

# Rancang Bangun *Six Step Inverter* untuk Motor *Brushless Direct Current Outrunner* pada Sepeda Listrik

Muhammad Ali Maskur<sup>1</sup>, Ony Asrarul Qudsi<sup>2</sup>, Indra Ferdiansyah<sup>3</sup>

[Submission: 05-11-2023, Accepted: 24-02-2024]

**Abstract**— In general, BLDC motors have a position sensor (hall sensor) in them, where there is a hall sensor, this will provide position information feedback to the observer so that by using the sensed method the motor operation can be carried out properly because the control is perfectly synchronized with the rotor position. This research discusses regulating the speed of a brushless DC motor using a BLDC inverter motor control method, namely six-step commutation. This system uses a modified folding bicycle concept, with the controller coming from a microcontroller integrated with an Android application to monitor measurement data. Tests were carried out partially and integrated the entire system without load and using mechanical loads. The test results in this research are that the three-phase inverter has an error rate of 0.75%, as well as the voltage sensor which has an error rate of 0.49%, and the current sensor with an error rate of 0.994%. The motor speed produced by the inverter will increase as the input voltage increases. The maximum speed that an electric bicycle can reach is 30 km/h. Battery voltage, current and power measurement data is sent in real time to the Android application.

**Keyword**— BLDC Motor, Three-Phase Inverter, Six-Step Commutation, Hall Sensor, Electric Bicycle

**Intisari**— Pada umumnya, motor BLDC terdapat sebuah sensor posisi (sensor Hall) didalamnya, yang mana hall sensor ini akan memberikan umpan balik informasi posisi ke pengontrol sehingga dengan menggunakan metode sensed pengoperasian motor bisa dilakukan dengan baik karena pengontrol tersinkronisasi sempurna dengan posisi rotor. Pada penelitian ini membahas pengaturan kecepatan motor brushless DC dengan metode pengendalian inverter motor BLDC yaitu komutasi enam langkah. Sistem ini menggunakan konsep bentuk sepeda lipat yang termodifikasi, dengan pengontrol berasal dari mikrokontroler yang terintegrasi aplikasi android untuk pemantauan data pengukuran. Pengujian dilakukan secara parsial dan integrasi secara keseluruhan sistem tanpa beban serta dengan menggunakan beban mekanik. Hasil pengujian pada penelitian ini yaitu inverter tiga fasa memiliki tingkat kesalahan sebesar 0,75%, begitu juga dengan sensor tegangan yang memiliki tingkat kesalahan sebesar 0,49%, dan sensor arus dengan tingkat kesalahan sebesar 0,994%. Kecepatan motor yang dihasilkan oleh inverter akan meningkat seiring dengan peningkatan tegangan input. Kecepatan maksimum yang dapat dicapai oleh sepeda listrik adalah 30 km/jam. Data pengukuran tegangan baterai, arus dan daya, terkirim secara realtime pada aplikasi android.

<sup>1,2,3</sup>Program Studi D3 Teknik Elektro Industri, Departemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Jl. Raya ITS, 60111 INDONESIA (e-mail: [ali.maskur2001@gmail.com](mailto:ali.maskur2001@gmail.com) ; [ony@pens.ac.id](mailto:ony@pens.ac.id) ; [indraferdi@pens.ac.id](mailto:indraferdi@pens.ac.id) )

**Kata Kunci**— Motor BLDC, Inverter Tiga Fasa, Komutasi Enam Langkah, Sensor Hall, Sepeda Listrik

## I. PENDAHULUAN

Salah satu contoh kendaraan yang menggunakan bahan bakar alternatif adalah sepeda listrik. Sepeda listrik menggunakan tenaga listrik dari baterai sebagai sumber utama energinya, yang kemudian dikonversi menjadi energi gerak. Untuk melakukan konversi ini, digunakan motor listrik, yang seringkali disebut sebagai inti mesin atau komponen utama yang bertanggung jawab untuk menggerakkan sepeda listrik. [1].

Pada era saat ini telah banyak kendaraan listrik misalnya sepeda listrik yang menggunakan motor BLDC (*Brushless Direct Current*). Motor BLDC sangat populer karena memiliki beberapa kelebihan, seperti ketahanan yang tinggi, torsi yang kuat, efisiensi yang optimal, keandalan yang baik, biaya perawatan yang rendah, dan kinerja yang sangat baik untuk mencapai kecepatan tinggi. [2]. Motor BLDC beroperasi dengan menggunakan tegangan utama yang berupa tegangan DC. Agar motor dapat berfungsi, diperlukan pembentukan medan putar pada stator. Pembentukan medan putar stator ini dicapai dengan mengaplikasikan tegangan AC tiga fasa ke stator motor. Karena itu, digunakan inverter tiga fasa untuk mengonversi tegangan DC menjadi tegangan AC tiga fasa. [3][4].

Dalam mengendalikan inverter motor BLDC, digunakan suatu metode yang dikenal sebagai *six step commutation*, di mana gelombang yang dihasilkan memiliki bentuk persegi dengan 6 langkah. Dalam pembentukan gelombang persegi ini, penentuan komutasi yang akurat sangat penting. Terdapat dua pendekatan untuk menentukan komutasi pada motor BLDC, yakni dengan menggunakan Sensor Hall (*sensored*) dan tanpa menggunakan Sensor Hall (*sensorless*). [5].

Pada umumnya, sensor posisi, terutama sensor hall digunakan dalam proses penentuan komutasi. Sensor tersebut berfungsi sebagai alat umpan balik yang digunakan untuk menginisiasi perubahan fase pada *driver* inverter. Proses ini mendukung pembentukan gelombang *trapezoidal* yang selanjutnya diolah dan digunakan sebagai dasar komutasi dalam inverter tiga fasa. [6].

Dari permasalahan tersebut maka dibutuhkan suatu sistem sebagai penggerak sekaligus pengendali kendaraan listrik. Oleh karena itu, peneliti mengusulkan suatu sistem sepeda listrik motor *brushless direct current outrunner*, dengan menggunakan *six-step* inverter. Sepeda listrik yang dibuat dirancang dengan konsep modifikasi bentuk sepeda lipat agar sesuai digunakan dalam kehidupan sehari-hari.



