

Implementasi 2 Lilitan Phasa Terhubung Terhadap Tegangan Pada Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) Rotor Luar Dengan Analisis Anova

Sitti Amalia

Institut Teknologi Padang, Padang
E-mail: sittiamalia23213059@gmail.com

ABSTRACT

Driver is a major part of a vehicle. One part of the driver is a Brushless Direct Current Motor (BLDC). BLDC has many advantages than the ordinary DC motor, in example is a commutation which can be separated, such that 2-phase winding connected commutation. 2-phase winding connected commutation process begins from 30° initial movement point. In this research, the response we want to observe is the number of RPM for each increment of dutycycle given in BLDC motors, with varying values of voltage and load and anova is scientific statistics method that used to see the response of the system. This research has been successfully implemented on BLDC motor speed control system with dutycycle regulation.

Keywords: BLDC , RPM , Load , no-load

ABSTRAK

Bagian penggerak merupakan bagian utama dari sebuah kendaraan. Salah satu bagian dari penggerak adalah *Brushless Direct Current Motor* (BLDC). BLDC memiliki banyak keunggulan dari motor DC, salah satunya adalah komutasi yang dapat dipisahkan, yaitu komutasi 2 lilitan phasa terhubung. Komutasi 2 lilitan phasa terhubung proses awal pergerakannya dimulai dari 30° untuk setiap perpindahannya secara elektrik. Dalam penelitian ini respon yang ingin dilihat adalah jumlah RPM pada setiap kenaikan *duty-cycle* yang diberikan pada motor BLDC, dengan memvariasikan nilai tegangan dan anova merupakan metode keilmuan statistik yang digunakan untuk melihat respon sistem. Dalam penelitian ini telah diimplementasikan dengan baik sistem kendali kecepatan BLDC dengan pengaturan *duty-cycle*.

Kata kunci : BLDC, dutycycle, Beban, tanpa beban

1. PENDAHULUAN

Bagian penggerak pada motor merupakan bagian utama dari sebuah kendaraan. Salah satu bagian dari penggerak motor itu adalah motor magnet permanen (BLDC). BLDC digunakan karena banyak kelebihan yang dimiliki, diantaranya, tidak ada energi listrik yang diserap oleh sistem eksitasi medan magnet, dengan demikian tidak ada kerugian energi sehingga bisa lebih efisien, memiliki torsi dan daya yang lebih tinggi dibandingkan dengan motor induksi, memiliki konstruksi yang sederhana sehingga bisa mengurangi biaya produksi untuk penggunaan pada mesin-mesin tertentu.

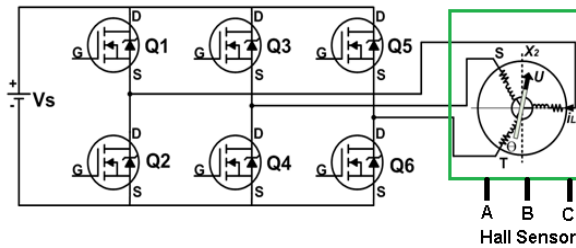
Motor magnet permanen arus searah tanpa sikat memiliki komutasi 2 lilitan phasa terhubung. Komutasi 2 lilitan phasa terhubung proses awal pergerakannya dimulai dari 30° untuk setiap perpindahannya secara elektrik. Penulis ingin melihat pengaruh komutasi 2 lilitan phasa terhubung dengan melakukan beberapa perlakuan pada motor BLDC, dengan memvariasikan nilai tegangan terhadap BLDC. Sedangkan RPM merupakan respon yang diamati pada setiap besarnya nilai PWM yang diberikan. Pengolahan data dan pengambilan kesimpulan menggunakan analisa *Oneway Anova*.

2. SISTEM KENDALI BLDC

2.1 Motor BLDC dan driver Motor BLDC 3-fasa

Motor BLDC semakin banyak digunakan dalam aplikasi motor karena memiliki banyak keuntungan. Motor BLDC tidak memiliki sikat sehingga banyak atau bahkan tidak memerlukan perawatan. Tidak menghasilkan suara atau kebisingan dibandingkan dengan motor dc konvensional yang menggunakan sikat. Motor BLDC terdiri dari rotor yakni bagian yang berputar dan bagian stator yakni bagian yang dialiri arus listrik secara berurutan. Serta sensor *hall* yang sudah terintegrasi dengan motor BLDC yang dapat digunakan sebagai pendeteksi posisi medan magnet rotor.

Prinsip kerja motor BLDC dimulai dengan bagian rotor dapat berputar karena lilitan pada stator bergantian dialiri arus listrik secara berurutan dan berputar sehingga terbentuk medan magnet yang berputar yang diikuti oleh medan magnet pada sisi rotor. Perbedaanannya terletak pada pengaturan sistem pensaklaran (*switching*) yang mana dilakukan oleh saklar elektronik. Pensaklaran motor BLDC selalu mengatur sedemikian rupa sehingga lilitan stator yang menghasilkan arah medan magnet yang



Gambar 1 Rangkaian Sederhana Sistem Pensaklaran Motor BLDC 3 Fasa

Tabel 1 Pensaklaran 2 Lilitan Fasa Terhubung

Urutan ke-n	Sudut elektrik (θ_e)	Polaritas terminal lilitan stator			Keluaran sensor hall		
		Fasa Terminal Hijau (v_R)	Fasa Terminal Biru (v_S)	Fasa Terminal Kuning (v_T)	Hijau	Biru	Kuning
0	30°	+Vs	GND	NC=0	1	0	1
1	90°	+Vs	NC=0	GND	1	0	0
2	150°	NC=0	+Vs	GND	1	1	0
3	210°	GND	+Vs	NC=0	0	1	0
4	270°	GND	NC=0	+Vs	0	1	1
5	330°	NC=0	GND	+Vs	0	0	1

membentuk sudut dengan arah medan magnet rotor. Sehingga magnet pada rotor selalu berusaha menggerakkan rotor agar arah medan magnet rotor dan medan magnet yang dihasilkan lilitan stator menjadi sejajar.

