 1,390 A hingga 4,073 A. Seluruh kondisi pada rentang ini dikategorikan sebagai normal, yang menunjukkan bahwa sistem mampu menahan lonjakan arus awal tanpa melewati batas arus yang diizinkan.

Seiring dengan peningkatan *duty cycle* menjadi 50,0% hingga 80,4%, nilai tegangan input motor meningkat dari 6,4 V hingga 10,2 V. Hal ini menyebabkan arus starting meningkat cukup signifikan hingga mencapai 9,233 A pada *duty cycle* 80,4%, sedangkan arus normal mencapai 7,908 A. Meskipun terjadi kenaikan arus yang cukup besar, sistem masih berada pada kondisi normal, yang menunjukkan bahwa

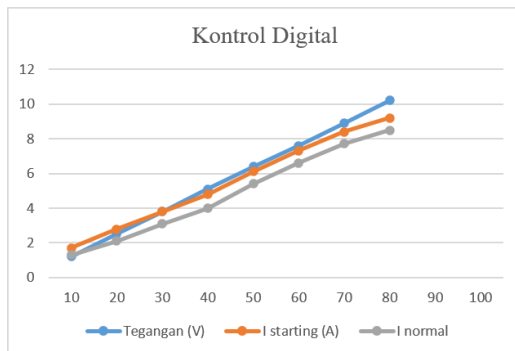
rangkaian pengamanan dan spesifikasi motor masih mampu menanggung arus kerja tersebut.

Perbedaan antara arus starting dan arus normal pada setiap variasi *duty cycle* menunjukkan karakteristik umum motor DC, di mana arus starting selalu lebih besar dibandingkan arus normal. Hal ini disebabkan oleh kondisi awal motor yang belum berputar, sehingga hambatan induktif masih rendah dan arus yang mengalir menjadi lebih besar. Setelah motor mencapai kecepatan stabil, arus akan menurun dan berada pada nilai arus normal.

Namun, pada *duty cycle* 90,2% dan 100%, sistem mengalami kondisi *overcurrent* dimana kontak relay memutuskan rangkaian, sehingga data tegangan dan arus tidak ditampilkan. Kondisi ini menunjukkan bahwa arus yang mengalir telah melampaui batas aman yang ditetapkan dalam sistem, sehingga mekanisme proteksi bekerja untuk mencegah kerusakan pada motor maupun rangkaian pengendali. Hal ini menegaskan bahwa pengoperasian motor pada *duty cycle* di atas 80% berpotensi menimbulkan beban arus berlebih.

3.3.2 Pengujian Dengan Sinyal Digital

Digital (Duty Cycle)	Nilai Tegangan (V)	I_{start} (A)	I_{normal} (A)	Status
10%	1.2	1,763	1,387	Normal
20%	2.5	2,868	2,124	Normal
30%	3.8	3,844	3,145	Normal
40%	5.1	4,84	4,07	Normal
50%	6.4	6,19	5,422	Normal
60%	7.6	7,303	6,655	Normal
70%	8.9	8,455	7,705	Normal
80%	10.2	9,23	8,508	Normal
90%	-	-	-	Overload
100%	-	-	-	Overload



Gambar 7. Grafik Tegangan, Perbandingan I_{start} dan I_{normal}

Berdasarkan Tabel pengujian dengan sinyal digital, ditunjukkan hasil pengujian karakteristik arus starting (I_{start}) dan arus normal (I_{normal}) motor DC terhadap variasi *duty cycle* PWM yang diberikan secara digital. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui respon motor terhadap kendali digital serta mengevaluasi kondisi keamanan sistem berdasarkan parameter tegangan dan arus.

Pada *duty cycle* 10% hingga 40%, nilai tegangan yang dihasilkan meningkat secara bertahap dari 1,2 V hingga 5,1 V. Pada rentang ini, arus starting tercatat antara 1,763 A hingga 4,84 A, sedangkan arus normal berada pada kisaran 1,387 A hingga 4,07 A. Seluruh kondisi pengujian pada rentang tersebut berada pada status normal, yang menunjukkan bahwa sistem kendali digital mampu mengatur suplai tegangan dan arus ke motor secara stabil.

Selanjutnya, pada *duty cycle* menengah hingga tinggi, yaitu 50% sampai 80%, terjadi peningkatan tegangan hingga 10,2 V yang diikuti oleh kenaikan arus starting dan arus normal. Pada *duty cycle* 80%, arus starting mencapai 9,23 A dan arus normal sebesar 8,508 A. Meskipun arus yang mengalir cukup besar, sistem masih berada pada kondisi normal, yang menandakan bahwa batas arus dan tegangan masih berada dalam spesifikasi aman motor dan rangkaian pengendali.

Perbedaan antara arus starting dan arus normal yang konsisten pada setiap variasi *duty cycle* menunjukkan karakteristik alami motor DC, di mana arus awal lebih besar akibat kondisi rotor yang belum berputar. Setelah motor mencapai kecepatan stabil, arus menurun dan berada pada nilai arus normal.