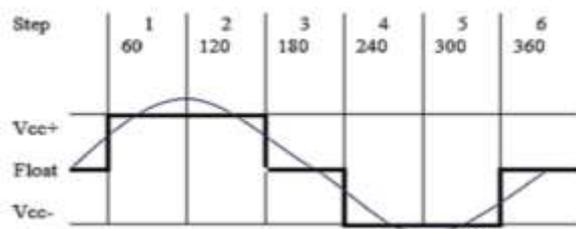
## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Motor Brushless Direct Current (BLDC)

Motor BLDC (*Brushless Direct Current*) memiliki dua komponen kunci, yaitu rotor yang didorong oleh permanen magnet, dan stator yang statis dengan tiga gulungan fasa [7]. Walaupun dalam prinsip beroperasi sebagai motor listrik sinkronus AC tiga fasa, motor ini disebut sebagai BLDC karena menggunakan tegangan DC sebagai sumber energi, yang kemudian diubah menjadi tegangan AC melalui inverter tiga fasa. Hal ini bertujuan untuk menghasilkan medan magnet putar pada stator yang akan menarik rotor tanpa memerlukan penggunaan sikat (*brushless*). [8]. Untuk mengatur komutasi yang tepat dan menjaga torsi serta kecepatan konstan, diperlukan tiga sensor hall dan/atau *encoder*. Motor BLDC *sensored* paling umum digunakan ketika torsi awal sangat bervariasi atau tinggi. Di sisi lain, motor BLDC *sensorless* kurang umum dalam industri dirgantara karena torsi awal yang rendah. Motor BLDC *sensored* selalu mengetahui posisi rotor, yang krusial terutama pada kecepatan rendah atau saat rotor diam, memungkinkan kontrol yang akurat untuk menggerakkan rotor sesuai kebutuhan [9][10].

### B. Six Step Comutation Inverter

Pada pengendalian motor BLDC, terdapat dua pendekatan, yakni metode six-step dan metode sinusoidal. Metode *six-step* sering digunakan dalam pengendalian komersial motor BLDC karena kemudahannya, meskipun memiliki kekurangan seperti tingginya arus RMS (*Root Mean Square*), tingginya rugi daya, dan tingkat kebisingan yang lebih tinggi, terutama karena adanya gelombang harmonik yang dihasilkan [11]. Metode ini dikenal sebagai metode *six-step* dikarenakan untuk menghasilkan gelombang *trapezoid* yang menyerupai gelombang *sinusoidal*, digunakan PWM (*Pulse Width Modulation*) *square* yang terdiri dari 6 segmen, yaitu 2 segmen positif, 2 segmen negatif, dan 2 segmen "floating". Masing-masing segmen memiliki amplitudo setara dengan 60° dari gelombang sinusoidal. Kondisi *float* dalam algoritma ini mengacu pada situasi ketika gelombang sinusoidal melintasi titik nol [12].

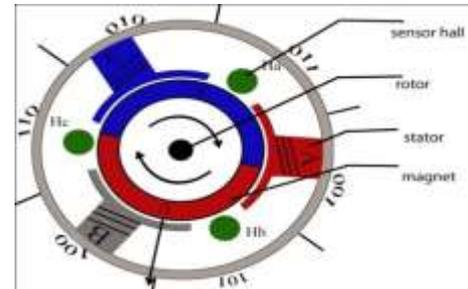


Gambar 1: Gelombang PWM Six-Step

Berdasarkan gambar 1, untuk menciptakan gelombang *trapezoid* atau gelombang *square* tiga fasa, digunakan tiga algoritma *six-step* yang masing-masing terpisah sebanyak satu langkah yang setara dengan sudut 60°, antara satu algoritma dengan yang lainnya. Saat diaplikasikan pada *driver* tiga fasa, algoritma PWM untuk setiap fase terbagi menjadi dua bagian, yakni bagian positif yang mengontrol transistor T1, T3 dan T5, serta bagian negatif mengontrol transistor T2, T4 dan T6 seperti yang terlihat pada gambar 2. [13].

### C. Sensor Hall

Sensor Hall digunakan untuk mendeteksi posisi rotor dalam metode komutasi. Dalam beberapa motor, rotor magnet juga berfungsi sebagai sumber *fluks* untuk menganalisis elemen Hall yang digunakan sebagai pengganti dalam motor DC tanpa sikat untuk menentukan waktu komutasi. Hal ini dilakukan dengan cara mendeteksi medan magnet pada rotor menggunakan tiga sensor Hall, yang menghasilkan enam kombinasi waktu komutasi yang berbeda, sebagaimana diperlihatkan pada gambar 2 [14].



Gambar 2: Konfigurasi Sensor Hall pada Motor BLDC

Pada motor DC *brushless* yang menggunakan elemen Hall sebagai sensor posisi, semua komponen kunci telah tergabung. Sebagai contoh, jika level *output* berada pada tingkat tinggi (H) untuk mendeteksi kutub utara, maka level *output* akan beralih ke tingkat rendah (L) untuk mendeteksi kutub selatan. Dalam situasi ini, tiga IC Hall digunakan untuk mengatur motor tiga fasa.

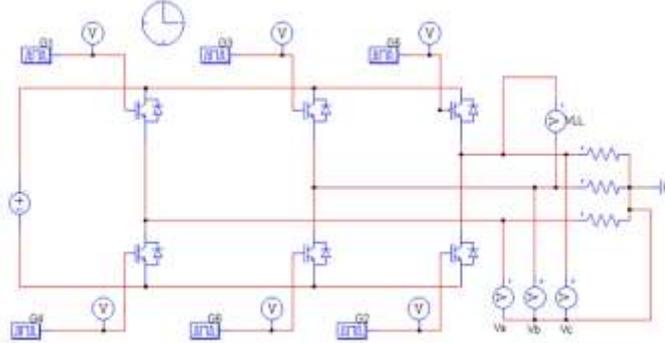
### D. Inverter Tiga Fasa

Inverter tiga fasa adalah sebuah perangkat elektronik yang digunakan untuk mengubah arus listrik DC menjadi arus listrik AC tiga fasa. Arus listrik tiga fasa memiliki tiga konduktor yang saling terpisah secara fasa sebesar 120° dan biasanya digunakan dalam sistem tenaga listrik industri atau komersial [15]. *Driver* inverter tiga fasa digunakan untuk mengontrol operasi motor induksi tiga fasa [16]. Untuk menentukan efisiensi daya dari inverter tiga fasa dapat menggunakan persamaan (1).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

