

PERANCANGAN DRIVER MOTOR DC *BRUSHLESS* DENGAN SISTEM PENGGEREMAN REGENERATIF PADA MOBIL LISTRIK

DESIGN OF BRUSHLESS DC MOTOR DRIVER WITH REGENERATIVE BRAKING SYSTEM FOR ELECTRIC CAR

Galih Ryan Bagastama¹, Angga Rusdinar, S.T., M.T., Ph.D.², Dr, Irwan Purnama, M.Sc.Eng.³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹galihryan118@gmail.com, ²angga22002@yahoo.com, ³irwa002@gmail.com

Abstrak

Perkembangan mobil listrik di Indonesia saat ini berlangsung sangat pesat. Mobil listrik menggunakan motor listrik sebagai penggerak dengan baterai sebagai sumber energi. Kendala utama yang muncul akibat penggunaan baterai adalah membutuhkan waktu *recharging* yang lama, dibutuhkan waktu berjam-jam untuk mengisi tenaga listriknya terisi penuh. Metode yang dikembangkan saat ini mengatasi kendala tersebut dengan memanfaatkan regenerasi energi saat dilakukan pengereman elektrik. Di dunia otomotif dikenal adanya pengereman regeneratif elektrik dengan mengkonversikan energi mekanis sistem menjadi energi listrik melalui proses menyalurkan energi dari motor listrik ke dalam baterai selama proses pengereman.

Pada Tugas Akhir ini dirancang suatu driver motor DC brushless dengan sistem pengereman regeneratif pada mobil listrik. Driver motor DC brushless dengan metode *six-step* menggunakan rangkaian *bidirectional* inverter 3 fasa. Driver motor menerima acuan kontrol dari komponen *switching* yang dikontrol oleh mikrokontroler. Pengereman regeneratif dilakukan dengan memanfaatkan sisa putaran motor DC brushless saat pedal gas dilepas. Arus regeneratif akan mengalir dari motor ke baterai melalui dioda *freewheeling*.

Hasil yang didapat dari Tugas Akhir ini adalah sistem mampu menggerakkan motor DC *brushless* di sekitar 160 RPM. *Bidirectional* inverter mampu mengonversi arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) dengan tegangan sekitar 24,4V – 24,8V ketika tanpa beban maupun dengan beban dan arus 0,3A – 0,4A dikondisi dengan beban. Rata-rata pengereman regeneratif mampu menghasilkan energi sebesar 5,47 Watt.

Kata kunci : Pengereman Regeneratif, Driver Motor Tiga Fasa, *Bidirectional* Inverter, DC *brushless* motor, MOSFET IRF3710.

Abstract

The development of electric cars in Indonesia at this time taking place very rapidly. The electric car uses an electric motor as the driving with a battery as an energy source. The main constraints arising from the use of the battery is recharging requires a long time, it takes hours to charge a fully charged electric power. The method developed is now overcome these obstacles by utilizing the braking energy regeneration electric current. Known in the automotive world with their electric regenerative braking system converts mechanical energy into electrical energy through the process of channeling energy from the electric motor to the battery during braking.

In this final project designed a brushless DC motor driver with a regenerative braking system on the electric car. Brushless DC motor driver with a six-step method using bidirectional inverter circuit 3 phase. Motor driver receives a reference control of switching components controlled by the microcontroller. Regenerative braking is done by exploiting the rest of the brushless DC motor rotation when the throttle is released. Regenerative currents will flow from the motor to the battery via a freewheeling diode.

The results obtained from this final project is the system able to drive the brushless DC motor at about 160 RPM. Bidirectional inverter capable of converting direct current (DC) into alternating current (AC) with a voltage of about 24,4V - 24,8V when no load or with the load and the current 0,3A - 0,4A conditioned with weights. On average the regenerative braking capable of generating energy of 5.47 Watt.

Keywords: Regenerative Braking, Three Phase Motor Driver, Bidirectional Inverter, DC Brushless Motor, MOSFET IRF3710.