Agar gerak rotor ini menjadi gerak berputar yang kontinyu maka lilitan stator yang dialiri arus listrik selalu berganti sebelum arah medan magnet rotor menjadi sejajar dengan arah medan magnet oleh lilitan stator. Hal tersebut mengharuskan adanya waktu (timing) pensaklaran yang tepat. Untuk menentukan timing komutasi yang tepat pada motor ini sehingga didapatkan torsi dan kecepatan yang konstan, diperlukan 3 buah sensor hall dan atau encoder. Timing pensaklaran (komutasi) ini ditentukan dengan cara mendeteksi medan magnet rotor dengan menggunakan 3 buah sensor hall untuk mendapatkan 6 kombinasi timing yang berbeda

Driver 3 fasa motor BLDC digunakan sebagai sistem pensaklaran yang menentukan pensaklaran (komutasi) sebagai bagian dari proses untuk memutar motor BLDC. Seperti gambar 1 di atas.

2.2 Sistem Pensaklaran (Komutasi) Motor BLDC

Dikarenakan motor BLDC 3 fasa memiliki 3 terminal pada lilitan statornya, maka dapat dilakukan pensaklaran, yakni kombinasi pensaklaran dengan kombinasi 2 saklar terhubung. Tabel berikut menunjukkan urutan pensaklaran (komutasi) sistem pensaklaran 2 terminal terhubung baik untuk arah putaran searah jarum jam dan berlawanan arah jarum jam seperti pada tabel 1.

2.3 Cara Kerja Motor BLDC

Motor *Brushless Direct Current Motor* (BLDC) ini dapat bekerja ketika stator yang terbuat dari kumparan diberikan arus 3 fasa. Akibat arus yang melewati kumparan pada stator timbul medan magnet (B):

$$B = \frac{\mu N I}{2i} \quad (1)$$

Dimana

- N = Jumlah lilitan
- I = Arus,
- l = Panjang lilitan
- μ = Merupakan permeabilitas bahan.

Karena arus yang diberikan berupa arus AC fasa, nilai medan magnet dan polarisasi setiap kumparan akan berubah-ubah setiap saat. Akibat yang ditimbulkan dari adanya perubahan polarisasi tersebut dan besar medan magnet tiap kumparan adalah terjadinya medan putar magnet dengan kecepatan N_s :

$$N_s = \frac{120f}{p} \quad (2)$$

Dimana

- F = Frekuensi tegangan input dinyatakan dalam Hz per satuan detik,
- p = Jumlah kutub (*pole*) pada rotor,
- 120 = Satu putaran (360) per 3 fasa motor.

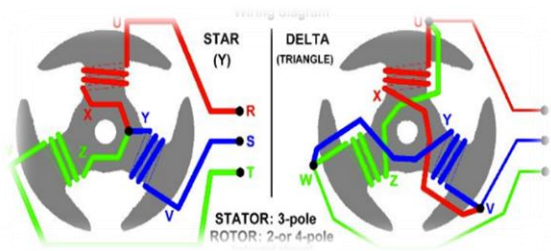
Ketika motor berputar permanent magnet pada rotor bergerak melewati kumparan stator dan menginduksi potensial listrik dalam kumparan tersebut, maka terjadinya BEMF. BEMF berbanding lurus dengan kecepatan motor dan ditentukan dalam KV.

$$RPM = K_v \times Volts$$

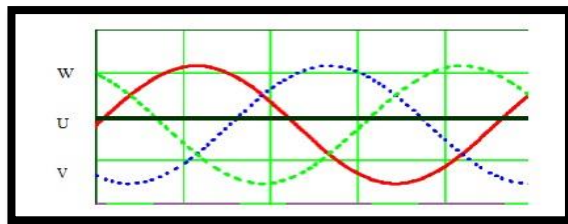
$$BEMF = RPM / K_v$$

Dimana RPM (*Revolutions per Minute*) dan KV menyatakan kecepatan motor konstan diukur dalam RPM per volt. Gambar 2 merupakan bentuk dari wiring diagram BLDC.