Pada rangkaian inverter ini, digunakan perangkat semikonduktor Mosfet karena frekuensi *switching* yang tinggi dan kemampuan Mosfet dalam mengalirkan daya hingga mencapai 1 MVA. Untuk teknik pengendalian inverter, digunakan metode *switching space vector* PWM [17]. Dalam menentukan tipe transistor yang akan digunakan untuk inverter diperlukan perhitungan yang terdapat pada persamaan (2)

$$I_{motor} = \frac{P_{motor}}{\sqrt{3} \times V_{motor} \times \cos\theta} \quad (2)$$



Gambar 3: Rangkaian Inverter Tiga Fasa

Pada gambar 3 menunjukkan rangkaian inverter dengan beban resistor dimasing masing fasa yang digunakan untuk menjalankan motor BLDC. Data terkait gelombang tegangan keluaran RMS *line-line* dan *line-neutral* dapat menggunakan persamaan (3-4).

$$V_{ll \text{ teori}} = 0,6753 \times V_{in \text{ DC}} \quad (3)$$

$$V_{ln \text{ teori}} = 0,3898 \times V_{in \text{ DC}} \quad (4)$$

Pengaturan komutasi 120° berarti bahwa setiap saklar atau Mosfet di dalam inverter aktif selama 120° siklus dan tidak aktif selama siklus 240°. Tabel 1 dan 2 merupakan tabel yang menggambarkan kondisi saklar dalam inverter untuk mengatur putaran searah jarum jam dan berlawanan arah jarum jam pada motor BLDC [18]. Kondisi saklar di inverter ditentukan oleh informasi masukan dari sensor Hall yang diteruskan ke mikrokontroler.

TABEL I

KONFIGURASI SENSOR HALL SEARAH JAURM JAM

Hall3 (H3)	Hall2 (H2)	Hall1 (H1)	PWM C High	PWM C Low	PWM B High	PWM B Low	PWM A High	PWM A Low
1	0	1	0	1	0	0	1	0
1	0	0	1	0	0	0	0	1
1	1	0	1	0	0	1	0	0
0	1	0	0	1	1	0	0	0
0	1	1	0	0	1	0	0	1
0	0	1	0	0	0	1	1	0

TABEL II

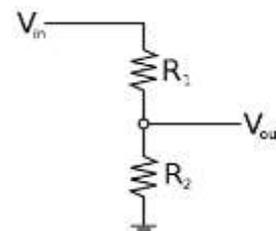
KONFIGURASI SENSOR HALL BERLAWANAN ARAH JARUM JAM

Hall3 (H3)	Hall2 (H2)	Hall1 (H1)	PWM C High	PWM C Low	PWM B High	PWM B Low	PWM A High	PWM A Low
1	0	1	1	0	0	0	0	1
1	0	0	0	1	0	0	1	0
1	1	0	0	1	1	0	0	0
0	1	0	1	0	0	1	0	0
0	1	1	0	0	0	1	1	0
0	0	1	0	0	1	0	0	1

Ketika sensor Hall mendeteksi kombinasi tertentu, sinyal PWM akan mengikuti kombinasi tersebut. Sebagai contoh, jika sensor Hall mendeteksi kombinasi 1 0 1, maka PWM A dan B akan aktif, sedangkan C akan berada dalam kondisi *floating*. Ketika sensor Hall mendeteksi kombinasi 0 0 1, maka PWM A dan C akan aktif, sementara B akan berada dalam kondisi *floating* dan seterusnya. Kondisi *floating* hanya terjadi dalam metode PWM *six-step*, sementara dalam metode PWM *sinusoidal*, kondisi *floating* mengacu pada perubahan sinyal *sinusoidal* dari positif ke negatif atau sebaliknya saat melewati nilai 0.

### E. Sensor Tegangan

Sensor tegangan adalah sebuah perangkat yang berfungsi untuk mengukur nilai tegangan dalam peralatan elektronik. Sensor tegangan biasanya terdiri dari sebuah rangkaian pembagi tegangan atau *voltage divider*. Data yang diperoleh dari sensor tegangan ini akan diarahkan ke *Analog-to-Digital Converter* (ADC) pada mikrokontroler untuk pengolahan lebih lanjut [19].



Gambar 4: Rangkaian Sensor Pembagi Tegangan

Gambar 4 merupakan rangkaian pembagi tegangan menggunakan dua buah resistor (R1 dan R2) yang dirangkai seri, dan kemudian dirangkain paralel dengan tegangan yang akan dibaca nilainya. Untuk menentukan nilai pembagi tegangan dari dua buah resistor dapat menggunakan persamaan (5).

$$V_{out} = \frac{R2}{R1+R2} \times V_{in} \quad (5)$$

### F. Sensor Arus

Sensor arus adalah perangkat yang mendeteksi arus listrik yang mengalir ke suatu beban. Sensor ini terdiri dari sebatang kawat yang dialiri arus listrik dan diletakkan di antara cincin toroid [20]. Beberapa kawat email juga dihubungkan ke cincin toroid, sehingga kumparan kawat pada cincin tersebut dapat menghasilkan arus induksi dari kawat yang dialiri arus. Data dari sensor ini kemudian diolah oleh mikrokontroler melalui pengonversi *Analog-to-Digital* untuk mendapatkan pembacaan arus yang akurat [21]. Gambar 5 merupakan bentuk modul sensor arus yang digunakan.



