

## Implementasi Kontroler Logika Fuzzy sebagai *Soft Starting* Motor BLDC di Sepeda Listrik

Hendi Purnata<sup>1</sup>, Sugeng Dwi Riyanto<sup>2</sup>, Muhamad Yusuf<sup>3</sup>

1. Politeknik Negeri Cilacap, Indonesia | hendipurnata@pnc.ac.id

2. Politeknik Negeri Cilacap, Indonesia | sugengdr82@gmail.com

3. Politeknik Negeri Cilacap, Indonesia | yusuf@pnc.ac.id

### Abstrak

Saat ini, sepeda diakui secara internasional tidak hanya sebagai bentuk rekreasi tetapi juga sebagai sarana transportasi perkotaan dan promotor kesehatan yang baik. Sepeda listrik adalah alat transportasi yang memadukan manfaat dan Kesehatan dari sepeda konvensional dengan keunggulan kendaraan bermotor. Telah kita ketahui juga kendaraan listrik saat pertama kita diberikan tegangan/gas oleh pengemudi terdapat gaya tarik yang kuat atau bisa dikatakan ciri khas dari motor listrik yang mana tarikan tersebut merupakan lonjakan arus yang diberikan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengatasi lonjakan arus saat starting, lonjakan tersebut berbahaya dikarenakan dapat mengurangi umur pada motor listrik. Peneliti merancang mekanisme *soft starting* pada motor BLDC (Brushless DC) dengan cara merancang algoritma kontroler logika fuzzy dan pensaklaran enam tahapan pada rangkaian inverter. Hasil menunjukkan bahwa lonjakan arus saat starting sebesar 4,42 Ampere. Kecepatan motor BLDC saat *throttle full* kecepatan menunjukkan 332 rpm dengan respon transient masing-masing sistem sebesar 1.5 s. Ketika diberikan set point kecepatan berubah-ubah, putaran motor BLDC dapat mengikuti yaitu sebesar 88 rpm menuju 180 rpm, kemudian naik sebesar 258 rpm dan puncak sebesar 331 rpm, kemudian turun ke 25 rpm dan terakhir sebesar 145.8 rpm. Saat respon transien sistem layaknya seperti sistem step orde dua, tidak ada overshoot tetapi masih ada osilasi saat mau menuju *steady state*.

### Kata Kunci

Soft Starting, Kontroler Logika Fuzzy, Sepeda Listrik

## 1. Pendahuluan

Sepeda listrik adalah alat transportasi yang memadukan manfaat dan Kesehatan dari sepeda konvensional dengan keunggulan kendaraan bermotor. Saat mengayuh, motor listrik membantu bepergian dengan mudah. Pengendara sepeda memiliki akeuntungan kinerja dengan bantuan mesin, terutama ketika akan menanjak. Mesinnya didukung oleh baterai yang harus diisi ulang secara teratur. Saat ini, sepeda diakui secara internasional tidak hanya sebagai bentuk rekreasi tetapi juga sebagai sarana transportasi perkotaan dan promotor kesehatan yang baik. Dari sudut pandang energi, bahwa penggunaan kendaraan sepeda adalah cara paling efisien untuk mengangkut orang, menunjukkan konsumsi energi yang lebih rendah dari yang dihabiskan dengan berjalan kaki pada rute dalam waktu perjalanan. Pembangunan sistem mobilitas yang ramah lingkungan, pemerintahan mengupayakan pelayanan serta fasilitas pada angkutan umum serta kendaraan yang tidak memiki polusi udara yakni bersepeda dan jalan kaki. Sepeda adalah alat transportasi yang dikategorikan *green and clean*. Kehidupan yang modern serta ramah lingkungan salah satunya dengan bersepeda serta menjadi opsi *first last time* menuju stasiun transportasi public terdekat (Rizal, 2020).