Berdasarkan Gambar 2, medan putar magnet stator timbul akibat adanya perubahan polaritas pada stator U, V, dan W. Perubahan polaritas ini terjadi akibat adanya arus yang mengalir pada stator. Berdasarkan Gambar 3, ketika stator U diberikan tegangan negative maka akan timbul medan magnet dengan polaritas negative sedangkan V dan W yang diberikan tegangan positif akan memiliki polaritas positif. Akibat adanya perbedaan polaritas antara medan magnet kumparan stator dan magnet rotor,



Gambar 2 Wiring diagram BLDC

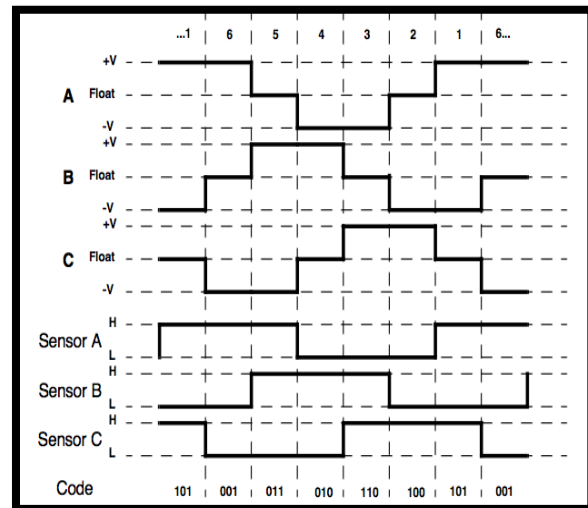


Gambar 3 Tegangan Stator BLDC Motor

sisi positif magnet rotor akan berputar mendekati medan magnet stator U, sedangkan sisi negatifnya akan berputar mengikuti medan magnet stator V dan W. Akibat tegangan yang digunakan berupa tegangan AC sinusoidal, medan magnet stator U, V, dan W akan berubah-ubah polaritasnya dan besarnya mengikuti perubahan tegangan sinusoidal AC. Ketika U dan V memiliki medan magnet negative akibat mendapatkan tegangan negative dan W memiliki medan magnet positif akibat tegangan positif, magnet permanen rotor akan berputar menuju ke polaritas yang bersesuaian yaitu bagian negative akan berputar menuju medan magnet stator W dan sebaliknya bagian positif akan berputar menuju medan magnet stator U dan V. Selanjutnya ketika V memiliki medan magnet negative dan U serta W memiliki medan magnet positif, bagian positif magnet permanen akan berputar menuju V dan bagian negative akan menuju U dari kumpulan W. Karena tegangan AC sinusoidal yang digunakan berlangsung secara kontinu, proses perubahan polaritas tegangan pada stator ini akan terjadi secara terus menerus sehingga menciptakan medan putar magnet stator dan magnet permanen rotor akan berputar mengikuti medan putar magnet stator ini. Hal inilah yang menyebabkan rotor pada BLDC dapat berputar.

Secara umum brushless motor dibagi menjadi 2, yaitu sensored dan sensorless yaitu:

- a) Sensored, brushless motor jenis ini dilengkapi dengan *encoder* dan atau *hall effect sensor* yang berfungsi sebagai detektor pada medan magnet, *hall effect sensor* akan menghasilkan sebuah tegangan yang proporsional dengan kekuatan medan magnet yang diterima oleh sensor



Gambar 4 Sensor Hall dan Perubahan Sinyal PWM

tersebut. Motor jenis ini memiliki tingkat efisiensi yang tinggi dan lebih halus pergerakannya dibanding dengan motor brushless sensorless.

- b) Sensorless, brushless motor jenis ini tidak dilengkapi dengan *encoder* dan atau hall effect sensor, sehingga untuk mengetahui pergerakan dari motor jenis ini bias dilakukan dengan cara mendeteksi dari BEMF dan zero-crossing.

2.4 Hall Sensor

Hall sensor atau *hall-effect sensor* merupakan sensor yang digunakan untuk mendeteksi medan magnet. *Hall-effect* sensor akan menghasilkan sebuah tegangan yang proporsional dengan kekuatan medan magnet yang diterima oleh sensor tersebut. Pada umumnya sensor ketiga sensor *hall* terpisah sebesar 120 derajat satu dengan yang lainnya walaupun pada kondisi khusus tidak. Kondisi khusus pada motor bldc yang memiliki *pole* dalam jumlah banyak (diatas 6 *pole*). Kelebihan dari sensor *hall* ini adalah peletakan dari sensor *hall* tidak perlu terlalu presisi dengan rotor selain itu untuk motor dengan *pole* yang berbeda cukup dengan menggeser letak sensor *hall* tidak tepat satu dengan lainnya, misalkan pada motor 2 *pole* tidak benar-benar 120 derajat satu dengan lainnya, kesalahan dalam penentuan *timing* perubahan komutasi dapat terjadi, bahkan ada kemungkinan tidak didapatkannya 6 kombinasi yang berbeda. Apabila posisi salah satu atau ketiga sensor *hall* tidak berbeda terlalu jauh dengan letak sensor *hall* yang seharusnya, misalkan seharusnya 120 derajat, posisi dalam implementasi 118 derajat, perbedaan itu dapat dikompensasi dalam algoritma pengendalian atau bahkan dapat diabaikan.

