

## Simulasi Kinerja Motor BLDC untuk Merancang Sistem Kelistrikan Mobil Hemat Energi Menggunakan Simulink

### *Simulation of BLDC Motor Performance for Designing an Electrical System of Energy-Efficient Car Using Simulink*

SATRIO WAHYUBRAMANTO<sup>1\*</sup>, SHEILA TOBING<sup>1</sup>, YOHANES ADEATMA ANTONIO<sup>1</sup>

#### Abstrak

Kontes Mobil Hemat Energi (KMHE) merupakan lomba tingkat nasional yang diselenggarakan oleh Kementerian Riset dan Teknologi Indonesia yang bertujuan untuk mewadahi kreativitas mahasiswa seluruh Indonesia dalam merancang, membangun, menguji dan menyelenggarakan kompetisi mobil hemat energi yang aman dan ramah lingkungan. Peserta dari kegiatan ini adalah seluruh mahasiswa teknik di Indonesia. Penelitian ini membahas mengenai rancang bangun sistem kelistrikan mobil hemat energi yang telah sesuai regulasi KMHE 2019. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah melalui simulasi Simulink MATLAB dengan menggunakan sistem kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID). Hasil simulasi dengan program Simulink MATLAB R2020b menunjukkan bahwa motor BLDC dengan kecepatan putar 100-900 rpm menghasilkan torsi motor sebesar 30 Nm dan memiliki daya sekitar 960 W. Hal ini menunjukkan bahwa motor BLDC telah melebihi kebutuhan perancangan mobil listrik.

Kata Kunci: KMHE, motor BLDC, ramah lingkungan, sistem kelistrikan, torsi motor.

#### Abstract

*Kontes Mobil Hemat Energi (KMHE) is a national-level competition organized by the Indonesian Ministry of Research and Technology. KMHE aims to accommodate students' creativity throughout Indonesia in designing, building, testing, and competing for energy-efficient cars that are safe and environmentally friendly. The participants of this competition are all engineering students from all over Indonesia. This research discusses the design of an energy-efficient car electrical system according to the 2019 KMHE regulations. The method used in this research is through Simulink MATLAB simulation using a Proportional Integral Derivative (PID) control system. The simulation results with the MATLAB R2020b Simulink program show that a BLDC motor with a rotating speed of 100-900 rpm produces a motor torque of 30 Nm and has a power of about 960 W. This shows that the BLDC motor has exceeded the design needs of an electric car.*

*Keywords: BLDC motor, electrical system, environmentally friendly, KMHE, motor torque.*

## PENDAHULUAN

Kementerian Riset dan Teknologi Indonesia telah menyelenggarakan lomba tingkat nasional yang berjudul Kontes Mobil Hemat Energi (KMHE). Peserta dari kegiatan ini merupakan mahasiswa teknik dari seluruh Indonesia. Kontes ini bertujuan untuk mewadahi kreativitas mahasiswa di seluruh Indonesia dalam merancang, membangun, menguji dan menyelenggarakan kompetisi mobil hemat energi yang aman dan ramah lingkungan. Melalui perlombaan ini, mahasiswa dapat mengaplikasikan seluruh ilmu yang telah dipelajari pada masa kuliah, meningkatkan kreativitas serta melatih *soft skill* dan *hard skill*.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan simulasi dengan Simulink mengenai penggunaan motor BLDC, serta rancang bangun sistem kelistrikan mobil hemat energi yang

<sup>1</sup>Prodi Teknik Mesin Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya Banten, 021-80827200;

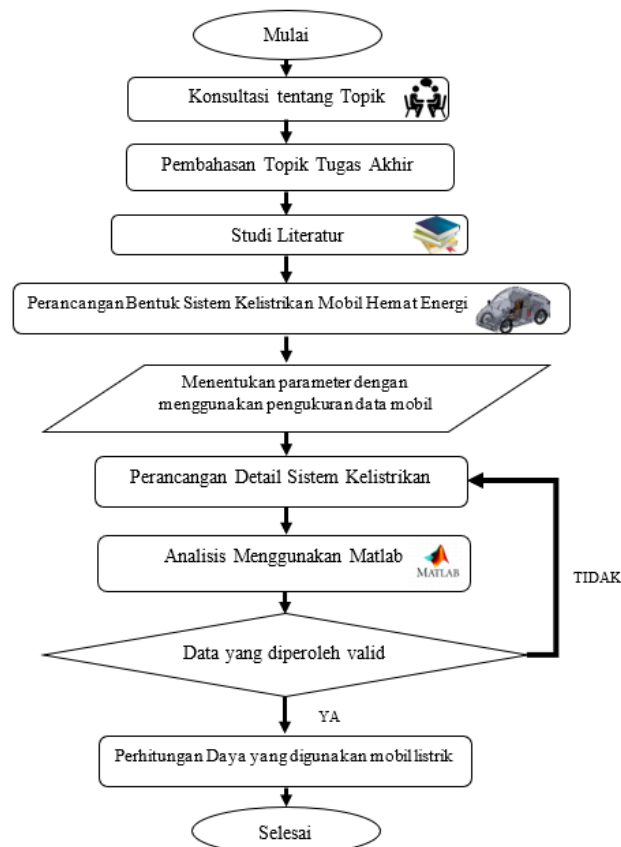
\*Penulis Korespondensi: Tel/Faks: 081250876102; Surel: [satrio.2016041034@student.atmajaya.ac.id](mailto:satrio.2016041034@student.atmajaya.ac.id)

akan digunakan untuk mengikuti Kontes Mobil Hemat Energi (KMHE) 2021. Perancangan sistem kelistrikan akan mengikuti regulasi KMHE karena ketentuan regulasi menjadi syarat utama mobil listrik yang dirancang dapat mengikuti perlombaan dan aman untuk dikendarai oleh pengemudi (Universitas Negeri Malang 2019). Motor BLDC menggunakan jenis komutator listrik daripada komutator mekanis. Fitur ini membuktikan bahwa motor BLDC lebih andal dari motor DC. Pada motor BLDC, magnet rotor menghasilkan fluks magnet yang dapat membuat efisiensi menjadi lebih tinggi (Madur dan Debre 2017).