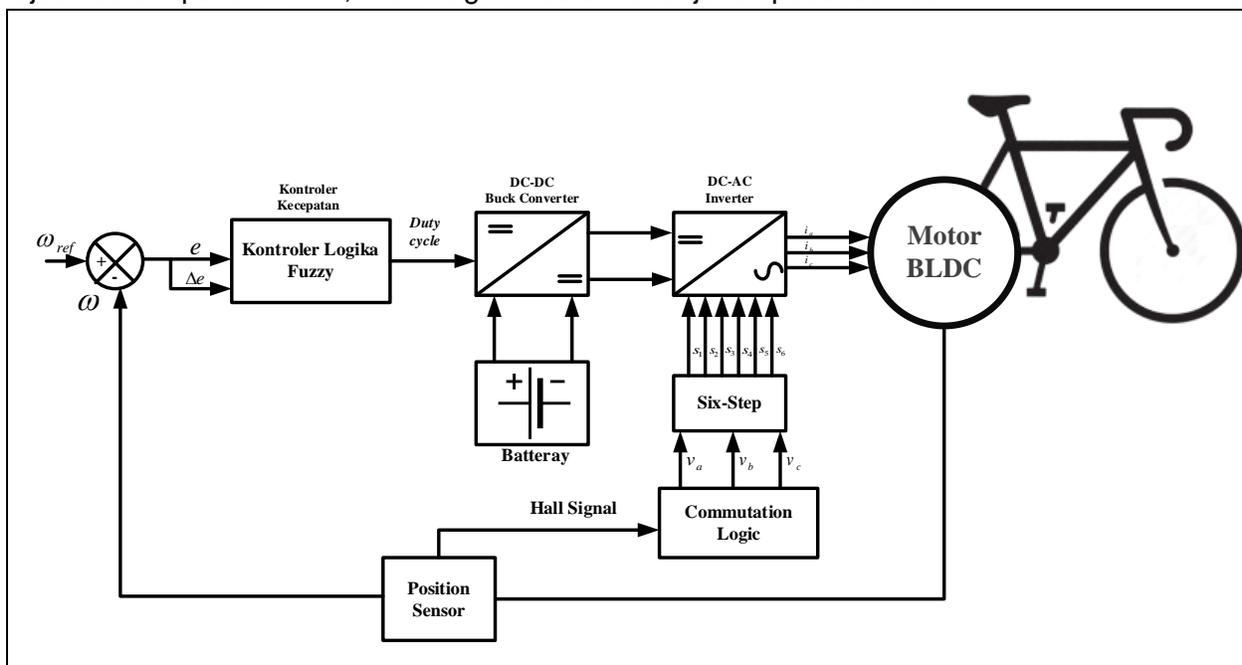
Pada penelitian (Zhu *et al.*, 2019) menjelaskan bahwa kendaraan sebagai sepeda yang dibantu listrik dapat dianggap sebagai kendaraan alternatif yang menjanjikan baik untuk mobilitas pribadi dan pengiriman barang, terutama untuk jarak kecil dan menengah. Sepeda listrik, dalam segala mampu bergerak dengan kecepatan rata-rata sama dengan kendaraan-kendaraan lain di lintas kota dan, pada saat yang sama, kendaraan-kendaraan membutuhkan energi tetapi pada sepeda listrik hanya menggunakan energi listrik yang bisa didapatkan dengan mudah. Komponen utama pada sepeda listrik adalah motor listrik sebagai penggerak. Motor listrik yang digunakan adalah motor DC brushless. BLDC memiliki konstruksi stator dan rotor yang terbuat dari *permanent magnet*. BLDC memiliki sumber arus searah dan memiliki EMF (*Electromotive Force*) berbentuk sinyal trapezium. BLDC memerlukan sumber tegangan 3 fasa kemudian terjadilah medan magnet maka rotor dapat berputar. Motor BLDC ini seperti layaknya *vector control* yang mengarahkan motor secara langsung tanpa modulasi arus. Untuk pengendalian pada motor BLDC dengan menggunakan teknik PWM *six-step* atau pun *sinusoidal* (Bayindir, Ocak and Topaloğlu, 2011; Apatya, Subiantoro and Yusivar, 2017; Tang and Zhuang, 2019).

Metode *six-step* inverter digunakan untuk mengendalikan kecepatan BLDC. Metode ini digunakan karena lebih mudah di implementasikan dan mempunyai algoritma yang sederhana. Kecepatan motor BLDC dapat disesuaikan dengan menggunakan teknik PWM sebagai *input* dari inverter dan tegangan DC yang bervariasi. Pengaturan kecepatan motor juga dapat dilakukan dengan mengubah siklus *duty cycle* (Li *et al.*, 2015). Metode *six-step* dapat digunakan dengan torsi dan kecepatan konstan. Motor BLDC digunakan sensor kecepatan atau sensor hall untuk perhitungan komutasi yang di peroleh pada kontrol BLDC. Secara umum, sensor kecepatan digunakan untuk menentukan perubahan dalam pemilihan waktu pergantian (Pribadi and Prasetyo, 2019). Pada (Yusuf *et al.*, 2019) menjelaskan bahwa perancangan pensaklaran pada inverter dengan cara mengendalikan arah vektornya. Dalam penelitian (Purnata, Rameli and

Effendie Ak, 2017) menjelaskan bahwa menggabungkan dua metode untuk pensaklaran pada rangkaian elektronika daya sebagai aktuator pada kecepatan motor Agar masukan vector yang bagus. Pada penelitian (Purnata, Pratiwi and Yusuf, 2020) logika fuzzy tidak hanya memerlukan model matematika yang akurat. Namun, perancangan fuzzy membutuhkan operasi logika untuk diterapkan dalam system sehingga dapat menghasilkan respon sesuai yang diinginkan. Untuk mengendalikan kecepatan motor dibantu kontroler logika fuzzy sebagai kendali kecepatannya. Pada pengaturan kecepatan motor BLDC biasa dengan menggunakan metode *six-step*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengatasi lonjakan arus saat starting, lonjakan tersebut berbahaya dikarenakan dapat mengurangi umur pada motor listrik. Peneliti merancang mekanisme *soft starting* pada motor BLDC dengan cara merancang algoritma kontroler logika fuzzy dan pensaklaran enam tahapan pada rangkaian inverter.