Dengan menggunakan tiga sensor *hall* akan didapatkan 6 kombinasi yang berbeda. Keenam

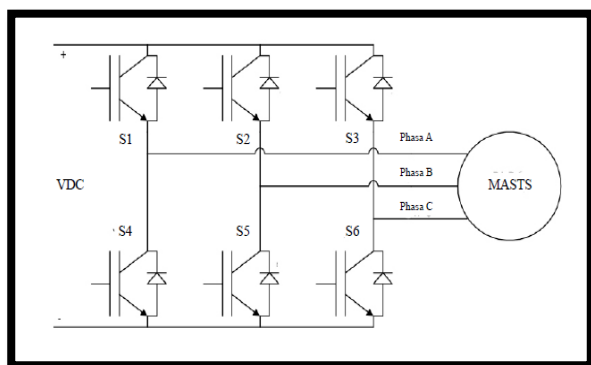
kombinasi ini menunjukkan *timing* perubahan komutasi. Ketika dari ketiga sensor *hall* didapatkan kombinasi tertentu, sinyal PWM pada suatu *step* harus diubah sesuai dengan kombinasi yang didapatkan.

Pada Gambar 4 ketika *hall* sensor menunjukkan kombinasi tertentu maka sinyal PWM akan berubah mengikuti kombinasi yang telah ditentukan, misalkan kombinasi sensor *hall* menunjukkan 101, maka PWM A dan B akan menyala sedangkan C akan *floating*, kombinasi 001, PWM A dan C menyala sedangkan B *floating*, dan seterusnya. Kondisi *floating* hanya terdapat pada metode PWM *six-step*.

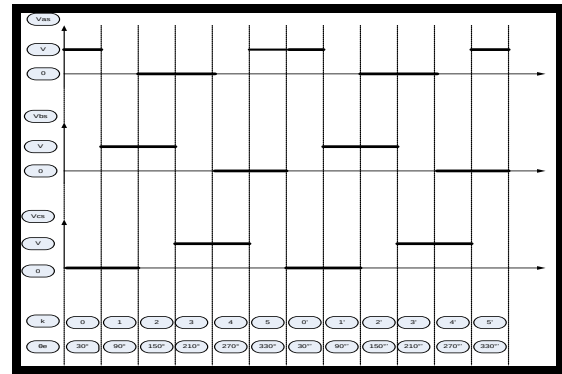
2.5 Teori Pensaklaran

Secara sederhana rangkaian pensaklaran motor BLDC dapat dilihat seperti Gambar 2.5. Pada motor BLDC, yang menggantikan peran sikat untuk mengatur komutasi motor adalah saklar elektronik. Pada penelitian ini, yang digunakan sebagai saklar elektronik adalah MOSFET. Keadaan saklar elektronik, yaitu tersambung (ON) atau tidak tersambung (OFF), ditentukan oleh mikrokontroler yang mengendalikan setiap saklar elektronik tersebut. Keadaan setiap saklar elektronik tersebut dikendalikan sehingga lilitan pada stator mendapatkan polaritas tegangan tertentu secara berurutan sehingga motor dapat berputar.

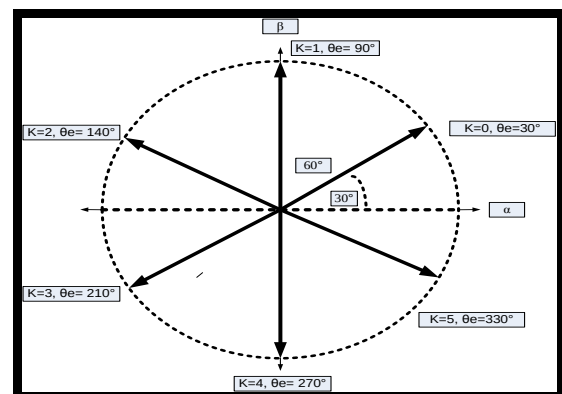
Karena motor 3 fasa memiliki 3 terminal pada lilitan statornya, maka terdapat 3 kombinasi pensaklaran yang dapat diterapkan pada motor 3 fasa, yaitu kombinasi pensaklaran dengan 3 lilitan fasa terhubung semua yang terdiri dari 6 keadaan pensaklaran, kombinasi pensaklaran dengan hanya 2 lilitan fasa terhubung yang terdiri dari 6 keadaan pensaklaran, dan kombinasi gabungan pensaklaran 3 lilitan fasa terhubung dan 2 lilitan fasa terhubung yang terdiri dari 12 keadaan pensaklaran.



Gambar 5 Skema Inverter Tiga Fasa



Gambar 6 Tegangan Terminal Lilitan Stator Pada Kombinasi Pensaklaran 2 Lilitan Fasa Terhubung



Gambar 7 Diagram Fasor Kombinasi Pensaklaran 2 Lilitan Fasa Terhubung

2.6 PWM

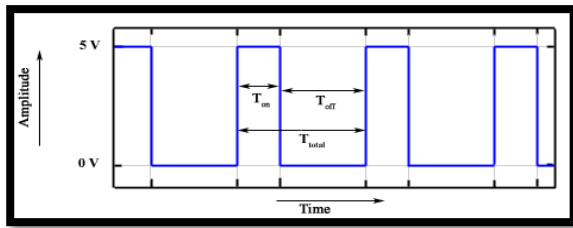
Modulasi lebar pulsa (PWM) dicapai dengan bantuan sebuah gelombang kotak yang mana siklus kerja (*dutycycle*) gelombang dapat diubah-ubah. Untuk mendapatkan sebuah tegangan keluaran yang bervariasi yang merupakan nilai rata-rata dari gelombang tersebut. Seperti pada Gambar 8 di bawah.