Kategori yang dilombakan pada KMHE terbagi menjadi dua jenis yaitu, *Prototype* dan *Urban Concept*. Untuk *Prototype*, kendaraan yang dibuat memiliki desain khusus yang mengoptimalkan aerodinamiknya. Sedangkan pada kategori *Urban Concept*, kendaraan yang dibuat memiliki tampilan seperti mobil pada umumnya dan sesuai untuk berkendara di jalan. Kelas mesin penggerak yang digunakan untuk dua kategori tersebut dapat menggunakan Motor Pembakaran Dalam (MPD) Gasoline, MPD Diesel, MPD Etanol dan Motor Listrik. Tim Workshop Mesin (WSM) mengikuti kategori *Urban Concept* dengan mesin penggerak Motor Listrik.

## METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah melalui simulasi Simulink MATLAB dengan menggunakan sistem kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID). Simulasi penelitian dilakukan dengan memerhatikan parameter yang dibutuhkan pada perhitungan daya, torsi dan jumlah putaran per menit (*rotations per minute* (rpm)) yang ada. Voltase yang diberikan yaitu 48 V dan *desired input* yaitu berkisar antara 100-600 rpm. Hal ini sesuai dengan spesifikasi motor BLDC yang dimiliki tim WSM yang memiliki 600 rpm dan daya 1000 W. Melalui simulasi akan dilihat respon sistem dari motor BLDC dan juga dapat dilihat hasil torsi yang terjadi pada simulasi. Tahap penelitian mengikuti diagram alir yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian.

Dasar pemikiran dalam pemilihan motor listrik sebagai penggerak mobil listrik adalah bahwa motor listrik tersebut harus mampu menghasilkan torsi *starting* yang tinggi dengan arus yang rendah (Carrier *et al.* 2011). Asumsi dilakukan berdasarkan penelitian Universitas Florida mengenai mobil pada Shell Eco Marathon (Carrier *et al.* 2011), telah disesuaikan dengan kondisi kendaraan dan lingkungan di lokasi penyelenggaraan KMHE 2019. Hal ini dilakukan agar dapat memenuhi tujuan dan batasan masalah yang ada, berikut ini merupakan perhitungan sesuai dengan parameter yang ada (Tabel 1).

Tabel 1 Parameter Perhitungan yang digunakan (Carrier *et al.* 2011)

Parameter	Nilai
Frontal Area of Car ( $S$ )	1.69 (m <sup>2</sup> )
Percent Grade ( $P_G$ )	3
Vehicle Mass ( $m$ )	200 (kg)
Drivetrain Efficiency	0.8
Tire Rolling Resistance coefficient ( $C_{rr}$ )	0.004
Brake and steering resistance ( $C_{BSR}$ )	0.003
Drag Coefficient ( $C_D$ )	0.3
Air Density ( $\rho$ )	1.225 (kg/m <sup>3</sup> )
Wheel Radius	0.401 (m)

Beberapa gaya luar yang bekerja pada mobil terdiri dari gaya akibat gesekan udara (*Fair\_resistance*), gaya akibat hambatan saat bergulir (*Frolling\_resistance*), gaya akibat berat paralel mobil pada jalanan miring (*Fincline*) (Acosta *et al.* 2012). Jumlah dari gaya-gaya tersebut merupakan gaya *drag* yang bekerja pada mobil (Persamaan 1-5).

$$F_{air\_resistance} = 0,5 \times C_D \times A \times \rho \times V^2 \quad (1)$$

$$F_{rolling\_resistance} = m g (C_{rr} + C_{BSR}) \quad (2)$$

$$F_{incline} = m \times g \times P_G \quad (3)$$

$$F_{drag} = \Sigma F = F_{air\_resistance} + F_{rolling\_resistance} + F_{incline} \quad (4)$$

$$P_{constant} = F_{drag} \times V \quad (5)$$

Tabel 2 Data Kebutuhan Daya Mobil

Kecepatan (V) km/jam	<i>Fair_resistance</i> (N)	<i>Frolling_resistance</i> (N)	<i>Fincline</i> (N)	<i>Fdrag</i> (N)	<i>Pconstant</i> (N)
10	2.382723	13.734	58.86	74.97672	207.6855
20	9.565331	13.734	58.86	82.15933	455.9843
30	21.54786	13.734	58.86	94.14186	784.2017
40	38.3303	13.734	58.86	110.9243	1232.369
50	59.82642	13.734	58.86	132.4204	1837.995

Berdasarkan Tabel 2, untuk mencapai kecepatan 50 km/jam dibutuhkan daya sebesar 1837.995 W. Pada perlombaan KMHE kecepatan kendaraan berkisar antara 20-30 km/jam, daya yang dibutuhkan adalah sekitar 455.9843 W – 784.2017 W. Selain data pada Tabel 2, perlu juga diketahui torsi minimal yang diperlukan untuk menggerakkan kendaraan dengan rumus:

$$P = T_x \frac{2\pi\omega}{60} \quad (6)$$

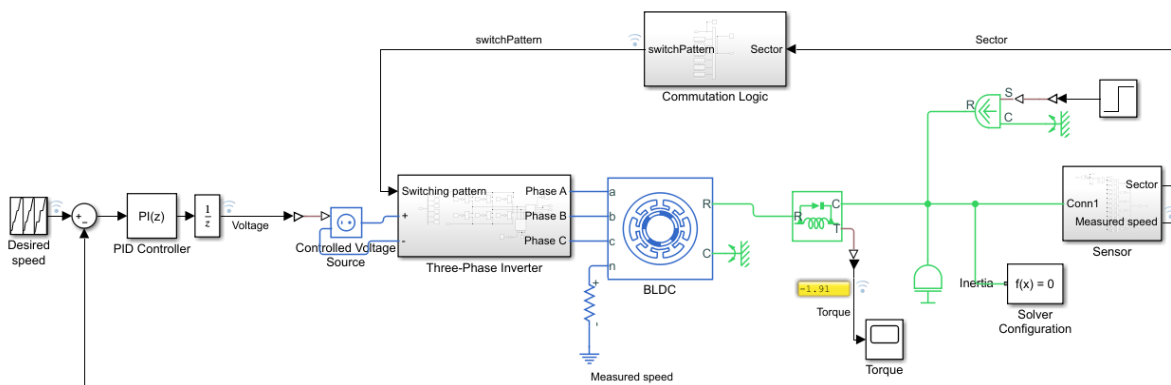
Kecepatan sudut/putaran mesin diasumsikan berdasarkan hasil tes 400 rpm pada kecepatan 20 km/jam dan 600 rpm pada 30 km/jam, maka didapat data torsi yang dibutuhkan (Tabel 3).

Tabel 3 Data Kebutuhan Torsi Mobil (Carryer *et al.* 2011)

V (km/jam)	P (Watt)	$\omega$ (rpm)	T (Nm)
10	207.6855	200	9.91
20	455.9843	400	10.88
30	784.2017	600	12.48
40	1232.369	700	16.81
50	1837.995	900	19.5

Terdapat beberapa jenis motor DC, namun motor listrik yang paling efisien adalah *Brushless Direct Current* atau biasa disebut BLDC, sehingga dipilih motor BLDC karena membutuhkan arus listrik DC 3 gelombang fase (Haryadi 2012). Lithium-Ion digunakan sebagai baterai untuk *power supply* karena baterai ini memiliki massa yang ringan, namun dapat menghasilkan energi yang lebih besar, di dalam baterai ini memakai senyawa lithium interkalasi sebagai bahan elektrodanya, berbeda dengan lithium metalik yang dipakai baterai lithium non-isi ulang (Afif dan Pratiwi 2015). Eksperimen yang dilakukan adalah dengan model simulasi untuk mendapatkan karakteristik Motor BLDC menggunakan salah satu *software* dari MATLAB yaitu Simulink sehingga model yang dibuat dapat dikalkulasikan rancangan modelnya melalui *software* dan *hardware* (Arifin dan Amir 2010). Sistem kontrol PID digunakan pada sistem Simulink sebagai kompensator atau suatu alat yang digunakan untuk kompensasi, yaitu memodifikasi suatu sistem yang dinamik sehingga memiliki spesifikasi yang kita inginkan, kontrol PID dapat dipahami sebagai sistem pengendali yang memperhitungkan kesalahan atau *error* yang terjadi pada masa sekarang, lampau dan juga di masa depan (Mituhiko 1971).

Pada penelitian yang dilakukan, dirancang bentuk sistem kelistrikan mobil hemat energi dan juga dibuat sistem simulasi Simulink MATLAB R2020b, kemudian dianalisis serta diperhitungkan data yang diperoleh. Pada sistem simulasi Simulink kontrol PID diletakkan di bagian awal sebelum memasuki sistem *plant* yaitu motor BLDC. Hal ini agar setelah nilai sinyal masuk ke BLDC kemudian keluar *output* dan kemudian diukur dengan sensor maka *feedback* masuk ke kontrol PID sebagai referensi perubahan yang kemudian akan mengurangi kesalahan pada masa sekarang, sebelum dan juga di masa depan (Gambar 2).



Gambar 2 Diagram Blok Kontroler PID pada Motor BLDC.

Pengujian dilakukan dengan mengikuti model matematis yang terdapat pada Simulink Matlab R2020b (Mathworks 2020), sehingga dapat diperkirakan keakuratan simulasi yang dilakukan. Berdasarkan analisis yang dilakukan dapat diasumsikan (Yue dan Bai 2014) bahwa: (1) Stator dengan lilitan  $60^\circ$  memiliki *full-pitch winding*, (2) Efek *slot* dan saturasi magnetik sirkuit tidak dipertimbangkan, (3) Kelambatan magnet, aliran turbulen, efek dari kumpulan kulit tembaga, dan dampak pada parameter suhu dapat diabaikan, (4) Belitan stator tiga fase berbentuk simetris,  $R_a = R_b = R_c = R$ ,  $L_a = L_b = L_c = L$ ,  $M_{ab} = M_{bc} = M_{ca} = M$ .

Setiap resistansi dilambangkan  $R$ , untuk setiap induktansi dilambangkan  $L$ , dua induktansi yang saling berdekatan dilambangkan  $M$ . Persamaan keseimbangan tegangan stator tiga fase dapat dinyatakan dengan Persamaan 7.

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_n \\ U_n \\ U_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

Karena dalam motor listrik tiga fase yang simetris terdapat  $i_a+i_b+i_c=0$ , maka  $Mi_a+Mi_b+Mi_c=0$ , maka dari itu persamaan keseimbangan tegangan ditunjukkan pada Persamaan 8.

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_n \\ U_n \\ U_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

Torsi elektromagnetik dari BLDC dihasilkan oleh interaksi arus pada lilitan stator dan medan magnet pada magnet rotor. Persamaan torsi elektromagnetik ditunjukkan pada Persamaan 9.

$$T_e = \frac{1}{\omega} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (9)$$

Persamaan gerak mekanik motor ditampilkan pada Persamaan 10.