## 2. Metode

Sistem ini menggunakan motor BLDC sebagai penggerak roda yang disebut actuator. Baterai yang digunakan menggunakan lithium dengan susunan 13 Seri dan 2 Paralel. *Throttle* memberikan sinyal agar motor BLDC berputar sesuai yang diinginkan. Sistem ini menggunakan kontroler logika fuzzy untuk memperbaiki error dari perbandingan *set point* dari throttle dengan kecepatan pada motor BLDC. Koreksi sinyal dari Kontroler logika fuzzy juga untuk membangkitkan sinyal PWM ke Buck Converter. Dari sinyal Buck Converter maka di balik agar mendapatkan sinyal AC berbentuk Trapezoid untuk memutar motor BLDC. Agar dapat tercapai tujuan dalam penelitian ini, Blok diagram sistem ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Blok Diagram Sistem Sepeda Listrik

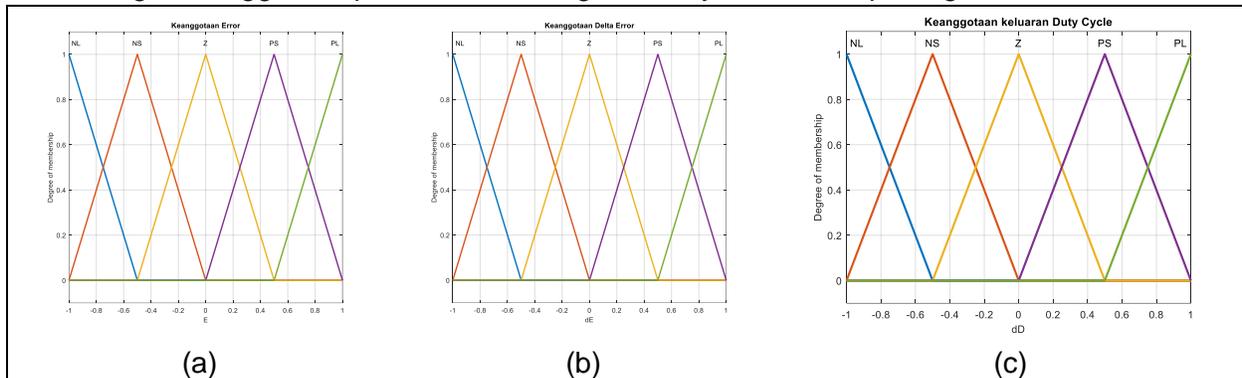
## a. Kontroler logika Fuzzy

Kontroler logika fuzzy pada penelitian ini untuk mengendalikan kecepatan dan membangkitkan sinyal PWM. Terdapat dua masukan pada fuzzifikasi yaitu error dan delta error dari sensor kecepatan dan satu keluaran untuk membangkitkan sinyal PWM.

$$e(t) = \omega_{ref}(t) - \omega(t) \quad \text{Pers. (1)}$$

$$\Delta e(t) = e(t) - e(k - 1) \quad \text{Pers. (2)}$$

Fungsi keanggotaan pada Kontroler Logika Fuzzy bisa dilihat pada gambar di bawah ini:



**Gambar 2.** Fungsi Keanggotaan Logika Fuzzy (a) Error (b) Delta Error (c) Keluaran duty cycle

Operasi kotroler logika fuzzy terapat sistem aturan yang harus dipenuhi, terdapat dua buah input yang masing-masing mempunyai lima keanggoraan yaitu NL (negative long), NS (*Negative Small*), Z (*Zero*), PS (*Positive Small*) dan PL (*Possitive Long*). Operasi kontroler logika fuzzy menggunakan fungsi AND, rules untuk mesin interference fuzzy terdapat 25 buah seperti table di bawah ini:

Tabel 1. Mesin inferensi logika fuzzy

de	e	NL	NS	Z	PS	PL
NL		NL	NL	NL	NS	Z
NS		NL	NL	NS	Z	PS
Z		NL	NS	Z	PS	PL
PS		NS	Z	PS	PL	PL
PL		Z	PS	PL	PL	PL

## b. Batteray

Baterai yang digunakan merupakan jenis lithium-ion yang disusun secara seri dan pararel. Baterai lithium ion per cell 3.7 Volt dengan arus 2500 mAh kemudian disusun secara 13 Seri dan 2 Pararel. Jadi tegangan yang dihasilkan yaitu sebesar 48.1 Volt dengan arus sebesar 5 Ah.

### c. DC-DC Buck Converter

Perancangan DC-DC buck converter dengan mode buck yaitu menurunkan tegangan dari input (sumber) ke output (beban) (Chen *et al.*, 2018). Dalam mode buck diperlukan parameter agar dapat digunakan agar sesuai dengan input dan output. Mode buck kondisi kontinyu inductor tidak pernah bernilai nol.