T_{on} adalah waktu dimana tegangan keluaran berada pada posisi tinggi (baca: high atau 1) dan, T_{off} adalah waktu dimana tegangan keluaran berada pada posisi rendah (baca: low atau 0). Anggap T_{total} adalah waktu satu siklus atau penjumlahan antara T_{on} dengan T_{off} , biasa dikenal dengan istilah “periode satu gelombang”.

$$T_{total} = T_{on} + T_{off} \quad (3)$$

Siklus kerja atau *dutycycle* sebuah gelombang di definisikan sebagai,

$$D = \frac{T_{on}}{(T_{on} + T_{off})} = \frac{T_{on}}{T_{total}} \quad (4)$$



Gambar 8 Modulasi Lebar Pulsa pwm

Tegangan keluaran dapat bervariasi dengan *dutycycle* dan dapat dirumuskan sebagai berikut,

$$V_{out} = D \times V_{in} \quad (5)$$

sehingga:

$$V_{out} = \frac{T_{on}}{T_{total}} \times V_{in} \quad (6)$$

Dari rumus diatas dapat ditarik kesimpulan bahwa tegangan keluaran dapat diubah-ubah secara langsung dengan mengubah nilai T_{on} . Apabila T_{on} adalah 0, V_{out} juga akan 0. Apabila T_{on} adalah T_{total} maka V_{out} adalah V_{in} atau katakanlah nilai maksimumnya. Ada beberapa alasan dalam memilih PWM:

1. Dalam pembangkitan PWM hanya butuh 1 bit dari mikrokontroller (bila dibandingkan dengan DAC konvensional butuh 8bit, bahkan mencapai 10bit).
2. Pada hakikatnya sinyal PWM merupakan sinyal yang ON dan OFF, *driver*-nya dapat dibangun dengan rangkaian *BJT* sedangkan DAC dibutuhkan rangkaian *driver* lebih kompleks.
3. PWM lebih sering dipakai dalam dunia industry

2.7 RPM

RPM merupakan kependekan dari Revolutions Per Minute. RPM atau Revolutions Per Minute adalah banyaknya putaran yang dilakukan dalam satu menit. RPM digunakan sebagai satuan ukur banyaknya putaran mesin dalam satu menit.

2.8 Anova OneWay

Anova satu arah (*one way anova*) digunakan apabila yang akan dianalisis terdiri dari satu variabel terikat dan satu variabel bebas. Interaksi suatu kebersamaan antar faktor dalam mempengaruhi variabel bebas, dengan sendirinya pengaruh faktor-faktor secara mandiri telah dihilangkan. Jika terdapat interaksi berarti efek faktor satu terhadap variabel

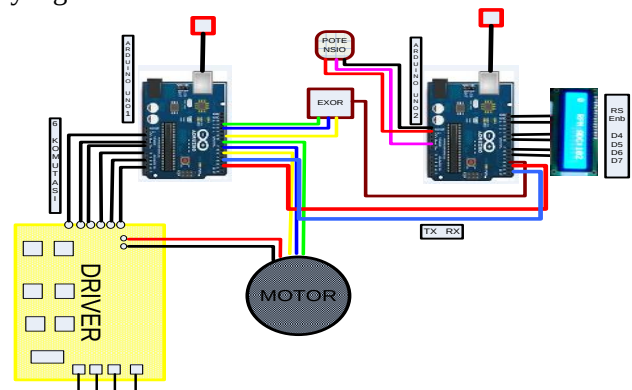
terikat akan mempunyai garis yang tidak sejajar dengan efek faktor lain terhadap variabel terikat sejajar (saling berpotongan), maka antara faktor tidak mempunyai interaksi

Dalam pengujian data Anova 1 arah dengan menggunakan software diperlukan software penunjang, yaitu program SPSS. Dalam pengujian kasus Anova 1 arah dengan menggunakan program SPSS.

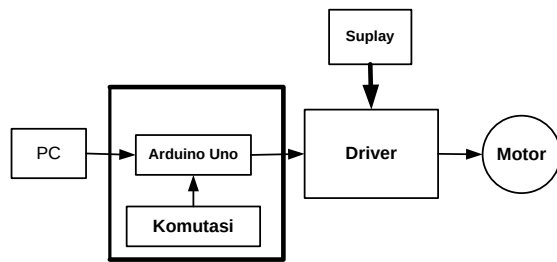
3. PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI

Dalam penelitian ini akan mengimplementasikan sistem kecepatan motor BLDC 3 fasa untuk aplikasi kendaraan listrik untuk melihat besarnya torsi dari masing-masing komutasi dilihat dari banyaknya putaran motor dalam satu menit (RPM) yang mana sistem ini memiliki blok diagram keseluruhan seperti gambar 9. Dari Gambar 9 dapat dilihat bahwa dalam penelitian ini penulis menggunakan dua buah mikrokontroler Arduino Uno, arduino uno pertama digunakan untuk proses komutasi, sedangkan pada arduino uno kedua digunakan untuk proses pembacaan banyak putarannya per menit (rpm) dan untuk display ke lcd. Driver merupakan alat yang berfungsi untuk penghubung motor ke sistem yang penulis rancang. Potensio berfungsi untuk mengatur besar kecilnya *dutycycle* dari pwm. Penambahan rangkaian exor yang digunakan untuk menyatukan ketiga sensor hall, sehingga keluaran dari sensor hall itu bernilai satu atau nol saja, ini digunakan karena penulis menggunakan program counter dalam perhitungan rpm nya seperti gambar 10.