1. Pendahuluan

Mobil listrik adalah mobil yang bergerak menggunakan motor listrik, dimana untuk mengendalikan motor listrik digunakan driver motor, dan menggunakan energi listrik yang tersimpan dalam baterai. Namun, baterai menjadi sisi terlemah yang membutuhkan waktu recharging yang lama, dibutuhkan waktu berjam-jam untuk mengisi tenaga listriknya terisi penuh. Mobil listrik saat ini masih dibatasi oleh jarak tempuh dan kecepatannya akibat efisiensi baterai yang masih rendah, sebagian besar mobil listrik jangkauannya masih sekitar 160 km. Alhasil, mobil listrik saat ini masih kurang pas digunakan untuk perjalanan jauh. Pengisian bahan bakar untuk mobil listrik masih minim, hal ini menimbulkan kekhawatiran jika mobil kehabisan daya saat perjalanan jauh.

Di dunia otomotif dikenal adanya pengereman regeneratif elektrik. Pengereman regeneratif elektrik adalah sebuah sistem pengereman dengan mengkonversikan energi mekanis sistem menjadi energi listrik melalui proses menyalurkan energi dari motor listrik ke dalam baterai selama proses pengereman[2]. Pada saat pengemudi menginjak pedal gas, supply listrik dari baterai masuk ke motor listrik sehingga mobil berakselerasi, sedangkan pada saat pengemudi melepas pedal gas atau menginjak pedal rem maka motor listrik akan berubah fungsi menjadi generator sehingga putaran roda mobil seakan-akan terbebani oleh generator tersebut. Pada saat inilah sisa putaran motor listrik akan terkonversi menjadi energi listrik yang digunakan untuk mengisi daya baterai[6].

Ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam proses pengereman regeneratif, yaitu kecepatan putar pada motor listrik, daya input ke motor listrik, dan output yang dihasilkan motor listrik saat sebagai generator. Ketiga hal ini sangat mempengaruhi kinerja dari sistem pengereman regeneratif.

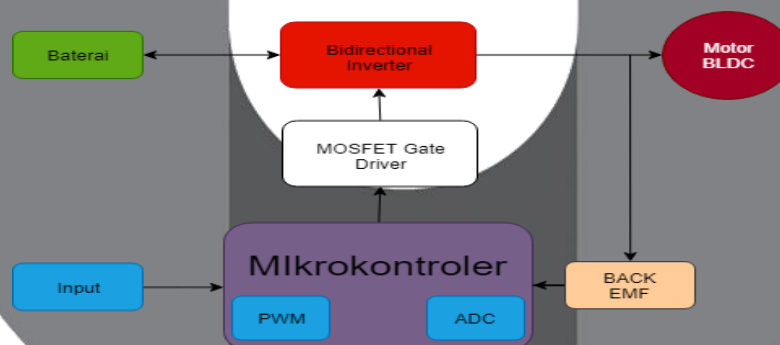
Oleh sebab itu penulis membangun sebuah driver motor DC brushless (BLDC) dengan sistem pengereman regeneratif pada mobil listrik untuk memahami bagaimana cara kerja driver motor dengan sistem pengereman regeneratif yang memanfaatkan sisa putaran motor dengan merubah energi mekanis menjadi energi listrik yang akan digunakan untuk mengisi daya baterai.

2. Dasar Teori /Material dan Metodologi/perancangan

2.1. Perancangan Sistem

Desain sistem atau perancangan sistem adalah merancang atau mendesain suatu sistem yang baik, yang isinya adalah langkah-langkah operasi dalam proses pengolahan data dan prosedur untuk mendukung operasi sistem. Desain ini digunakan sebagai acuan gambaran umum sistem atau mendefinisikan cara kerja sistem secara singkat dan umum. Perancangan ini terdiri dari diagram blok serta fungsi dan fitur.