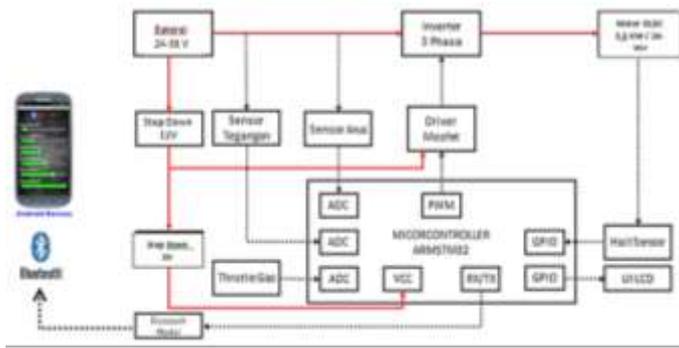


Gambar 5: Sensor Arus

### III. METODE PENELITIAN

#### A. Perancangan Sistem

Perancangan dan pembuatan sistem terdiri dari dua bagian, yaitu perangkat lunak (*software*) dan perangkat keras (*hardware*) untuk setiap bagian rangkaian sesuai blok diagram sistem. Adapun perancangan sistem inverter *six-step* untuk motor brushless direct current outrunner pada sepeda listrik ditunjukkan pada gambar 6.



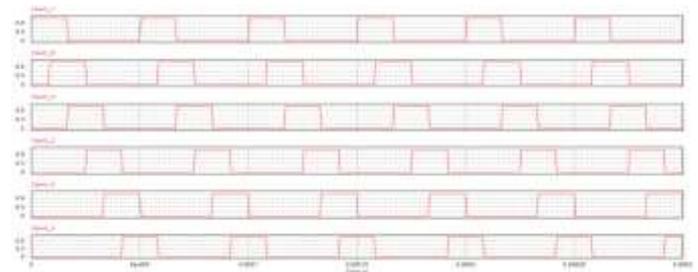
Gambar 6: Blok Diagram Sistem

Berdasarkan blok diagram tersebut dapat diketahui bahwa untuk tegangan DC dari baterai 36V diubah menjadi tegangan AC menggunakan inverter tiga fasa dan digunakan untuk sumber tegangan motor BLDC dengan spesifikasi 36V/2,3 kW. Rangkaian inverter berisi IGBT dan IR2110. Sinyal keluaran sensor Hall digunakan sebagai masukan untuk mikrokontroler. Hasil logika akan masuk ke mikrokontroler selanjutnya akan memerintahkan driver untuk menjalankan Mosfet sesuai dengan *switching* yang seharusnya untuk mengatur putaran motor BLDC. Selain itu, terdapat *throttle* untuk variabel masukan untuk mengatur kecepatan motor pada mikrokontroler. Inverter tiga fasa ini menggunakan komutasi 120° dengan metode *six-step* dan hanya berfokus pada perubahan frekuensi saja untuk mengatur tegangan keluaran. Untuk menyalakan mikrokontroler STM32 dibutuhkan suplai tegangan DC-DC *isolated* 36V to 5V. LCD digunakan untuk user interface pembacaan kecepatan motor, tegangan input dan arus pada baterai. Alat ini dilengkapi dengan modul *bluetooth*, sehingga memungkinkan mikrokontroler mengirimkan datanya pada *device* android melalui aplikasi yang digunakan [22]. Pengiriman data dilakukan secara *real-time* ketika sepeda dalam keadaan digunakan dan sudah tersambung ke perangkat android yang digunakan.

#### B. Perencanaan Inverter Tiga Fasa

Pada penelitian ini rangkaian inverter tiga fasa digunakan untuk merubah tegangan sumber yang berasal dari baterai

*lithium-ion* 36V/10Ah menjadi tegangan AC tiga fasa. Frekuensi *switching* diatur bekerja konstan pada frekuensi 30Hz dan frekuensi pencacahan pada 100kHz. Rangkaian inverter tiga fasa yang dibuat dihitung berdasarkan daya motor 3250 W dengan asumsi efisiensi dari inverter sebesar 85%. Berdasarkan persamaan, maka dihasilkan nilai daya *input* inverter  $P_{in} = 2762W$  dan arus nominal motor  $I_n = 90,72A$ . Berdasarkan hasil perhitungan, komponen Mosfet yang digunakan harus mempunyai kemampuan dilewati arus nominal motor tiap jalurnya. Pada penelitian ini Mosfet yang digunakan yaitu dengan tipe FDH210N08 sebanyak enam buah. Mosfet ini memiliki rating arus mencapai 210A dengan tegangan *drainsource* mencapai 75V. Setelah dilakukan simulasi, didapatkan sinyal *gate driver* untuk pensaklaran Mosfet pada inverter 3 fasa seperti pada gambar 7.

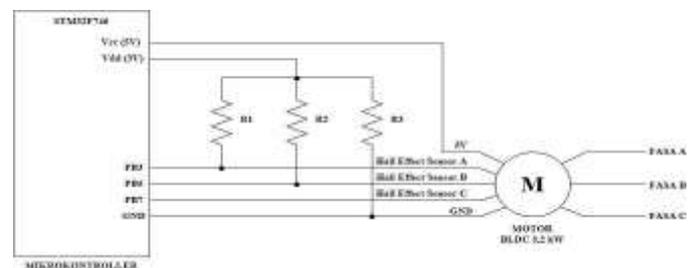


Gambar 7: Bentuk Respon Pulsa Pensaklaran 6 Mosfet

Dapat dilihat sinyal *gate driver* menunjukkan bahwa beda penyulutan tiap Mosfet adalah 60° dan setiap Mosfet melakukan komutasi sebesar 120°. Dapat diamati bahwa beda waktu penyulutan antara fase *high* (S1,S3,S5) dan *low* (S2,S4,S6) tiap Mosfet berbeda 120°. Sedangkan beda fase antara *high* dan *low* masing-masing Mosfet (S1 dan S4; S3 dan S6; S5 dan S2) yaitu sebesar 240°. Dengan menyulut Mosfet dengan komutasi 120°.

#### C. Perencanaan Sensor Elemen Hall

Perencanaan rangkaian untuk membaca sensor Hall terdapat rangkaian yang digunakan untuk menentukan pola *switching* pada motor BLDC.