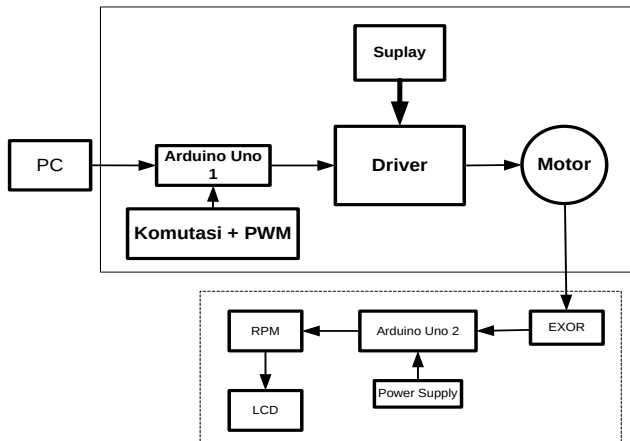
Pada Gambar 10. ini belum menggunakan pengendali pwm. Digunakan untuk melihat kombinasi dari sistem pensaklaran yang akan dirancang. Menggunakan satu buah mikrokontroler Arduino Uno, PC digunakan untuk proses download program komutasi. Gambar 11 merupakan blok diagram lengkap dari pengendali BLDC yang penulis rancang, pada blok ini penulis telah menggunakan pengendali pwm dan pembacaan counter, sehingga didapatkan nilai rpm dari motor yang diteliti.



Gambar 9 Skema Diagram Alir Sistem Kendali BLDC



Gambar 10 Skema Diagram Alir Komutasi Sistem Kendali BLDC



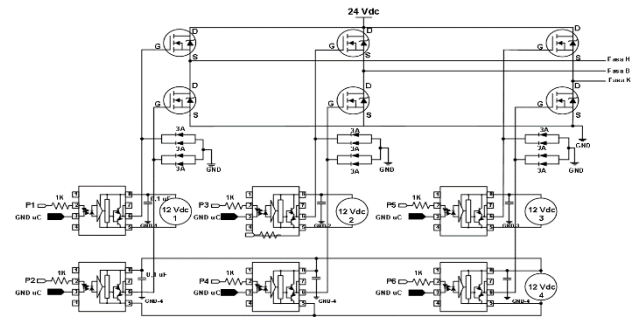
Gambar 11 Sistem Kendali BLDC

a. Sistem Penggerak (Driver) Motor BLDC 3 Fasa

Detail gambar rangkaian pensaklaran yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3. Rangkaian pensaklaran ini adalah rangkaian yang dirancang dan dibuat dengan menyempurnakan rangkaian pada penelitian sebelumnya baik dengan penambahan ataupun dengan pengurangan komponen yang digunakan.

Pada gambar rangkaian pensaklaran ini, terminal R, S dan T adalah terminal yang dihubungkan dengan terminal lilitan stator motor. Terminal (+) dan (-) adalah terminal yang menjadi penghubung antara catu daya tegangan dengan rangkaian pensaklaran. Enam buah terminal yang menjadi pin penghubung antara mikrokontroler dengan rangkaian pensaklaran namun terlebih dahulu melewati rangkaian logika AND. Dan terakhir adalah terminal ground yang dihubungkan dengan terminal ground dari catu daya mikrokontroler baik master maupun slave.

Pada rangkaian pensaklaran ini menggunakan MOSFET IRF540 yang berfungsi sebagai saklar elektronik. Jumlah MOSFET yang digunakan berjumlah 6 buah MOSFET dimana 3 buah MOSFET untuk saklar penghubung 3 terminal lilitan stator dengan masing-masing terminal positif catu daya dan 3 buah MOSFET lagi sebagai penghubung 3 terminal stator dengan terminal negatif catu daya.



Gambar 12 Rangkaian Driver Motor BLDC 3 Fasa

Selain MOSFET, rangkaian pensaklaran ini juga menggunakan *optoisolator* TLP250, yang mana jumlahnya juga sebanyak 6 buah, yang masing-masing keluaran optoisolator terhubung ke MOSFET sedangkan inputnya terhubung dengan pin dari mikrokontroler. Oleh karena itulah rangkaian ini dapat dikatakan sebagai rangkaian isolator yang mana optoisolator TLP250 menjadi pemisah antara rangkaian pengendali dengan rangkaian inverter. Selain itu juga pada rangkaian diberikan dua buah dioda 3A yang dipasang secara paralel sehingga dapat menahan arus balik arus sebesar 6A. Seperti gambar 12 di atas.

b. Implementasi Sistem Pensaklaran (Driver) Motor BLDC 3 Fasa

Pada Tabel 2 menunjukkan tabel untuk implementasi pada mikrokontroler untuk putaran motor BLDC searah (*clockwise*) dengan 2-fasa terhubung.