2.1.1. Perancangan Sistem Perangkat Keras



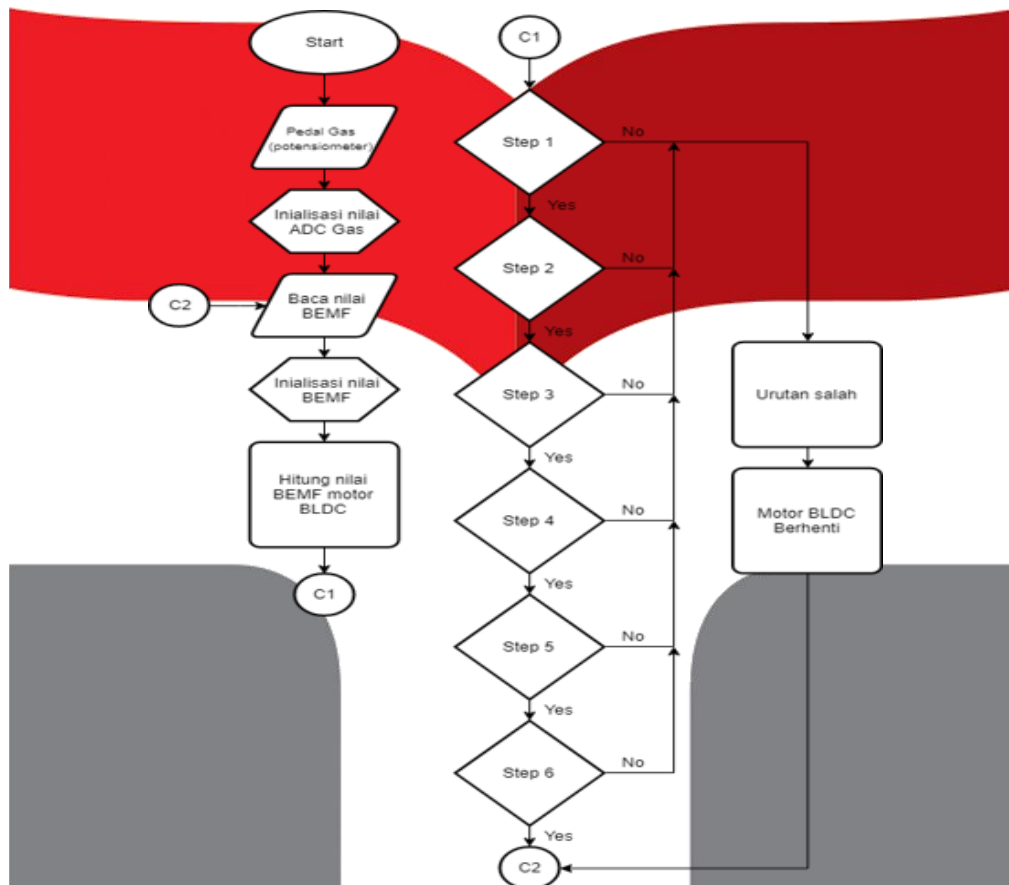
Gambar 1. Diagram Blok Sistem

Pada sistem ini dibagi kedalam beberapa bagian seperti yang tertampil di Gambar 1, antara lain baterai, mikrokontroler (Arduino Nano), rangkaian driver gate mosfet, bidirectional inverter dan *Back EMF* (rangkaiannya pembagi tegangan). Pada saat pedal gas diinjak, supply listrik dari baterai masuk ke rangkaian *bidirectional inverter* yang keluarannya dapat mengatur kecepatan motor BLDC.

Pada saat pedal gas dilepas, energi sisa dari putaran motor BLDC akan masuk ke rangkaian *bidirectional inverter* untuk mengubah tegangan AC menjadi DC. Tegangan DC keluaran dari *bidirectional inverter* akan digunakan untuk pengisian daya pada baterai.

2.1.2. Perancangan Sistem Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak akan dibuat menggunakan bahasa pemrograman Arduino, yaitu bahasa C yang meliputi pembacaan ADC, pembuatan sinyal PWM, algoritma mengurutkan fasa dan algoritma untuk mengaktifkan PWM. Berikut ini merupakan *flowchart* yang diprogram ke dalam Arduino Nano sebagai mikrokontroler untuk sistem ini.



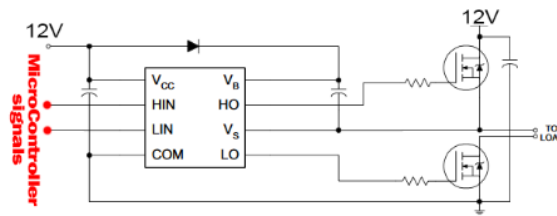
Gambar 2. Diagram Alir Sistem

Algoritma pengendalian dan fungsi-fungsi dengan menggunakan interrupt, implementasi dari perangkat lunak tersebut adalah sebagai berikut:

1. Pedal gas dengan nilai ADC akan menginisialisasi PWM, dan port I/O untuk urutan pada motor BLDC.
2. Untuk menentukan urutan fasa awal menggunakan nilai BEMF yang dihasilkan motor DC brushless untuk mendapat urutan fasa awal yang sesuai dengan algoritma.
3. Setelah posisi rotor sesuai dengan urutan fasa yang ditetapkan, Back EMF membaca keadaan dan melihat Back EMF tersebut mengikuti urutan fasa atau tidak.
4. Jika Back EMF sesuai dengan kombinasi urutan fasa yang ditetapkan sesuai maka motor DC brushless akan berputar.
5. Motor DC brushless akan berhenti atau ke kunci ketika urutan fasa terjadi kesalahan.