Gambar 8: Rangkaian Pembacaan Sensor Hall

Pada gambar 8 terdapat tiga buah resistor yang memiliki nilai masing-masing 10 KΩ. Resistor tersebut mendapat suplai tegangan 3V dari mikrokontroler dan juga terhubung dengan sensor Hall pada motor BLDC. Pada sensor Hall A, B, dan C dihubungkan ke mikrokontroler sebagai masukan nilai parameter yang dibutuhkan. Pada rangkaian pembacaan sinyal sensor Hall ini membutuhkan suplai tegangan 5V.

#### D. Perencanaan Sensor Tegangan

Pada penelitian ini, sensor tegangan yang digunakan adalah rangkaian pembagi tegangan. Sensor ini digunakan untuk mendeteksi tegangan baterai 48V, sebagai sumber inverter tiga fasa yang akan digunakan sebagai pengendali kecepatan motor BLDC. Sensor tegangan yang dirancang pada penelitian ini sebesar 50V. Sehingga dapat diperoleh nilai resistor yang akan digunakan sebagai sensor tegangan dengan metode pembagi tegangan sesuai dengan persamaan (5) diperoleh nilai R1 sebesar 10KΩ dan R2 sebesar 680Ω.

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

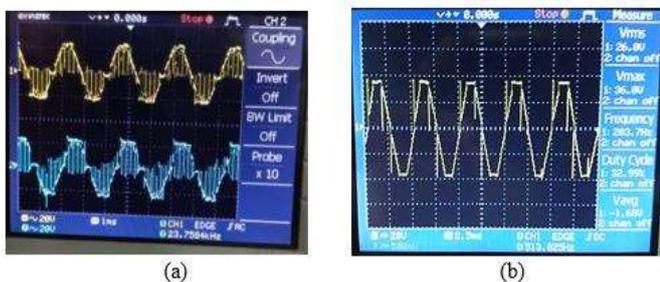
Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil pengujian sistem integrasi dengan sistem program yang telah direncanakan melalui hardware yang telah dibuat selanjutnya dilakukan pengujian dan analisa. Tujuan dari simulasi, pengujian dan analisa ini adalah untuk mengetahui keberhasilan dan kebenaran dari keseluruhan perencanaan alat dan program yang telah dirancang. Pengujian dilakukan pada masing-masing bagian terlebih dahulu, kemudian masing-masing bagian tersebut di uji secara integrasi keseluruhan. Setelah proses pengujian dan pengambilan data, langkah selanjutnya adalah menganalisa hasil pengujian tersebut.

##### A. Pengujian Parsial

Pengujian parsial dilakukan untuk menentukan apakah komponen-komponen dalam sistem yang telah dibuat berfungsi dengan efektif. Beberapa jenis pengujian parsial yang akan dilakukan mencakup pengujian berikut ini.

##### 1) Pengujian Inverter Tiga Fasa

Pengujian inverter tiga fasa komutasi 120° dengan beban motor BLDC sebesar 3,25kW diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada gambar. Dihasilkan bentuk gelombang *line-line* yang seharusnya berbentuk *six-step*. Dikarenakan beban yang digunakan berupa motor, maka menyebabkan gelombang yang dihasilkan tidak *six-step* secara sempurna.



Gambar 9: (a) Gelombang Tegangan *Line-Line* Fasa Vca & Vab pada Motor BLDC saat Dioperasikan (b) Gelombang Tegangan *Line-Line* Fasa Vbc

TABEL III

HASIL PENGUJIAN INVERTER TIGA FASA VL-L DENGAN BEBAN MOTOR

Vdc (V)	Idc (A)	VI-I rms uji			VI-I rms teori	Error (%)		
		Vab (V)	Vbc (V)	Vca (V)		Vab	Vbc	Vca

Muhammad Ali Maskur : Rancang Bangun Six Step ...

10	2,35	7,42	7,35	7,29	7,75	0,9	0,86	0,74
15	1,88	11,14	11,08	10,97	11,12	0,91	0,86	0,74
20	1,62	14,79	14,72	14,65	14,5	0,82	0,82	0,74
25	1,53	18,4	18,36	18,34	17,88	0,86	0,8	0,76
30	1,52	22,02	21,98	21,96	20,25	0,83	0,77	0,78
35	1,58	25,72	25,67	25,62	25,63	0,82	0,74	0,76
40	1,61	27,72	27,69	27,65	27,41	0,26	0,24	0,23
Rata – Rata Error Tiap Fasa						0,77	0,72	0,67
Rata- Rata Error Keseluruhan								

Pada tabel 3 didapatkan nilai tegangan *line-line* ( $V_{ll}$ ) pada masing-masing fasa (AB, BC dan AC) dimana pada perencanaan telah dijelaskan untuk teori dari tegangan *line-line*. Sehingga dari data pengujian tegangan *line-line* inverter tiga fasa pada tiap fasa dengan tegangan *line-line* secara teori didapatkan nilai error yang cukup rendah yaitu sekitar 0,75%. Setelah itu, dilakukan pengukuran tegangan pada masing-masing fasa.

##### 2) Pengujian Sensor Tegangan

Proses dari sensor tegangan ini yaitu tegangan masukan dari baterai yang masuk inverter tiga fasa sekitar 36V diubah menjadi tegangan ADC sekitar 3,3V. Pengujian sensor tegangan dilakukan dengan memberikan *sensing* tegangan *input* yang berasal dari *power supply*. Kemudian dilihat nilai tegangan pada keluaran sensor, yang terbaca pada mikrokontroler dengan membandingkan nilai tegangan pada alat ukur. Berikut merupakan data perbandingan hasil pembacaan sensor tegangan terhadap alat ukur voltmeter.

TABEL IV  
HASIL PENGUJIAN SENSOR TEGANGAN

Nilai Tegangan Alat Ukur (V)	Nilai Tegangan Sensor (V)	Error (%)
5	5,08	1,60
10	10,13	1,30
16	16,04	0,25
20	20,02	0,10
26	26,05	0,19
30	30,07	0,23
36	36,10	0,27
40	40,12	0,30
46	46,15	0,32
50	50,17	0,34
Rata – rata Error		0,49

Berdasarkan tabel 4 dapat dilihat bahwa ketelitian rangkaian sensor pembagi tegangan dalam mengukur nilai tegangan memiliki kesalahan *error* yang kecil sebesar 0,49 %.