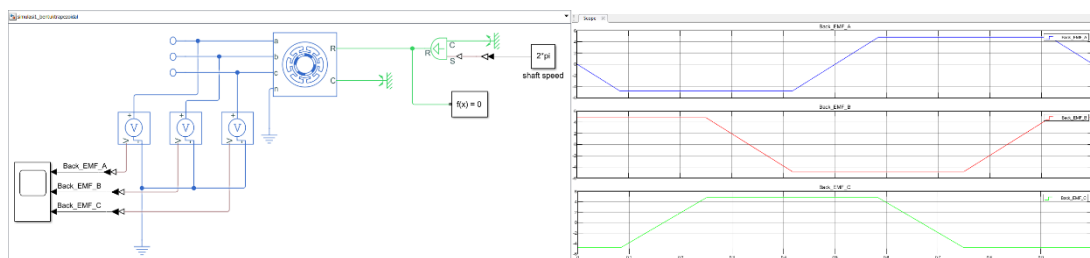
$$T_e - T_L - B\omega = J \frac{d\omega}{dt} = JP\omega \quad (10)$$

dengan  $T_e$  adalah torsi elektromagnetik,  $T_L$  adalah beban torsi,  $B$  adalah koefisien redaman,  $\omega$  adalah kecepatan motor,  $J$  adalah inersia rotasi rotor dan beban. Maka, dapat ditetapkan model matematika lengkap dari motor BLDC.

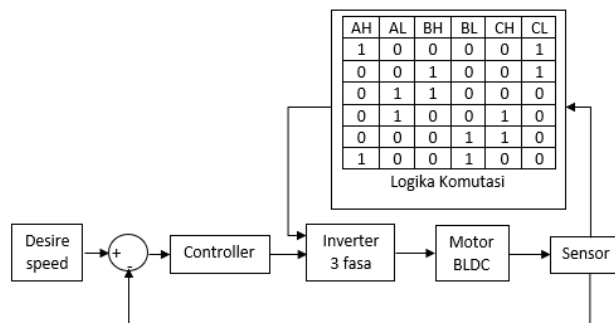
### HASIL DAN PEMBAHASAN

Model simulasi sistem kendali ini menggunakan rancangan kendali *loop* tertutup. *Link* arus listrik menggunakan PID regulator. Regulator PID memiliki keunggulan algoritma sederhana, presisi tinggi, keandalan yang kuat untuk sistem kontrol yang dapat membentuk model matematika yang tepat.

Pada motor BLDC gelombang yang dihasilkan yaitu berupa gelombang yang berbentuk *trapezoidal* pada *back-EMF*, yang dikontrol oleh *trapezoidal control* (Gambar 3).

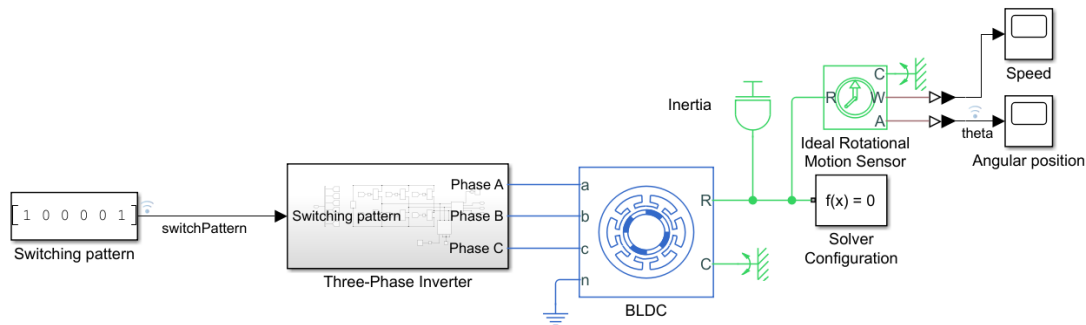


Gambar 3 Sistem Simulink dan Hasil Bentuk Gelombang Tiap Fase Motor BLDC.



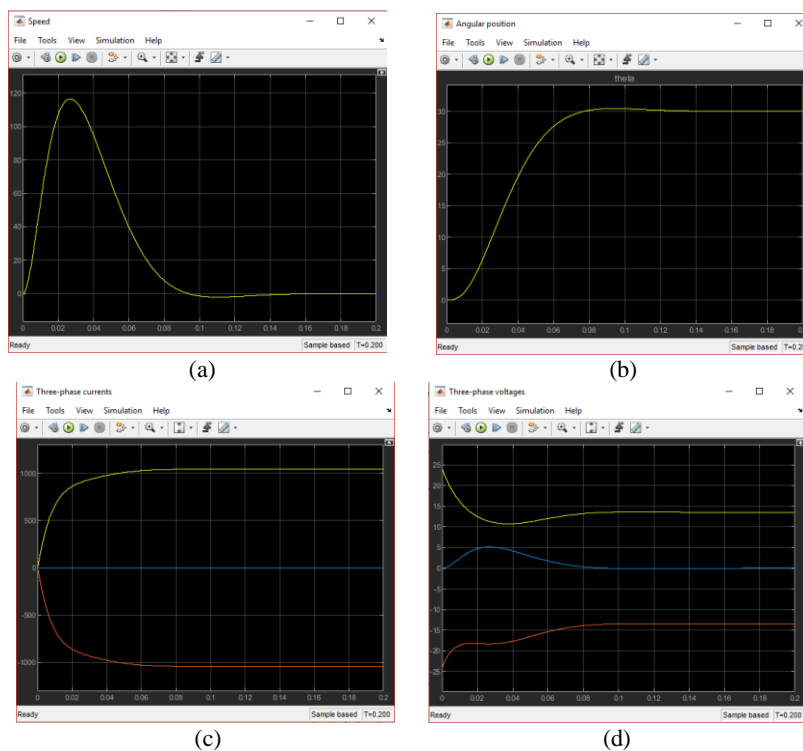
Gambar 4 Bentuk Teknik Kontrol yang Dilakukan pada Motor BLDC.