Namun, pada *duty cycle* 90% dan 100%, sistem mengalami kondisi *overvoltage* dan *overcurrent*, sehingga data pengukuran tegangan dan arus tidak ditampilkan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa tegangan dan arus yang dihasilkan telah melampaui batas aman yang ditentukan dalam sistem, sehingga mekanisme proteksi bekerja untuk memutuskan atau membatasi suplai daya guna mencegah kerusakan pada motor dan komponen pengendali melalui kontak Relay.

Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian menggunakan pengaturan sinyal analog dan digital, sistem kendali motor DC menunjukkan kecenderungan peningkatan performa yang konsisten seiring bertambahnya *duty cycle* PWM. Pada rentang *duty cycle* 10–80%, tegangan keluaran meningkat dari 1,2 V hingga 10,2 V, arus kerja motor meningkat dari sekitar 0,58 A hingga 7,01 A, sedangkan kecepatan putaran motor bertambah dari 761,6 RPM hingga 7.664,4 RPM, sistem proteksi memutuskan rangkaian pada pengujian *duty cycle* 90–100%, hal ini dikarenakan kondisi bacaan pada sensor terdeteksi *overload* sehingga melindungi rangkaian dari efek *overvoltage* atau *overcurrent*. Hasil perbandingan antara nilai teoritis dan hasil pengukuran menunjukkan bahwa persentase error berada pada kisaran 20,16% hingga 40,06%, di mana nilai error terbesar terjadi pada *duty cycle* rendah akibat pengaruh torsi awal, rugi-rugi mekanik, dan penurunan tegangan pada rangkaian pengendali. Secara umum, peningkatan tegangan dan arus yang diberikan melalui pengaturan PWM berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan putaran motor, sehingga menunjukkan bahwa sistem kendali yang dirancang mampu bekerja secara konsisten sesuai karakteristik motor DC.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dari perancangan serta uji coba sistem, dapat disimpulkan bahwa sistem kendali kecepatan motor DC pada purwarupa speedboat tenaga surya berbasis metode Pulse Width Modulation (PWM) berhasil direalisasikan dan bekerja dengan baik. Variasi *duty cycle* PWM terbukti berpengaruh signifikan terhadap tegangan, arus, dan kecepatan putaran motor, di mana peningkatan *duty cycle* dari sekitar 10% hingga 80% mampu meningkatkan tegangan motor dari 1,2 V menjadi 10,2 V serta

kecepatan dari 761,6 RPM hingga 7.664,4 RPM. Baik metode kontrol analog menggunakan potensiometer maupun kontrol digital melalui Bluetooth menunjukkan respons sistem yang stabil dan linier terhadap perubahan input. Selain itu, sistem proteksi berbasis sensor arus dan tegangan mampu bekerja efektif dalam mencegah kondisi *overcurrent* dengan memutus suplai daya saat arus melebihi batas aman (10 A). Dengan demikian, sistem yang dirancang mampu mengontrol kecepatan motor secara efisien.

SARAN

Penelitian ini masih terbatas pada pengujian purwarupa di lingkungan laboratorium sehingga belum mengevaluasi efisiensi energi sistem tenaga surya maupun performa speedboat pada kondisi operasi di perairan nyata. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu menguji sistem pada kondisi lapangan dengan mempertimbangkan kebutuhan energi serta ketahanan baterai.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Cheng, L., Liu, Z., dkk. Design and implementation of a high-precision closed-loop Hall current sensor. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2014; 27(6), 1233–1240.
- [2] Casadei D, Serra G, Tani K. Implementation of a Direct Control Algorithm for Induction Motors Based on Discrete Space Vector Modulation. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2007; 15(4): 769-777. (pada contoh ini Vol.15, Issues 4, and halaman 769-777)
- [3] Firmansyah, D., & Susanto. Sistem kendali kecepatan motor DC pada pompa air tenaga surya berbasis Arduino. *Jurnal Teknik Elektro*. 2023; 12(2), 45–52.
- [4] Hidayat, T., & Ramdhani, M. Pengendalian motor BLDC berbasis Arduino menggunakan driver IR2101. *Jurnal Elektronika dan Sistem Kendali*. 2021; 9(1), 23–30.
- [5] Prakosa, A., dkk. (2021). Identifikasi model dan kontrol kecepatan motor DC berbasis PWM. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*. 2021; 10(3), 101–108.
- [6] Ridwan, M., & Surya, D. Analisis pengaruh PWM terhadap performa motor DC pada

kendaraan listrik roda tiga. *Jurnal Energi Terbarukan*. 2022; 8(2), 67–75.

- [7] Widodo, S., & Sihombing, H. Analisis efisiensi sistem motor listrik pada kapal berbasis energi terbarukan. *Jurnal Teknologi Maritim*. 2023;15(1), 55–63.
- [8] Lestari, P., Kurniawan, R., & Hadi, S. Studi penggunaan energi surya pada sistem transportasi laut skala kecil. *Jurnal Energi dan Lingkungan*. 2020; 6(1), 12–20.