##### 3) Pengujian Sensor Arus

Sensor arus digunakan untuk mendeteksi arus keluaran baterai yang masuk ke inverter tiga fasa. Tujuan dari pengujian ini untuk mengetahui hasil pembacaan dari sensor arus pada saat mendeteksi arus. Pengujian dilakukan dengan menghubungkan ACS712 ke *input power supply* yang dipasang seri .

p-ISSN:1693 – 2951; e-ISSN: 2503-2372



TABEL V  
HASIL PENGUJIAN SENSOR ARUS

Nilai Arus Alat Ukur (V)	Nilai Arus Sensor (A)	Error (%)
0,25	0,26	4,00
0,42	0,42	0,00
0,59	0,58	0,25
0,76	0,75	1,32
1,02	1,03	0,98
1,19	1,21	1,68
1,45	1,44	0,69
1,63	1,63	0,00
1,89	1,88	0,53
2,06	2,05	0,49
Rata – rata Error		0,994

Berdasarkan tabel 5 dapat dilihat bahwa ketelitian sensor ACS712 dalam mengukur nilai arus memiliki kesalahan *error* yang kecil sebesar 0,994 %.

**B. Pengujian Integrasi**

Pengujian integrasi adalah pengujian terhadap sistem keseluruhan dengan tujuan memastikan bahwa setiap komponen sistem beroperasi dengan efektif dan mendukung fungsionalitas satu sama lain. Terdapat dua pengujian yaitu pengujian integrasi sistem kontrol motor tanpa beban mekanik dan pengujian integrasi sistem kontrol motor dengan beban mekanik.

**1) Pengujian Integrasi Sistem Kontrol Motor Tanpa Beban Mekanik**

Pada pengujian integrasi sistem yang pertama yaitu dilakukan pengujian integrasi sistem pada motor BLDC tanpa beban menggunakan Motor jenis *sensored* (menggunakan sensor Hall) untuk penentu komutasinya. Motor yang digunakan memiliki spesifikasi tegangan 36V dengan daya 3250W. Pada pengujian motor BLDC secara *sensored* kali ini yaitu mengatur tegangan masukan inverter dan frekuensi pencacahan sebesar 10kHz dengan *duty cycle* 100%. Kemudian diamati nilai kecepatan, Tegangan baterai, arus, dan daya input pada inveter. Rangkaian pengujian motor BLDC *sensored* ditunjukkan pada gambar 10.



Gambar 10: Pengujian Motor BLDC *Sensored* Tanpa Beban

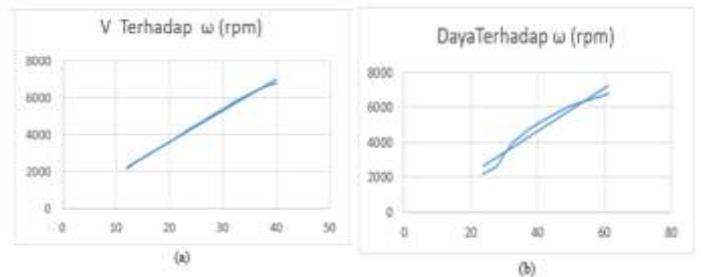
Pengujian motor BLDC dilakukan dengan mengambil data perubahan tegangan terhadap kecepatan dan perubahan daya terhadap kecepatan. Dengan kenaikan nilai tegangan input inverter sebesar 2V, didapatkan hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 6.

TABEL VI  
HASIL PENGUJIAN KONTROL MOTOR TANPA BEBAN MEKANIK

Vdc (V)	Idc (A)	P (W)	$\omega$ (rpm)
---------	---------	-------	----------------

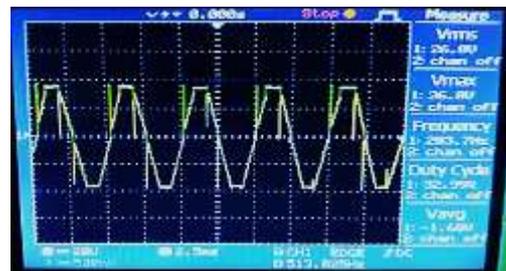
12	2,12	23,6	2160
14	1,91	27,5	2546
16	1,76	28,8	2900
18	1,62	29,6	3266
20	1,53	31,2	3626
22	1,48	32,2	3986
24	1,46	35	4337
26	1,43	37,3	4689
28	1,42	39,8	5040
30	1,42	43,1	5400
32	1,46	46,3	5743
34	1,48	50,2	6094
36	1,53	54,2	6354
38	1,61	60	6654
40	1,61	61,2	6814

Dari tabel 6 berupa hasil pengujian kontrol motor tanpa beban mekanik, dapat diperoleh grafik perubahan tegangan *input* terhadap kecepatan pada Gambar 11 (a), dan grafik daya *input* terhadap kecepatan pada Gambar 11 (b).



Gambar 11: (a) Grafik Perubahan Tegangan *Input* Terhadap Kecepatan Motor BLDC *Sensored* Kondisi Tanpa Beban. (b) Grafik Daya *Input* Terhadap Kecepatan Motor BLDC *Sensored* Kondisi Tanpa Beban.

Selain memperhatikan respon kecepatan dan daya input inverter, dilakukan juga pengamatan bentuk gelombang fasa dan *line-line*. Selain itu, kecepatan dari motor BLDC juga diukur dimana didapatkan nilai RPM saat tegangan masukan ( $V_{in}$ ) yang dihasilkan Pengamatan dilakukan pada saat tegangan input baterai 36V. Pada gambar 12 merupakan gambar gelombang *line-line* pada fasa AC. Gambar diambil pada saat tegangan input baterai 36V dan menghasilkan kecepatan 6000 rpm yang terlihat pada data tegangan maksimum ( $V_{max}$ ) di tampilan osiloskop.