Pada Gambar 4 sistem logika komutasi digunakan untuk mengontrol motor BLDC, *desired speed* yang diinginkan berasal dari pedal potensiometer yang digunakan oleh pengemudi, kemudian akan diterima oleh kontroler yang kemudian digunakan untuk mengubah *pattern* dari *inverter* 3 fase yang akan menggerakkan motor BLDC.



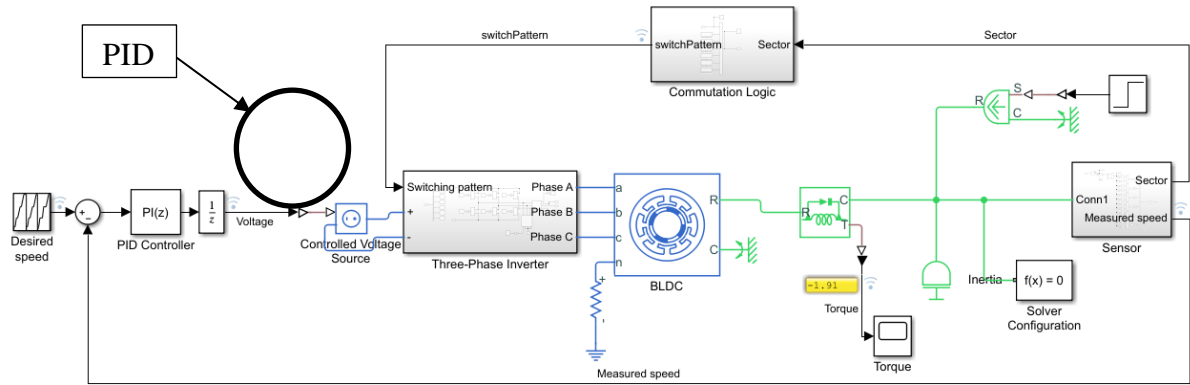
Gambar 5 Sistem Simulink dengan Inverter Tiga Fase.

Gambar 5 menunjukkan Simulink *switching pattern* diberikan pada Simulink motor BLDC, sehingga motor dapat bergerak sesuai dengan *step* komutasi, melalui *switching pattern* ditentukan jenis IC *mosfet* yang akan *on/off* pada *inverter* tiga fase sehingga motor BLDC akan berputar sesuai dengan posisi rotor yang ada. Parameter tegangan yang diberikan pada *inverter* tiga fase adalah 48 V.



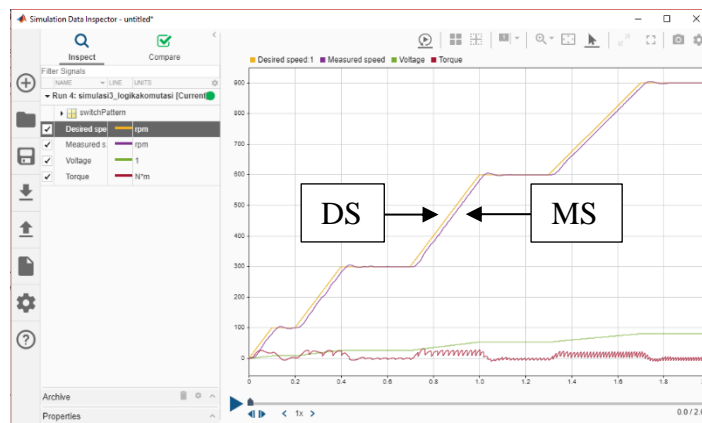
Gambar 6 Hasil Pada Scope (a) Speed, (b) Angular Position, (c) Arus 3 Fase, (d) Tegangan 3 Fase.

Pada Gambar 6 dapat dilihat hasil respon sistem pada *scope*, pada respon *speed* (Gambar 6 (a)) terlihat memiliki *rising time* yang baik, tidak adanya *overspeed* pada motor. Pada respon *Angular Position* Gambar 6 (b) berada di  $30^\circ$  sesuai dengan *six step* komutasi dan *rising time* yang baik 0,08 s dan *settling time* yang stabil. Pada respon Arus dan Tegangan Gambar 6 (c,d) digunakan 1000 mA atau 1 A untuk bekerja dan grafik tegangan dapat dilihat hanya *pole A* dan *C* yang diberikan tegangan. *Overcurrent* dan *overvoltage* tidak terjadi.



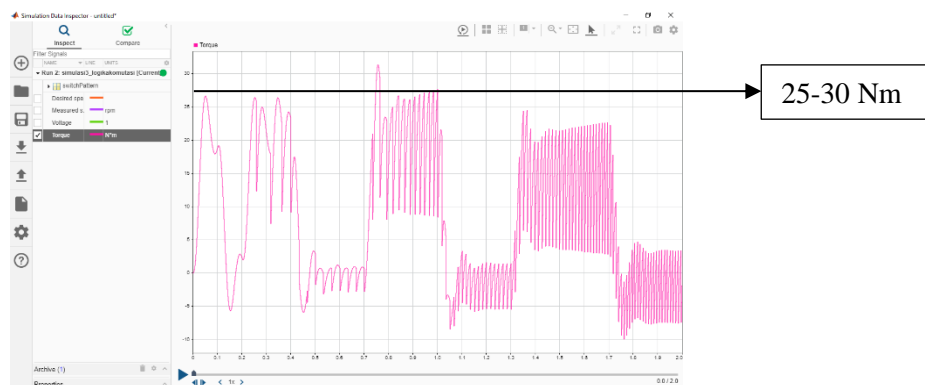
Gambar 7 Sistem Simulink Dengan PID dan Logika Komutasi.

Pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa sistem Simulink yang ada diberikan kontroler PID, hal tersebut agar mendapatkan hasil terbaik yang dapat dilihat, sehingga respon sistem akan semakin mendekati keadaan aslinya.



Gambar 8 Hasil Simulasi Keseluruhan Sistem Simulink.

Pada Gambar 8 dapat dilihat bahwa *desired speed* (DS) dan juga *measured speed* (MS) memiliki *error* yang kecil sehingga dapat disimpulkan bahwa dengan menggunakan sistem PID maka motor BLDC dapat bekerja dengan baik.



Gambar 9 Hasil Torsi Pada Simulasi Simulink.

Pada Gambar 9 dapat dilihat bahwa dengan menggunakan motor BLDC *torque* yang dihasilkan pada simulasi Simulink MATLAB sekitar 30 Nm, maka dapat disimpulkan motor BLDC dapat digunakan untuk menjalankan mobil listrik yang diperhitungkan membutuhkan 10,88 Nm – 12,48 Nm untuk dapat bergerak dengan bobot mobil sekitar 200 kg (Tabel 3). Melalui simulasi yang telah dilakukan didapatkan sejumlah data yaitu motor BLDC

membutuhkan tegangan 48 V dan 1 A untuk dapat berjalan, bila dirumuskan dengan rumus daya pada rangkaian listrik, maka daya dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 11.

$$P \text{ (daya)} = V \text{ (Voltase)} \times I \text{ (Ampere)} \tag{11}$$

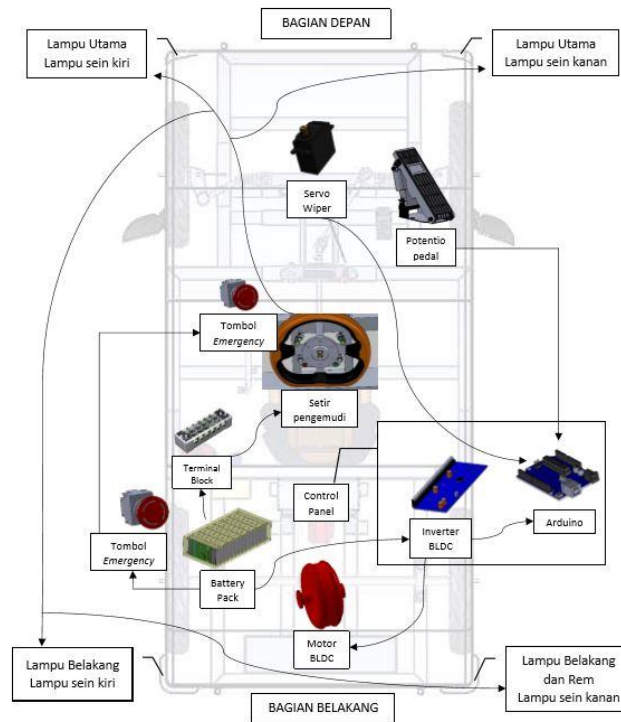
$$P = 48 \text{ V} \times 1 \text{ A} = 48 \text{ W}$$

Daya yang dihasilkan pada rancangan motor BLDC yang berspesifikasi 48 V dan baterai yang tersedia 20 A dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 11, sehingga menghasilkan daya sebesar 960 W.

$$P = 48 \text{ V} \times 20 \text{ A} = 960 \text{ W}$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut dapat disimpulkan bahwa rancangan baterai yang digunakan memenuhi syarat untuk dapat digunakan.

Respon sistem pada motor BLDC juga terlihat baik dengan menggunakan kontroler PID, melalui sistem kontrol PID diatur voltase dan arus yang digunakan oleh *inverter* tiga fase, lalu voltase dan arus listrik masuk ke motor BLDC sehingga motor bergerak. Kemudian sensor melakukan *feedback* sehingga dapat diketahui hasil kecepatan yang kemudian akan digunakan untuk memperbaiki *error* yang terjadi secara berulang menghasilkan sistem kontrol yang baik untuk penggunaan motor BLDC.



Gambar 10 Diagram Keseluruhan Sistem Kelistrikan.

Pada Gambar 10 dapat dilihat diagram kelistrikan keseluruhan pada mobil listrik yang telah disesuaikan dengan regulasi KMHE 2019 telah dirancang. Tabel 4 menunjukkan tipe dari komponen beserta penjelasannya.

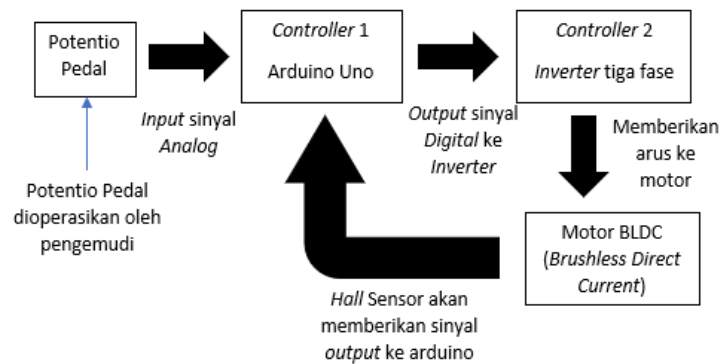
Tabel 4 Spesifikasi Komponen Sistem Kelistrikan