**Tabel 2.** Parameter Buck Converter

Parameter	Nilai
$V_{out}$	20 - 48 V
$V_{in}$	48 V
$I_o$	5 A
Pensaklaran	20 kHz

### d. Hall Sensor

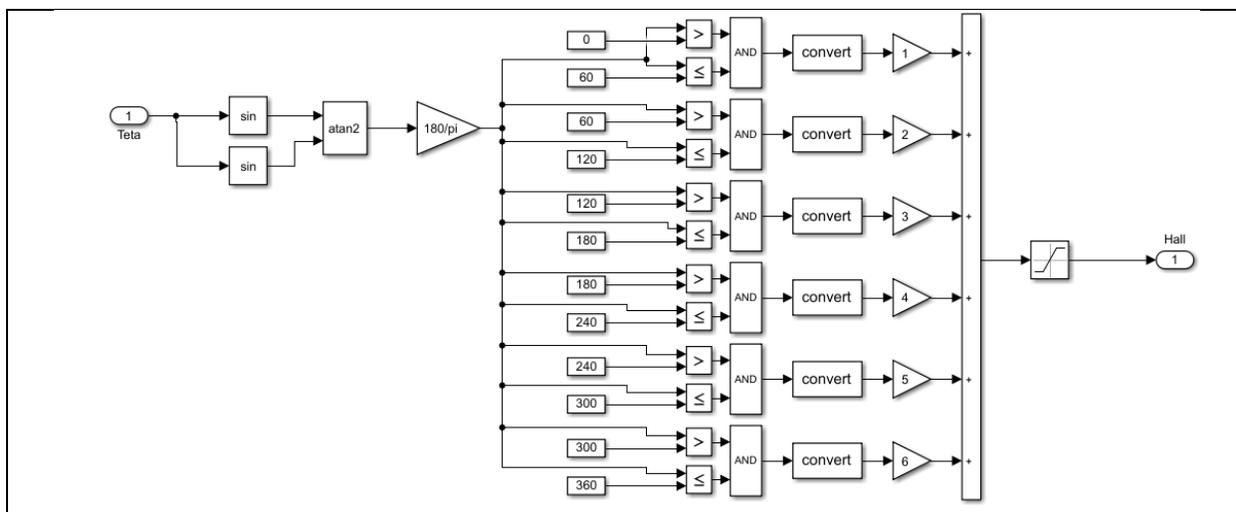
Blok Hall sensor merupakan model posisi putar 360°, Elemen-elemen tersebut menghasilkan empat bentuk gelombang sinusoidal. Masukan dari Hall sensor merupakan nilai  $\theta$  (Dias and Pereira, 2018; Du *et al.*, 2018; Yan *et al.*, 2019). Tegangan antara elemen putar hall sensor dapat dilihat pada persamaan di bawah ini:

$$v_x = V_{x0} + A_x \cos(\theta) \quad \text{Pers. (2)}$$

$$v_y = V_{y0} + A_y \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2} + \beta\right) \quad \text{Pers. (3)}$$

Dengan blok untuk melihat persamaan sudut:

$$\theta_{out} = \arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \quad \text{Pers. (4)}$$



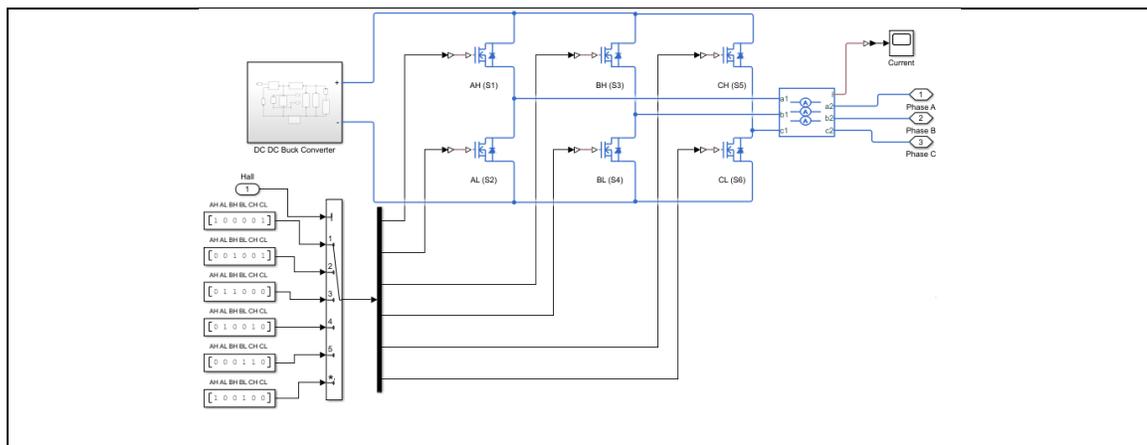
**Gambar 3** Hall Sensor

### e. Six Step

*Six step commutation* bertujuan untuk membangkitkan sinyal di transistor (MOSFET) berdasarkan masukan dari sensor hall dengan enam tahapan pensaklaran yang berurutan (Pribadi and Prasetyo, 2019). Gambar 5. merupakan rangkaian inverter dengan pensaklaran agar mendapatkan tegangan 3 fasa.

**Tabel 3.** Pensaklaran Enam Tahapan Komutasi

No	Interval	Keluaran dari Hall			Transistor ON	
		Hall 1	Hall 2	Hall 3		
1	$0^0 - 60^0$	1	0	0	AH	CL
2	$60^0 - 120^0$	1	1	0	BH	CL
3	$120^0 - 180^0$	0	1	0	AL	BH
4	$180^0 - 240^0$	0	1	1	AL	CH
5	$240^0 - 300^0$	0	0	1	BL	CH
6	$300^0 - 360^0$	1	0	1	BL	AH