Tabel 2 Implementasi Sistem Pensaklaran 2-fasa Terminal Terhubung

Step	Keluaran sensor hall			Komutasi (Port C Mikrokontroler ATmega16)						Polaritas terminal lilitan stator		
	H	B	K	P.5	P.4	P.3	P.2	P.1	P.0	Fasa-H	Fasa-B	Fasa-K
0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	+Vs	GND	NC
1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	+Vs	NC	GND
2	1	1	0	1	0	0	1	0	0	NC	+Vs	GND
3	0	1	0	0	0	0	1	1	0	GND	+Vs	NC
4	0	1	1	0	1	0	0	1	0	GND	NC	+Vs
5	0	0	1	0	1	1	0	0	0	NC	GND	+Vs

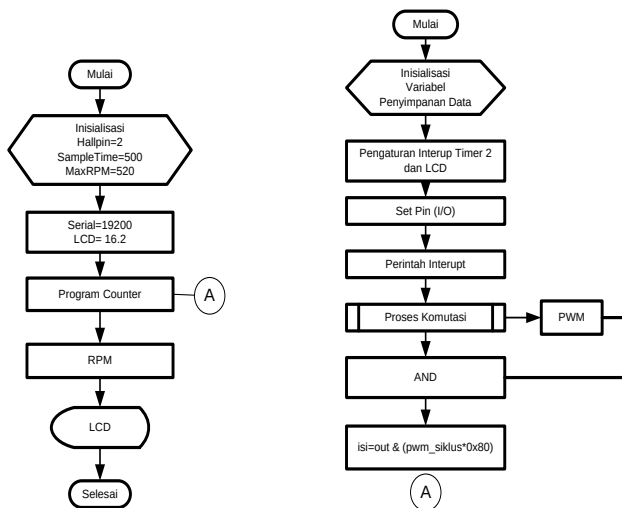
c. Spesifikasi Motor BLDC

Spesifikasi BLDC yang digunakan:

1. Jumlah Fasa 3, dengan slot stator berjumlah 36
2. Jumlah kutub magnet permanen 20 pasang
3. Daya maksimum 500 Watt
4. Tegangan suplai maksimum 48 Volt
5. Kecepatan putar maksimum 520 RPM
6. Sudah terdapat 3 buah *hall sensor* di dalamnya.

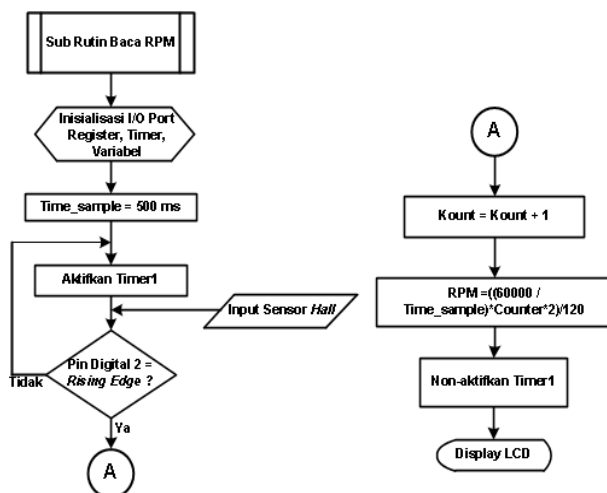
d. Diagram Alir Algoritma Program BLDC

Berikut merupakan diagram alir algoritma program BLDC seperti pada gambar 13.



Gambar 13 diagram alir Algoritma Program BLDC

e. Diagram Alir Implementasi Pembacaan Kecepatan Motor BLDC



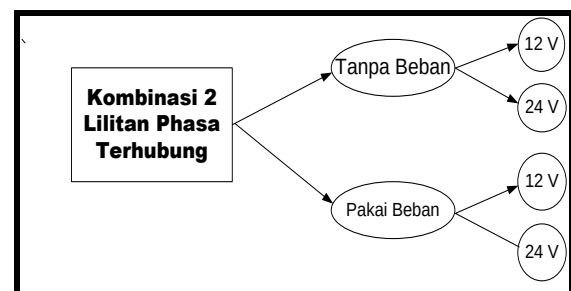
Gambar 14 Diagram alir pembacaan kecepatan motor BLDC

Hal penting dalam sebuah pengendalian kecepatan adalah bagaimana bisa membaca kecepatan aktual untuk kemudian diumpanbalikkan untuk dibandingkan dengan kecepatan referensi (*set point*). Untuk itu pada penelitian ini, nilai aktual kecepatan dari motor BLDC didapatkan dengan mengoptimalkan sensor *hall* yang sudah terintegrasi pada motor BLDC tersebut. Dasar perhitungan nilai kecepatan dalam satuan rpm (putaran per menit) didapat dari pembacaan pulsa dari sensor *hall*. Dari penelitian ini diketahui bahwa keluaran dari sensor *hall* adalah gelombang kotak dengan frekuensi yang berubah-ubah sebanding dengan perubahan kecepatan motor. Output sensor *hall* yang berupa gelombang kotak inilah yang dimanfaatkan untuk menentukan seberapa besar kecepatan putaran per menit dari motor BLDC.