No.	Model data	Spesifikasi	Penjelasan
1	Motor BLDC ( <i>Brushless Direct Current</i> ) Tipe : LL18125095	Elektrikal: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Daya : 1000 W</li> <li>• Voltase : 48 V</li> <li>• <i>Over Power</i> Watt pada 1500 W</li> <li>• Ampere Kerja : 25-30 A</li> <li>• <i>OverAmpere</i> maksimal pada 40 A</li> <li>• <i>Recommend</i> kontroler 48 V, 1000 W, 35A</li> <li>• Minimum kontroler 48 V 1000 W 32 A</li> <li>• Maksimum kontroler 48 V 1500 W 45 A</li> </ul>	Motor BLDC dipilih karena efisiensinya yang lebih baik dibandingkan dengan motor AC, hal ini dikarenakan penyimpanan listrik berupa arus DC, sehingga tidak perlu mengubah arus DC tersebut, sedangkan jika menggunakan motor AC maka dibutuhkan <i>inverter</i> DC ke AC sehingga akan terjadi <i>heat loss</i> pada saat perubahan arus DC ke AC terutama pada mosfet. Serta spesifikasi



No.	Model data	Spesifikasi	Penjelasan
		<p>Mekanis:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Berat : 7-8 kg</li> <li>• Ring roda <i>compatible</i> : 14", 17" dan 20", 24", 26", 27.5"</li> <li>• Opensize as : <i>Fix on size</i> MTB (<i>Mountain Bike</i>), minimal 13.5 cm, <i>support</i> hingga 15 cm</li> <li>• Total panjang as : 20 cm</li> <li>• Bearing : tertutup/<i>sealed</i></li> <li>• Top speed : 55-60 km/jam, 600 rpm</li> <li>• Torsi : 30 Nm-50 Nm</li> <li>• Fitur Dinamo : <i>Support Controller</i> REGEN (putaran <i>clockwise</i> dan <i>counter-clockwise</i>)</li> <li>• Hall sensor : Standar <i>hall</i> sensor</li> <li>• Socket : <i>socket</i> pin isi 5 untuk <i>hall</i>, dan 3 <i>socket</i> untuk fase.</li> </ul>	<p>motor BLDC memiliki torsi yang tinggi dengan kebutuhan tenaga 48V sudah dapat menghasilkan torsi sebesar 30 Nm jika dibandingkan motor DC biasa dan juga motor AC. Harga motor BLDC relatif lebih mahal karena desain yang kompleks dibandingkan motor listrik AC, namun tidak membutuhkan perawatan karena menggunakan <i>bearing</i> sebagai tumpuannya, tidak menggunakan sikat <i>commutator</i> atau <i>brush</i>.</p>
2	Controller DC Inverter 3 fase	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berat : 1-2 kg</li> <li>• Kebutuhan : 12 V-48 V</li> <li>• Pengatur kecepatan: <i>potentiometer</i> pedal 12V</li> <li>• Current limit : 48 V</li> <li>• DC-DC converter : &gt;60 V diubah ke 12-48 V</li> <li>• Mosfet controller : P-channel dan N-Channel mosfet</li> </ul>	<p>Controller ini digunakan untuk mengubah dan membagi arus menjadi tiga fase dan dialirkan pada masing-masing kumparan sesuai dengan posisi dari <i>hall</i> sensor.</p>
3	Controller Arduino Uno Atmega328	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Catu Daya 7 V – 12 V DC</li> <li>• Berbasis mikroprosesor: Atmega328</li> <li>• Jumlah Port I/O : 14 pin I/O (6 pin untuk <i>output</i> PWM) dan <i>Analog Input</i> 5 pin</li> <li>• Port antarmuka : UART TTL, I2C, SPI dan USB (<i>Virtual Com</i>)</li> </ul>	<p>Arduino Uno dipilih karena kebutuhan untuk mengatur <i>wiper</i>, mengatur input sinyal <i>analog</i> dari potentiopedal. Harga juga relatif lebih murah dari ECU (<i>Engine Control Module</i>) untuk mobil konvensional.</p>
4	Baterai Pack Lithium-Ion NCR18650 14s7p	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berat : 5 kg</li> <li>• Volume (<math>p \times l \times t</math>) : 20 cm <math>\times</math> 12 cm <math>\times</math> 10 cm</li> <li>• Kapasitas : 57,4 V (normal) hingga 60 V (<i>overcharge</i>), 60 V maksimal</li> <li>• Isi : Lithium-ion 14s7p (dirangkai secara 14 seri dan 7 paralel), kapasitas baterai Li-Ion 4.1 V/pcs</li> <li>• Pengaman : BMS (<i>Battery Management System</i>) 7 cell</li> <li>• Temperatur : 15°C-20°C suhu saat bekerja</li> <li>• Charge time : 3-5 jam</li> </ul>	<p>Lithium Ion NCR18650 digunakan karena memiliki spesifikasi bahan penyimpan listrik yang baik, mampu bekerja pada suhu rendah dan juga tinggi, serta jika dibandingkan dengan baterai lithium <i>polymer</i>, jika terjadi kerusakan harus mengganti keseluruhan bagian dari baterai, sedangkan jika baterai Lithium Ion salah satu rusak, maka dapat diganti bagian yang rusak tersebut dengan baterai baru tanpa mengganti keseluruhan baterai. Sehingga biaya relatif murah.</p>
5	Charger Battery Pack	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berat : 2-3 kg</li> <li>• Input : 220 V AC</li> <li>• Output : 48 V DC</li> <li>• Temperatur kerja : 25°C – 28°C</li> <li>• Indikator led : red (<i>active</i>)</li> </ul>	<p>Charger dibuat agar ketika mobil membutuhkan sumber daya maka sudah memiliki alat untuk mengisi kembali, tanpa perlu mencari atau membeli charger dengan spesifikasi yang cocok dengan baterai yang digunakan</p>
6	Emergency Stop Switch Push Button Mushroom	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dua switch sirkuit : 1 <i>Normally Open</i>, 1 <i>Normally Closed</i> (DPST: <i>Double Pole Single Throw</i>)</li> <li>• Jumlah terminal pin : 4 pin</li> <li>• Kontak rate : 600 V/10 A</li> </ul>	<p>Emergency push button digunakan untuk memberi pengamanan terhadap sistem dan juga pengendara, sehingga pengemudi dapat memutuskan kontak dari sumber daya ke seluruh sistem listrik di mobil.</p>
7	Motor Servo MG996R Micro Metal Servo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berat : 55 g</li> <li>• Torsi : 9,4 kgfcm (4,8 V), 11 kgfcm (6 V)</li> <li>• Sudut : maksimal 120°</li> <li>• Operating speed : 0,17 s/d 60 (4,8 V), 0,14 s/d 60 (6 V)</li> <li>• Operating voltage : 4,8 V – 7,2 V</li> <li>• Running Current 500 mA 900 mA (6 V)</li> </ul>	<p>Servo dipilih untuk menggerakkan <i>wiper</i> karena sudut putaran dari servo dapat diatur, sehingga dapat memudahkan teknisi untuk mengatur <i>range swipe</i> dari <i>wiper</i> agar pengemudi dapat dengan baik membersihkan pandangan di dalam mobil.</p>