**Gambar 4.** Rangkaian Inverter dengan Komutasi

### f. BLDC Motor

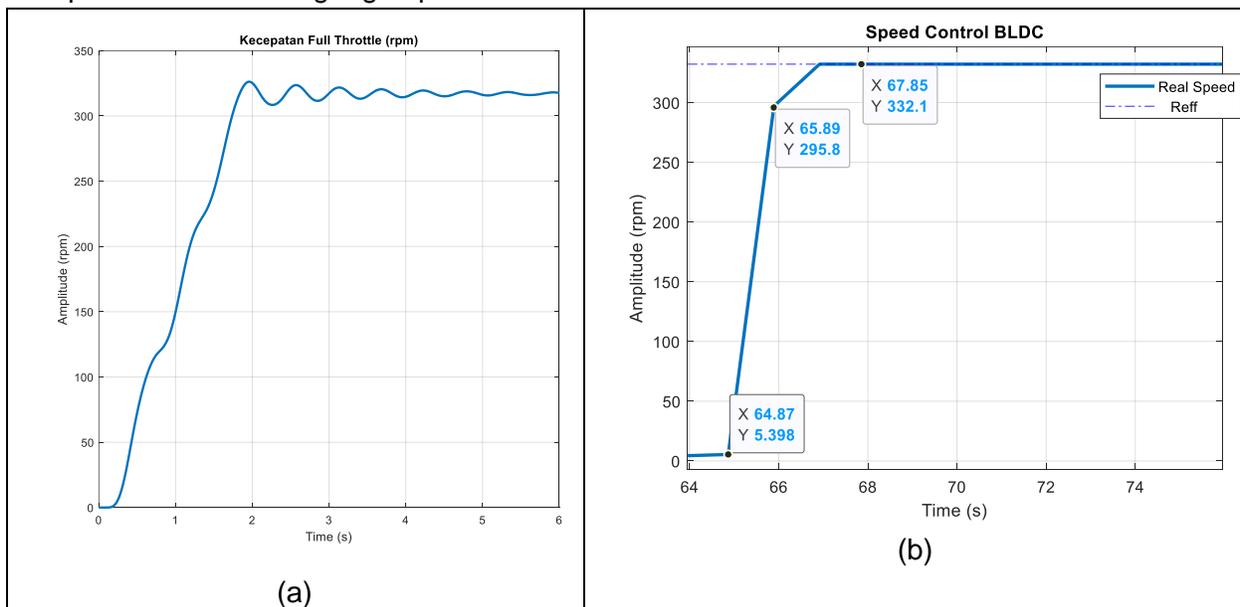
Pemilihan motor BLDC pada aplikasi ini karena mempunyai kehandala dan efisiensi yang tinggi. BLDC merupakan motor yang tidak mempunyai sikat komutator sehingga untuk mendapatkan sinyal maka dibangkitkan oleh perangkat elektronika daya yaitu dengan cara pensaklaran transistor (Bayindir, Ocak and Topaloğlu, 2011; Apatya, Subiantoro and Yusivar, 2017). Spesifikasi BLDC dapat di lihat pada Tabel 3.

**Tabel 4** Parameter BLDC

No	Parameter	Value	Unit
1	Number of Poles	4	
2	voltage	48	Volt
3	Power	350	Watt
4	No-load current	< 2.8	Ampere
5	Full load current	< 9.4	Ampere
6	Motor torque Constant	0.3317	Nm / A
7	Friction coefficient	0.015	N.m /rad ps
8	Moment of inertia	0,000301	kg.m <sup>2</sup>