Gambar 12: Gelombang Fasa AC *Line-Line*

**2) Pengujian Integrasi Sistem Kontrol Motor dengan Beban Mekanik**

Pada pengujian integrasi sistem kondisi berbeban, beban yang digunakan yaitu beban ban sepeda dengan disertai rangka mekanik sepeda. Pengujian berbeban bertujuan untuk mengetahui respon kecepatan terhadap tegangan input inverter

dan respon kecepatan terhadap daya *input* inverter. Pengujian kali ini menggunakan motor yang sama dan teknik yang sama dengan kondisi tanpa beban yaitu memberikan masukan tegangan input yang berbeda dengan kenaikan tegangan tiap 5V dari 15V sampai 40V dan *throttle* dalam kondisi 100%. Berikut adalah gambar yang menunjukkan situasi pengujian tampak pada gambar 13.



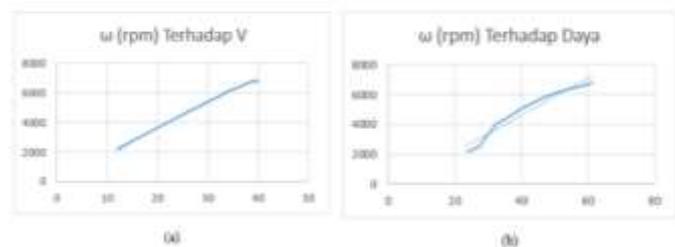
Gambar 13: Pengujian Kontrol Motor dengan Beban Mekanik

Pengujian penggerak motor BLDC dengan beban mekanik dilakukan dengan kondisi throtel 100% dan didapatkan hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 7.

TABEL VII  
 HASIL PENGUJIAN KONTROL MOTOR DENGAN BEBAN MEKANIK

Vdc (V)	Idc (A)	P (W)	$\omega$ (rpm)
15	4,91	73,75	1500
20	4,12	82,4	2027
25	4,2	105	2879
30	4,3	130	3100
35	4	140	4026
40	3,9	156	4650

Dari tabel hasil percobaan bisa diperoleh grafik perubahan tegangan *input* terhadap kecepatan pada gambar 14 (a), dan grafik daya *input* terhadap kecepatan pada gambar 14 (b).



Gambar 14: (a) Grafik Perubahan Tegangan Input Terhadap Kecepatan Motor BLDC Sensored Kondisi Dengan Beban Mekanik. (b) Grafik Daya Input Terhadap Kecepatan Motor BLDC Sensored Kondisi Beban Mekanik

Setelah melakukan pengujian dengan beban mekanik, selanjutnya dilakukan pengujian menggunakan beban satu pengendara pada mekanik sepeda listrik. Pengujian ini dilakukan dengan pengendara menaiki sepeda tersebut dengan kecepatan *throttle* yang berubah mulai dari kondisi 0% sampai 100%. Pengujian kecepatan ini membandingkan antara

pembacaan kecepatan pada layar LCD. Berikut data hasil pengujian kecepatan dapat dilihat pada tabel 8 dan grafik kecepatan terhadap *duty cycle throttle* pada sepeda listrik pada gambar 15.

TABEL VIII  
 PENGUJIAN KECEPATAN SEPEDA LISTRIK

Duty Cycle Throttle (%)	Pembacaan LCD (km/jam)
0	0
10	8,20
20	12,0
30	14,3
40	17,0
50	19,3
60	21,9
70	23,2
80	26,0
98,5	28,0
100	30,0



Gambar 15: Grafik Perubahan Kecepatan Sepeda Listrik dengan *Throttle*

Dari grafik kecepatan motor BLDC terhadap *throttle*, dapat dilihat bahwa bentuk garis kurva adalah eksponensial keatas. Hal ini terjadi karena nilai *throttle* merupakan resistor yang mempengaruhi nilai besarnya dari *duty cycle* yang keluar dari mikrokontroler yang masuk pada *driver* Mosfet. Sehingga tegangan keluaran dari inverter semakin besar dan putaran kecepatan motor juga semakin meningkat. Hasil pengujian dikirim melalui aplikasi *monitoring* berbasis android. Penggunaan *internet of things* pada sistem sangat berguna dalam beberapa hal yaitu dapat melakukan monitoring dengan kondisi kendaraan listrik pada saat berjalan. Tampilan *user interface* pada aplikasi monitoring ditunjukkan pada gambar 16.





Gambar 17: Gambar Tampilan User Interface Aplikasi Android

Berdasarkan gambar 16, aplikasi *monitoring* dapat menampilkan data parameter pengukuran yang terdiri dari waktu pengambilan data, tegangan, arus, daya, dan kecepatan laju kendaraan saat berjalan. Sistem *monitoring* pada aplikasi android ini dilengkapi juga dengan data *logger* yang dimana dapat menyimpan data secara langsung.

## V. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan yaitu, sistem motor *brushless direct current outrunner*, dengan menggunakan *six-step* inverter dirancang menyerupai sepeda listrik lipat berbasis android sebagai tampilan monitoring. Sistem ini terdapat inverter tiga fasa yang dengan hasil kesalahan *error* sebesar 0,75 %. Selain itu terdapat sensor tegangan dengan kesalahan *error* sebesar 0,49 % dan sensor arus sebesar 0,994 %. Semakin besar tegangan *input* inverter maka semakin besar pula kecepatan motor yang dihasilkan. Sepeda listrik dapat melaju dengan kecepatan maksimum 30 km/jam. Data pengukuran berupa tegangan baterai, arus, daya, terkirim secara *real-time* pada aplikasi android yang digunakan pada sepeda listrik.