Pada sistem kerja bagaimana motor BLDC dapat bekerja dan komponen yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11 Diagram Sistem Kerja Motor BLDC.

Pada Gambar 11 dijelaskan bahwa potensiopedal yang dioperasikan oleh pengemudi akan diberikan arus listrik sehingga nilai resistansinya dapat diterima oleh *controller 1* Arduino sebagai *input analog*, kemudian dikonversikan pada Arduino dengan bahasa pemrograman C#, didapatkan nilainya dari 0-255. Melalui Arduino nilainya dikirimkan ke *controller 2* agar dapat membuka aliran listrik dari *mosfet* yang terdapat pada *inverter* tiga fase, melalui *mosfet* tersebut arus listrik DC masuk ke 3 bagian *coil* yang terhubung pada motor BLDC, sehingga motor BLDC dapat berputar. Kemudian, posisi rotor BLDC dapat dicek dengan *hall* sensor yang akan masuk ke *controller 2* BLDC, sinyal dari *hall* sensor juga akan masuk ke arduino sebagai sinyal *analog* yang kemudian dapat diketahui nilainya di Arduino.

## SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan penelitian dan analisis yang telah dilakukan terhadap pengujian simulasi dengan *software* Simulink di MATLAB dan desain sistem kelistrikan yang diperlihatkan melalui gambaran dengan aplikasi *Solidworks* dan juga dengan *wiring* diagram keseluruhan sistem dapat disimpulkan bahwa telah berhasil dibuat dan disimulasikan penggunaan motor BLDC sebagai penggerak mobil listrik dengan Simulink MATLAB yang mengukur torsi motor BLDC yang dimiliki tim WSM. Pada motor BLDC memiliki hasil torsi sebesar 30 Nm dan daya sebesar 960 W, sudah melebihi perhitungan torsi yang dibutuhkan sekitar 10,88 Nm – 12,48 Nm. Juga telah berhasil dirancang sistem kelistrikan mobil hemat energi yang sesuai dan memenuhi kriteria regulasi KMHE 2019.

Saran yang dapat diberikan yaitu secara spesifik kesulitan pada penelitian ini adalah membutuhkan waktu yang lama untuk dapat merancang sistem Simulink dengan PID sekitar 4-5 bulan dan juga pada kondisi pandemik seperti sekarang ini sulit untuk mendapatkan informasi lebih yang dapat dituangkan pada penelitian ini. Lebih baik lagi simulasi dilakukan di institusi pengujian teknologi sehingga hasil simulasi pada Simulink di MATLAB dapat dibandingkan dengan hasil eksperimen sehingga dapat diketahui galatnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Acosta B, Betancourt M, Pinheiro F. Shell eco-marathon 100% of final report [tesis]. Florida (US): Florida International University.
- Afif MT dan Pratiwi IAP. 2015. Analisis perbandingan baterai Lithium-Ion, Lithium-Polymer, Lead Acid dan Nickel-Metal Hydride pada penggunaan mobil listrik - review. *Jurnal Rekayasa Mesin*. 6(2): 95–99.
- Arifin Y dan Amir A. 2010. Pemodelan dan pengendalian motor DC menggunakan simulasi MATLAB. *Majalah Ilmiah MEKTEK*. 12(2): 129-137.
- Carrier JE, Ohline RM, Kenny TW. 2011. *Introduction to Mechatronic Design*. New Jersey (US): Prentice Hall.
- Haryadi D. 2012. *Studi pemilihan motor DC dan kapasitasnya pada mobil listrik*. Palembang (ID): Universitas Sriwijaya.

- Madur S and Debre A. 2017. Brushless Direct Current Motor (BLDC) for electric vehicles. *International Journal on Recent Innovation in Instrumentation & Control Engineering*. 1(1):15-18.
- Mathworks. 2020. Power electronics control design with simulink [Internet]. [Diunduh 2020 Feb 08]; <https://www.mathworks.com/solutions/power-electronics-control/bldc-motor-control.html>
- Mituhiko A. 1971. PID control [Internet]. [Diunduh 2020 Jan 03]; <http://gpdlpune.ac.in/mainEN/IAM/E6-43-03-03.pdf>
- Universitas Negeri Malang. 2019. Regulasi teknis KMHE 2019 [Internet]. [Diunduh 2020 Jan 03]; <http://kmhe2019.um.ac.id/>.
- Yue XL and Bai P. 2014. Modelling and simulation of brushless DC motor speed control system based on MATLAB/SIMULINK. *Advanced Materials Research*. 998(999): 755–758.