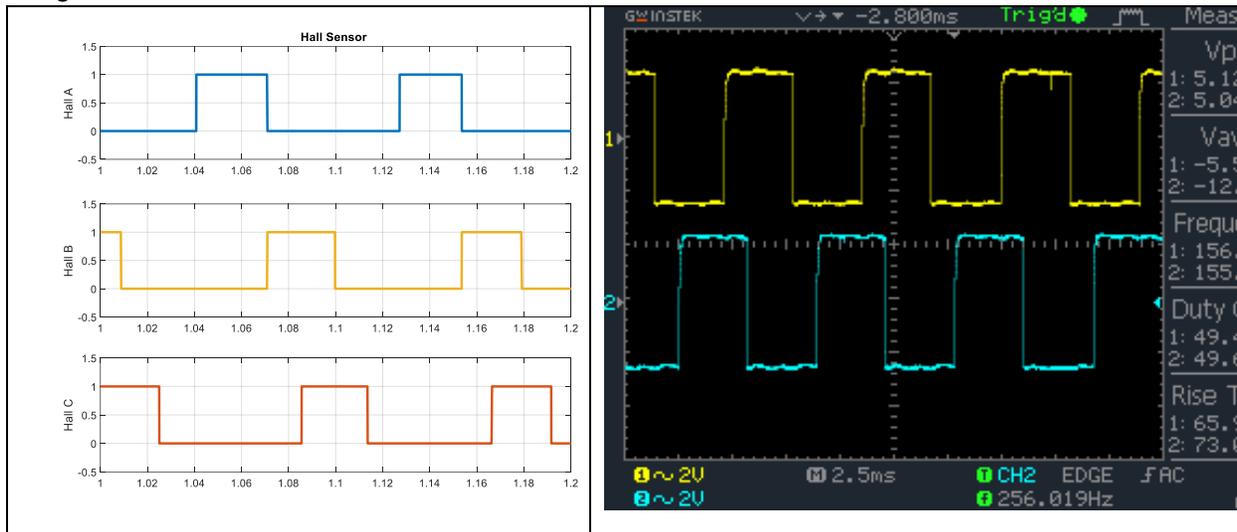
### 3. Hasil Pembahasan

Kontroler logika fuzzy sebagai pengoreksi error dari kecepatan throttle dengan kecepatan sebenarnya pada aplikasi sepeda listrik. Pengujian dilakukan membandingkan antara hasil simulasi di Simulink Matlab dengan keadaan motor yang sebenarnya. Pengujian dilakukan dengan memberikan *full throttle* atau kecepatan penuh sebesar 335 rpm dan dengan memberikan kecepatan berubah-ubah. Algoritma kontroler logika fuzzy bertujuan untuk membangkitkan sinyal PWM agar bisa menurunkan tegangan yang di supply oleh baterai lithium ion sebesar 48 Volt.  $V_o$  dari Buck Converter kemudian membangkitkan masuk ke DC – AC (Inverter) sebagai penggerak kecepatan di motor BLDC. Data yang ditunjukkan pada penelitian ini meliputi perbandingan kecepatan motor dan tegangan pada inverter.



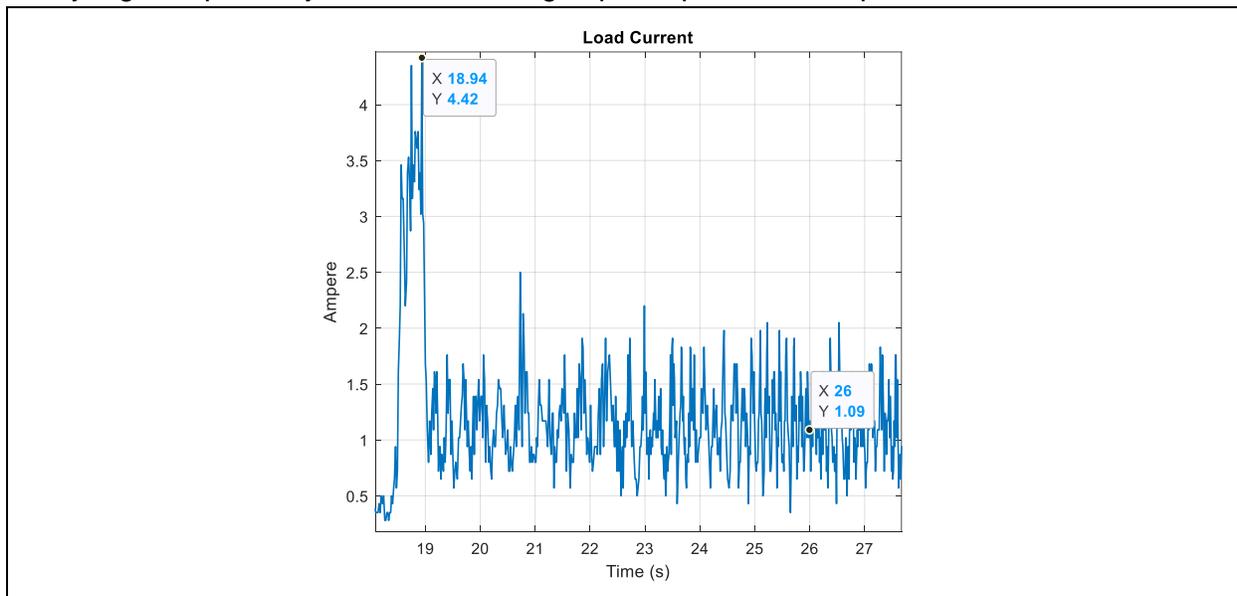
**Gambar 5.** Kecepatan motor BLDC saat *Full Throttle* (a) Plot dari Matlab (b) Plot dari sensor Kecepatan

Pada Gambar 5. menunjukkan perbandingan kecepatan antara simulasi dengan *real plant* tidak jauh berbeda yaitu sama-sama dapat menuju set point sebesar 332 rpm. Pada gambar (a) masih terdapat osilasi kecepatan tetapi pada gambar (b) tidak memiliki osilasi dikarenakan Time Sampling pada pengambilan data sebesar 1 detik. Analisa transient pada gambar diatas yaitu dengan *rise time* sebesar 1.5s.