## REFERENSI

- [1] N. B. Hung and O. Lim, "A review of history, development, design and research of electric bicycles," *Appl. Energy*, vol. 260, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114323.
- [2] D. Mohanraj *et al.*, "A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 54833–54869, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3175011.
- [3] K. F. I. Faruque, N. Nawshin, M. F. Bhuiyan, M. R. Uddin, M. Hasan, and K. M. Salim, "Design and Development of BLDC controller and its Implementation on E-Bike," in *2018 International Conference on Recent Innovations in Electrical, Electronics & Communication Engineering (ICRIEECE)*, Jul. 2018, pp. 1461–1465. doi: 10.1109/ICRIEECE44171.2018.9008597.
- [4] R. Pradhana, A. A. Rahman, O. A. Qudsi, and I. Ferdiansyah, "Desain dan Implementasi Pengaturan Kecepatan Motor BLDC Dengan Metode FOC Menggunakan Fuzzy," *JIT (Jurnal Teknol. Terpadu)*, vol. 11, no. 1, pp. 33–39, Apr. 2023, doi: 10.32487/jtt.v11i1.1524.
- [5] H. Y. Al-Faruq and H. Septanto, "A comparison between six-step and sine-wave commutation methods for brushless direct current motors," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 13, no. 2, p. 665, Jun. 2022, doi: 10.11591/ijpeds.v13.i2.pp665-673.
- [6] H.-C. Wu, M.-Y. Wen, and C.-C. Wong, "Speed control of BLDC motors using hall effect sensors based on DSP," in *2016 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, Jul. 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICSSE.2016.7551633.
- [7] M. K. Sari, W. Hadi, and W. Cahyadi, "Analisis Motor Brushless Direct Current Aksial Fluks 3 Fasa Menggunakan Magen

- Permanen Neodymium Sebagai Prime Mover Generator," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 19, no. 2, p. 195, Dec. 2020, doi: 10.24843/MITE.2020.v19i02.P11.
- [8] F. Auliansyah, Sutedjo, O. Asrarul Qudsi, and I. Ferdiansyah, "Controlling Speed Of Brushless DC Motor By Using Fuzzy Logic Controller," in *2020 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic)*, Sep. 2020, pp. 298–304. doi: 10.1109/iSemantic50169.2020.9234290.
- [9] I. Sholikha, S. D. Nugraha, O. A. Qudsi, E. Purwanto, G. Prabowo, and I. Ferdiansyah, "PENGATURAN KECEPATAN MOTOR BLDC SENSORLESS MENGGUNAKAN FOC," *Power Elektron. J. Orang Elektro*, vol. 11, no. 2, p. 162, Jul. 2022, doi: 10.30591/polekro.v12i1.2960.
- [10] Pawenary, S. Azzahra, H. Azis, H. Andre, and A. S. Prabuwo, "Comparison design of electric motorcycles using hybrid systems (BLDC motor) on 150Cc motorcycles based on parameter testing," 2023, p. 060001. doi: 10.1063/5.0116826.
- [11] Sutedjo, Ony Asrarul Qudsi, Suharningsih, and Diah Septi Yanaratri, "DESAIN DAN IMPLEMENTASI SIX-STEP COMUTATION PADA SISTEMKONTROL MOTOR BLDC 1,5 kW," *Pros. Sentrinov Tahun 2017*, vol. 3 –ISSN: 2, pp. 261–273, 2017.
- [12] M. R. Rusli *et al.*, "BLDC Motor Drives with A Programmable Simplified C-Block to Generate Accurate Six-Step PWM Based on STM32 Microcontroller," *Elinvo (Electronics, Informatics, Vocat. Educ.)*, vol. 7, no. 2, pp. 112–118, Jan. 2023, doi: 10.21831/elinvo.v7i2.52992.
- [13] G. Prabowo, I. Ferdiansyah, E. Purwanto, and M. Budiono, "An Effective Approach of Speed Estimation Using Position Detector on Six Step Inverter for Trapezoidal PMSM Drive," in *2022 International Conference on Electrical and Information Technology (IEIT)*, Sep. 2022, pp. 260–266. doi: 10.1109/IEIT56384.2022.9967882.
- [14] T. Nama, A. K. Gogoi, and P. Tripathy, "Application of a smart hall effect sensor system for 3-phase BLDC drives," in *2017 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS)*, Oct. 2017, pp. 208–212. doi: 10.1109/IRIS.2017.8250123.
- [15] S. H. Samudera, M. M. Rifadil, I. Ferdiansyah, S. D. Nugraha, O. A. Qudsi, and E. Purwanto, "Three Phase Induction Motor Dynamic Speed Regulation Using IP Controller," in *2020 3rd International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)*, Dec. 2020, pp. 406–411. doi: 10.1109/ISRITI51436.2020.9315340.
- [16] A. A. Muntashir, E. Purwanto, and S. D. Nugraha, "Rancang Bangun Inverter 3 Fasa dengan Metode V/F Scalar Control pada Mobil Listrik," *INOVTEK - Seri Elektro*, vol. 2, no. 2, p. 102, Aug. 2020, doi: 10.35314/ise.v2i2.1334.
- [17] Y. Lee and J. Kim, "Analysis of the Three-Phase Inverter Power Efficiency of a BLDC Motor Drive Using Conventional Six-Step and Inverted Pulsewidth Modulation Driving Schemes," *Can. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 42, no. 1, pp. 34–40, 2019, doi: 10.1109/CJEECE.2018.2885351.
- [18] A. Mousmi, A. Abbou, and Y. El Houm, "Binary Diagnosis of Hall Effect Sensors in Brushless DC Motor Drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 4, pp. 3859–3868, Apr. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2934794.
- [19] F. Garnacho, A. Khamlich, and J. Rovira, "The Design and Characterization of a Prototype Wideband Voltage Sensor Based on a Resistive Divider," *Sensors*, vol. 17, no. 11, p. 2657, Nov. 2017, doi: 10.3390/s17112657.
- [20] A. Rahmadani and A. A. Prastiyo, "Sistem Pendeteksi Arc Flash Pada Sambungan Jaringan Tegangan Rendah Dengan Sensor LDR Berbasis Telegram," *J. Teknol. Elektro*, vol. 14, no. 1, p. 18, Feb. 2023, doi: 10.22441/jte.2023.v14i1.004.
- [21] A. Rahmadani, N. A. Windarko, and L. P. S. Raharja, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Suhu dan Kelembapan serta Kendali Dua Heater pada Kubikel 20 kV Berbasis Sistem Informasi Geografis," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 21, no. 2, p. 219, Dec. 2022, doi: 10.24843/MITE.2022.v21i02.P09.
- [22] A. I. Pradana *et al.*, "Manajemen dan Pemantauan Energi Motor BLDC pada Mobil Listrik Berbasis IoT," *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, vol. 7, no. 4, pp. 444–450, 2018, doi: 10.22146/jnteti.v7i4.463.