2.2. IR2101

Rangkaian gate driver berfungsi sebagai penghubung antara sinyal pengendali tegangan titik G terhadap S pada MOSFET. Tegangan tersebut bernama voltage gate to source (VGS). Secara umum metode yang sering digunakan adalah metode bootstrap.

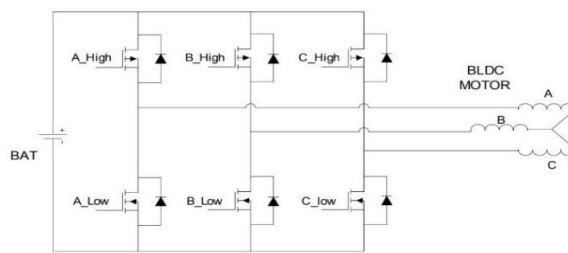


Gambar 1. Rangkaian bootstrap MOSFET setengah jembatan[14]

Rangkaian tersebut berfungsi untuk mensaklarkan kaki G terhadap S. Jika MOSFET diinginkan menyala maka rangkaian akan melakukan fungsi push sehingga kaki G dan S terhubung ke sumber tegangan, sedangkan jika diinginkan MOSFET mati maka rangkaian akan melakukan fungsi pull sehingga kaki G dan S terhubung singkat melalui transistor pull di dalam IC tersebut. Referensi dari VGS keluaran LO adalah ground sehingga VGS yang keluar di kaki LO sebenarnya bisa tegangan yang sama dengan yang digunakan untuk menyalakan IC.

2.3. Penyearah Tiga Fasa

Rangkaian penyearah 3 fasa pada sistem ini menggunakan enam buah dioda internal pada transistor A_High, B_High, dan C_High katodanya disatukan sebagai terminal positif. Dioda A_Low, B_Low, dan C_Low anodanya disatukan sebagai terminal negatif.



Gambar 4. Rangkaian bidirectional inverter[10]

Dalam satu siklus setiap pasangan dioda akan konduksi selama 60° dengan urutan konduksi C_High+B_Low, C_High+A_Low, B_High+A_low, B_High+C_Low, A_High+C_Low, A_High+B_Low dan setiap dioda akan konduksi selama 120° dalam satu siklus periode tegangan 3 fasa masukan. Dalam satu siklus gelombang tiga fasa terjadi 6 kali komutasi dari ke enam pasang dioda secara bergantian dan bersamaan.

3. Pembahasan

3.1. Pengujian pembangkit PWM

Pengujian pembangkit PWM ini dilakukan dengan membaca nilai ADC dari potensiometer (pedal gas), ADC dari potensiometer tersebut dibaca oleh mikrokontroller Arduino Nano, kemudian untuk mendapatkan nilai PWM maka dalam pemrogramannya harus mengubah nilai 0-1023 ke nilai 0-255.

Tabel 1. Kondisi nilai PWM terhadap tegangan

No.	Nilai ADC	Nilai PWM	Volt
1	0	0	0
2	205	50	1
3	410	100	1,97
4	604	150	2,94
5	809	200	3,93
6	1023	255	5

Pada Tabel 1 bahwa semakin besar nilai PWM maka semakin besar pula tegangan yang dikeluarkan, sehingga keluarannya tersebut dapat diatur sesuai dengan kebutuhan.

3.2. Pengujian pembacaan nilai Back EMF

Back EMF menggunakan rangkaian pembagi tegangan yang akan mengubah tegangan besar menjadi tegangan yang lebih kecil. Keluaran pembagi tegangan akan menjadi *input* ADC Arduino Nano untuk menentukan urutan komutasi pada motor BLDC.