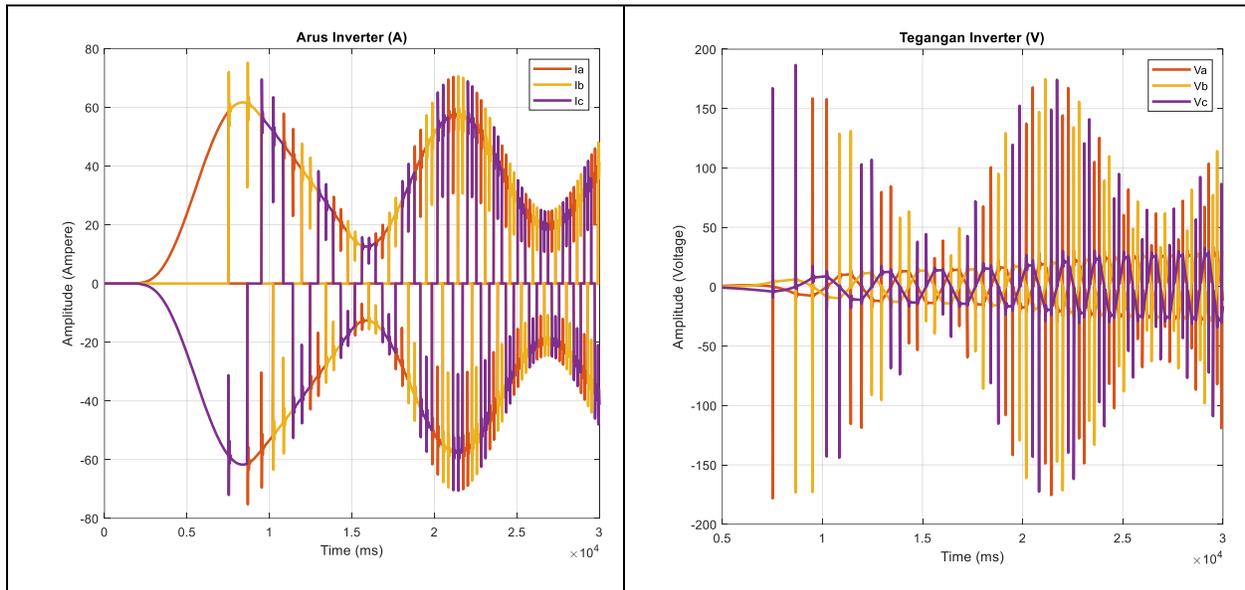
**Gambar 6.** Sinyal Hall Sensor (a) Plot Matlab (b) Plot Osiloskop

Gambar 6 diatas menunjukkan hasil dari hall sensor yaitu Hall a, Hall b dan Hall c. Pada simulasi terlihat bahwa pergeseran fasa pada hall a, hall b, dan hall c sedangkan pada real plant data yang di cuplik hanya dua sesuai dengan probe pada osiloskop.



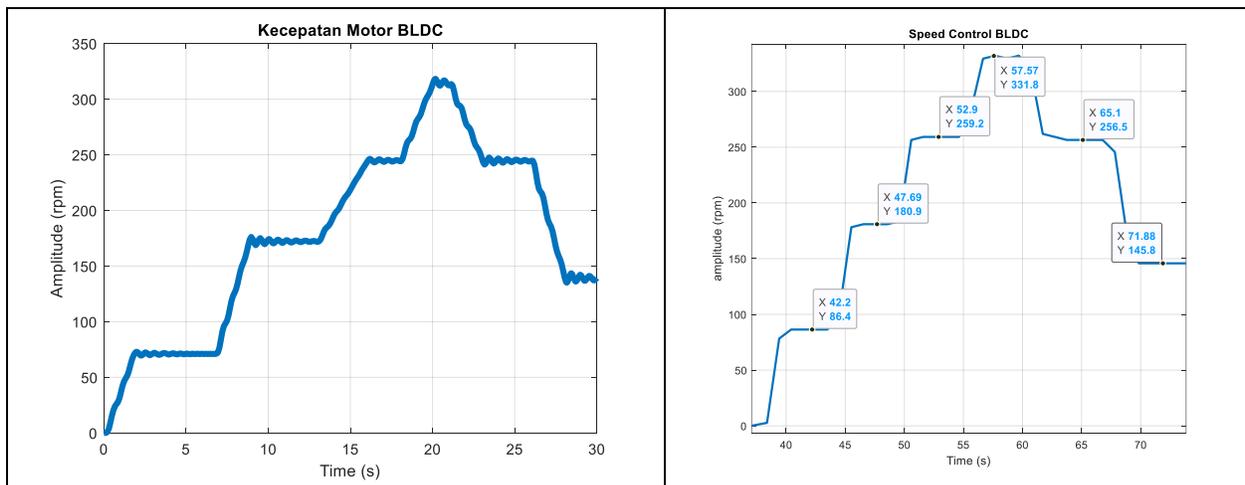
**Gambar 7.** Arus Beban saat Motor BLDC Beroperasi

Gambar 7. Merupakan Arus beban pada real plant yang menunjukkan bahwa arus starting sebesar 4,42 Ampere, hal ini menunjukkan bahwa arus yang disediakan oleh baterai sebesar 5 Ah dapat bekerja sesuai dengan sistem yang ada.



**Gambar 8.** Keluaran dari Inverter (a) Arus (b) Tegangan

Gambar 8. Merupakan keluaran tegangan dan arus pada inverter. Arus dan tegangan terlihat masih ada riak. Tegangan pada line inverter berbentuk trapezoid dengan beda fasa 120°.



**Gambar 9.** Kecepatan motor BLDC saat berubah-ubah (a) Plot dari Matlab (b) Plot dari sensor Kecepatan

Gambar 9. menunjukan Ketika throttle dibuat kecepatan berubah-ubah. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan dengan menggunakan kontroler logika fuzzy bisa sesuai dengan yang diinginkan. Kecepatan pada throttle yang dibangkitkan sebesar 88 rpm menuju 180 rpm, kemudian naik sebesar 258 rpm dan puncak sebesar 331 rpm, kemudian turun ke 25 rpm dan terakhir sebesar 145.8 rpm.