Tabel 2. Percobaan *Back EMF*

Respon Ke-	Vin (V)	Nilai ADC			Vout (V)		
		A	B	C	A	B	C
1	24,29	518	317	338	2,53	1,55	1,65
2	24,29	519	376	311	2,54	1,84	1,52
3	24,29	511	313	8	2,50	1,53	0,04
4	24,36	251	17	430	1,23	0,08	2,10
5	24,36	219	28	410	1,07	0,14	2,00

Dari Tabel 2 diatas terlihat bahwa nilai-nilai ADC yang terbaca pada mikrokontroler dari 0 sampai sekitar 500 dengan tegangan *input* 24,29 Volt dan 24,36 Volt, *Back EMF* A, B, dan C menggunakan rangkaian pembagi tegangan ($R_1 = 2000$ ohm dan $R_2 = 220$ ohm).

3.3. Pengujian bidirectional inverter tanpa beban

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja *bidirectional* inverter ini berjalan baik atau sebaliknya. Pengujian ditunjukkan pada *bidirectional* inverter yang merupakan sistem utama untuk mendrive motor BLDC. Pada pengujian kinerja *bidirectional* inverter dilakukan tanpa beban dengan *input* tegangan 24V 45Ah.

Tabel 3. Percobaan Tanpa Beban

Percobaan Ke-	Vin (Vdc)	Vout (Vac)		
		A	B	C
1	24,35 V	24,4 V	24,6 V	24,4 V
2	24,35 V	24,8 V	24,6 V	24,6 V
3	24,35 V	24,4 V	24,6 V	24,6 V
4	24,36 V	24,6 V	24,8 V	24,6 V
5	24,33 V	24,4 V	24,6 V	24,6 V

Dari tabel 3 diatas terlihat bahwa hasil dari setiap percobaan tegangan *output* yang dihasilkan tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Nilai *output* maksimum ialah 24,8 Vac dan minimum 24,6 Vac disetiap fasa A, B, dan C.

3.4. Pengujian bidirectional inverter dengan beban

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja *bidirectional* inverter ini berjalan baik atau sebaliknya. Pengujian ditunjukkan pada *bidirectional* inverter yang merupakan sistem utama untuk mendrive motor BLDC. Pada pengujian kinerja *bidirectional* inverter diberi beban berupa motor BLDC dengan *input* tegangan 24V 45Ah.

Tabel 4. Percobaan Dengan Beban

Percobaan Ke-	Vin (Vdc)	Iin (A)	Vout (Vac)			Iout (A)			RPM
			A	B	C	A	B	C	
1	24,97	0,1	24,4	24,6	24,8	0,4	0,4	0,3	161,4
2	24,93	0,3	24,6	24,8	24,4	0,4	0,3	0,4	161,4
3	24,91	0,1	24,6	24,8	24,4	0,4	0,3	0,4	161,3
4	24,86	0,2	24,8	24,6	24,6	0,4	0,3	0,3	161,4
5	24,77	0,2	24,4	24,6	24,8	0,4	0,3	0,4	161,5

Dari tabel 4 terlihat bahwa setiap perubahan tegangan input akan menghasilkan tegangan output sekitar 24,4 Vac sampai 24,8 Vac. Pengujian dilakukan dengan beban berupa Motor BLDC 350 W dengan supply baterai lead acid 24V 45Ah. Motor BLDC berputar dengan kecepatan sekitar 160 RPM. Namun, arus yang dihasilkan pada Iin dan Iout sangatlah kecil, dikarenakan pada motor BLDC tidak ada beban.

3.5. Pengujian bidirectional inverter saat regeneratif

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja *bidirectional* inverter ini berjalan baik atau sebaliknya sebagai penyearah 3 fasa dan untuk mengetahui adanya aliran daya dari *bidirectional* inverter ke baterai pada saat potensiometer (pedal gas) dilepas.

Tabel 5. Pengujian Pengereman Regeneratif

Percobaan Ke-	Vin (V)	Iin (A)	Pin (W)	Vout (V)	Iout (A)	Pout (W)
1	24,97	0,1	2,497	14,16	0,4	5,664
2	24,93	0,3	7,479	14,41	0,3	4,323
3	24,91	0,1	2,491	14,27	0,4	5,708
4	24,86	0,2	4,972	14,22	0,4	5,688
5	24,75	0,1	2,475	14,34	0,5	7,17

Tabel 5 diatas merupakan data hasil pengujian pengereman regeneratif yang memanfaatkan sisa putaran motor ketika potensiometer (pedal gas) dilepas. Dapat dilihat bahwa daya yang dihasilkan pada saat potensiometer (pedal gas) hingga motor BLDC berhenti berputar ialah sekitar 4 Watt sampai 7 Watt pada setiap percobaannya.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisa driver motor dc *brushless* dengan sistem pengereman regeneratif ini didapat kesimpulan sebagai berikut:

1. Motor BLDC dikendalikan menggunakan metode PWM six-step.
2. Dengan menggunakan metode PWM six-step tersebut mampu menghasilkan gelombang trapezoid sebagai input ke motor BLDC.
3. Hasil gelombang Back EMF menyerupai hasil gelombang fasa yang digunakan untuk mendrive motor BLDC.
4. Bidirectional inverter memiliki output tegangan dengan rentang 24,4 V – 24,8 V baik menggunakan beban berupa motor BLDC maupun tanpa beban.
5. Motor BLDC berputar dengan kecepatan sekitar 160 RPM dengan arus yang sangat kecil ialah 0,3 A sampai 0,4 A.
6. Bidirectional inverter menghasilkan aliran daya dengan rentang sekitar 4 Watt sampai 7 Watt saat regeneratif.

Daftar Pustaka:

- [1] Fahmi, A. A., Ashari, M., & Suryoatmojo, H. (2013). *Digital Library of Institut Teknologi Sepuluh Noverber (ITS)*. Sistem Pengereman Elektris *Brushless* DC Motor Menggunakan *Bidirectional* Inverter untuk Aplikasi Kendaraan Listrik.
- [2] Artikel Teknologi Indonesia. (2014, 31 Oktober). Prinsip Kerja Pengereman Regeneratif. Diperoleh 10 September 2018, dari <https://artikel-teknologi.com/prinsip-kerja-pengereman-regeneratif/>
- [3] Dharmawan, Abe. 2009. Pengendalian Motor *Brushless* DC dengan Metode PWM Sinusoidal Menggunakan ATmega16. Depok: Universitas Indonesia Library.
- [4] W. Hart, Daniel. 2011. Power Electronics. New York. The McGraw-Hill Companies
- [5] Andhika, Ranga Jaya. 2018. Perancangan dan Implementasi Driver Motor Tiga Fasa untuk Pengendali Kecepatan Motor BLDC Berbasis PWM pada Mobil Listrik. Bandung: Open Library Telkom University.
- [6] Dity, Deny Faturrahman. 2016. Perancangan dan Implementasi Sistem Pengereman Regeneratif pada Mobil Listrik dengan Penggerak BLDC Menggunakan Kontrol Logika Fuzzy. Bandung: Open Library Telkom University.
- [7] Aslimeri, dkk. 2008. Teknik Transmisi Tenaga Listrik. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional.
- [8] Linggasari, Yuni Rizky. 2016. Rancang Bangun Bidirectional Converter Menggunakan Kontrol Proportional-Integral Untuk Sistem Pengereman Regeneratif. Bandung: Open Library Telkom University.
- [9] S. Akmad, J. Arman, S. Indhana. Rancang Bangun Sistem Efisiensi Energi Listrik di Lab Rangkaian Listrik D3, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya – ITS.
- [10] C. Jarrad, G. Özdemir, N. Zorica, N. Andrew, M. Aaron. 2009. REGENERATIVE BRAKING IN AN ELECTRIC VEHICLE, University of South Australia.
- [11] W. Brown, “*Brushless* DC Motor Made Easy”, Microchip Technology Inc., 2002.
- [12] Han-Chen Wu, Min-Yi Wen, & Ching-Chang Wong, “Speed Control of BLDC Motors Using Hall Effect Sensor Based on DSP”. 2016 *International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*. Taiwan, 2016.
- [13] Nian, X., Peng, F. & Zhang, H. 2014. *Regenerative Braking System of Electric Vehicle Driven by Brushless DC Motor*, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS. 61 (10): 5798-5808.

- [14] ELECTRONOBS. (2017, 2 Januari). ESC – Electric Speed Control. Diperoleh 22 Maret 2019, dari http://www.electrionoobs.com/eng_circuitos_tut4.php
- [15] Digi-Key. (2013, 19 Juni). Controlling Sensorless, BLDC Motor Via *BACK* EMF. Diperoleh 7 Juli 2019, dari <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2013/jun/controlling-sensorless-bldc-motors-via-Back-emf>