#### 4. Kesimpulan

Soft starting telah dirancang dengan menggunakan six step komutasi pada rangkaian inverter. Kontroler logika fuzzy sebagai kontrol kecepatan dan memberikan sinyal PWM ke buck converter telah diaplikasikan pada sistem ini. Hasil menunjukkan bahwa lonjakan arus saat starting sebesar 4,42 Ampere. Kecepatan motor BLDC saat throttle full kecepatan menunjukkan 332 rpm dengan respon transient masing-masing sistem sebesar 1.5 s. Ketika diberikan set point kecepatan berubah-ubah, putaran motor BLDC dapat mengikuti yaitu sebesar 88 rpm menuju 180 rpm, kemudian naik sebesar 258 rpm dan puncak sebesar 331 rpm, kemudian turun ke 25 rpm dan terakhir sebesar 145.8 rpm. Saat respon transien sistem layaknya seperti sistem step orde dua, tidak ada overshoot tetapi masih ada osilasi saat mau menuju steady state.

#### DAFTAR RUJUKAN

- Apatya, Y. B. A., Subiantoro, A. and Yusivar, F. (2017) 'Design and prototyping of 3-phase BLDC motor', *QiR 2017 - 2017 15th International Conference on Quality in Research (QiR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering, 2017-Decem*, pp. 209–214. doi: 10.1109/QIR.2017.8168483.
- Bayindir, R., Ocak, C. and Topaloğlu, I. (2011) 'Investigation of the effect of magnet thickness on output power and torque of PM BLDC machines using parametric approach method', *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, (May)*, pp. 1–4. doi: 10.1109/PowerEng.2011.6036466.
- Chen, S. *et al.* (2018) 'Adaptive commutation error compensation strategy based on a flux linkage function for sensorless brushless DC motor drives in a wide speed range', *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(5), pp. 3752–3764. doi: 10.1109/TPEL.2017.2765355.
- Dias, C. G. and Pereira, F. H. (2018) 'Broken Rotor Bars Detection in Induction Motors Running at Very Low Slip Using a Hall Effect Sensor', *IEEE Sensors Journal*, 18(11), pp. 4602–4613. doi: 10.1109/JSEN.2018.2827204.
- Du, S. *et al.* (2018) 'A hall sensor-based position measurement with on-line model parameters computation for permanent magnet synchronous linear motor', *IEEE Sensors Journal*, 18(13), pp. 5245–5255. doi: 10.1109/JSEN.2018.2836218.
- Li, J. *et al.* (2015) 'Analysis and Reduction of Magnet Loss by Deepening Magnets in Interior Permanent-Magnet Machines with a Pole/Slot Ratio of 2/3', *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(11), pp. 1–5. doi: 10.1109/TMAG.2015.2445787.
- Pribadi, W. and Prasetyo, Y. (2019) 'Sistem Kontrol Motor Dc Brushless Dengan Fix Frequency Hybrid Fuzzy Logic Controller', *Journal of Electrical Electronic Control and Automotive Engineering (JEECAE)*, 4(2), pp. 269–272.

- Purnata, H., Pratiwi, A. F. and Yusuf, M. (2020) 'Mekanisme Soft Starting Pada Pengaturan Kecepatan Motor BLDC Menggunakan Kendali Logika Fuzzy', 1(1), pp. 13–19.
- Purnata, H., Rameli, M. and Effendie Ak, R. (2017) 'Speed control of three phase induction motor using method hysteresis space vector pulse width modulation', *2017 International Seminar on Intelligent Technology and Its Application: Strengthening the Link Between University Research and Industry to Support ASEAN Energy Sector, ISITIA 2017 - Proceeding, 2017-January(IIC)*, pp. 199–204. doi: 10.1109/ISITIA.2017.8124080.
- Rizal, J. G. (2020) *Booming di Seluruh Dunia karena Corona, Ini Tren Penjualan Sepeda Saat Ini*, *kompas.com*. Available at: <https://www.kompas.com/tren/read/2020/06/27/154500965/booming-di-seluruh-dunia-karena-corona-ini-tren-penjualan-sepeda-saat-ini?page=all>.
- Tang, M. and Zhuang, S. (2019) 'On speed control of a permanent magnet synchronous motor with current predictive compensation', *Energies*, 12(1). doi: 10.3390/en12010065.
- Yan, H. *et al.* (2019) 'DC Drift Error Mitigation Method for Three-Phase Current Reconstruction with Single Hall Current Sensor', *IEEE Transactions on Magnetics*, 55(2), pp. 1–4. doi: 10.1109/TMAG.2018.2869837.
- Yusuf, M. *et al.* (2019) 'Desain Simulasi Sistem Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Switching Space Vector Pulse Width Modulation', *Jurnal Ecotipe (Electronic, Control, Telecommunication, Information, and Power Engineering)*, 6(1), pp. 24–31. doi: 10.33019/ecotipe.v6i1.943.
- Zhu, X. *et al.* (2019) 'Systematic multi-level optimization design and dynamic control of less-rare-earth hybrid permanent magnet motor for all-climatic electric vehicles', *Applied Energy*, 253(July), p. 113549. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113549.