Tiap gelombang sensor *hall* memiliki kondisi *rising* dan *falling*. Pada penelitian ini dengan memanfaatkan kondisi saat *rising* yang nantinya akan mengaktifkan *counter*. Setiap deteksi pulsa naik (*rising*) maka *counter* akan terus bertambah sehingga akan menghasilkan output keluaran pembacaan kecepatan dalam satuan rpm. Gambar 14 menunjukkan bagaimana algoritma pembacaan kecepatan motor BLDC dengan memanfaatkan output sensor *hall*.

f. Anova OneWay menggunakan SPSS

Analisis anova nya penulis menggunakan uji *One Way Anova* atau Anova satu jalur dengan menggunakan *software SPSS for Windows*. Pada penelitian ini akan melihat pengaruh kombinasi 2 lilitan phasa terhubung terhadap RPM. Dimana RPM sebagai variable terikat bertipe data kuantitatif atau numerik sedangkan kombinasi 2 lilitan phasa terhubung sebagai variable bebas berskala data kualitatif..



Gambar 15 Rangkaian Driver Motor BLDC 3 Fasa

Dari gambar didapatkan 15 diatas dapat di kelompok data yang akan dibandingkan yaitu

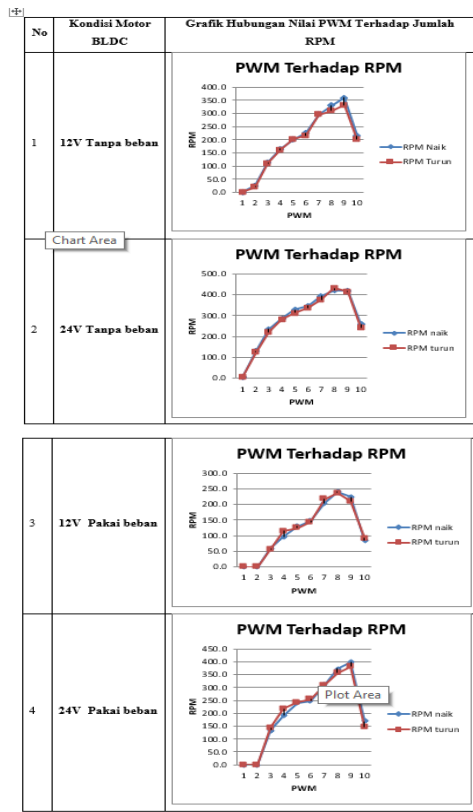
- Kombinasi 2 sensor hall terhubung dengan kondisi tegangan motor 12V dan tanpa menggunakan beban
- Kombinasi 2 sensor hall terhubung dengan kondisi tegangan motor 12V dan menggunakan beban
- Kombinasi 2 sensor hall terhubung dengan kondisi tegangan motor 24V dan tanpa menggunakan beban
- Kombinasi 2 sensor hall terhubung dengan kondisi tegangan motor 24V dan menggunakan beban

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian error Pengukuran (duty cycle 0% - 100% dan duty cycle 100%-0%) dari sistem Terhadap Jumlah RPM Untuk Kombinasi 2 phasa terhubung

Penelitian ini dilakukan untuk melihat sifat histeresis dari sistem yang telah dirancang untuk motor BLDC dengan kombinasi pensaklaran 2 lilitan

phasa terhubung dengan cara melakukan pengukuran dari nilai pwm rendah ke nilai pwm tinggi selanjutnya disebut naik (102–1023) dan sebaliknya yaitu dari nilai pwm tinggi ke nilai pwm rendah selanjutnya disebut turun (1023-102). Sehingga didapatkan grafik seperti pada gambar 16 berikut ini.



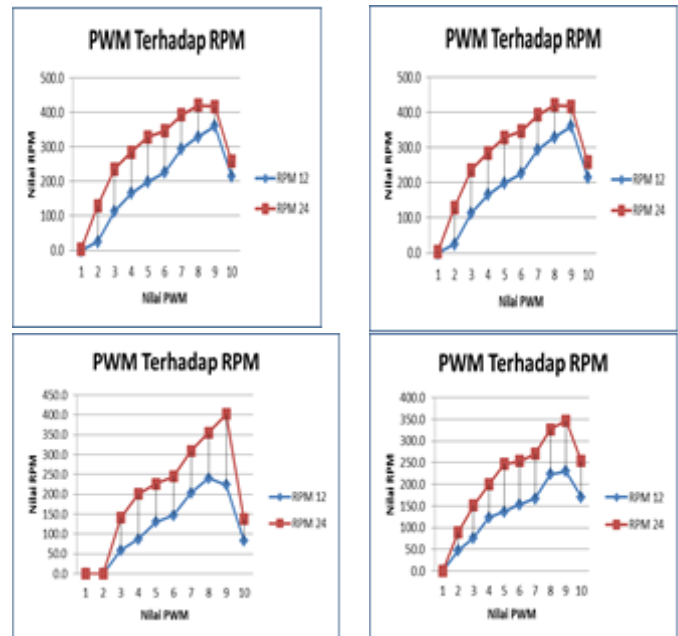
Gambar 16 Pengujian Histerisis Pengukuran Banyaknya RPM Untuk Kombinasi 2 lilitan phasa terhubung

Dari gambar 15 menggambarkan hasil dari pengujian histerisis pengukuran untuk banyak nya rpm motor bldc pada kombinasi 2 lilitan phasa terhubung dengan cara melakukan pengukuran dari nilai pwm rendah ke nilai pwm tinggi (naik) dan pengukuran dari nilai pwm tinggi ke nilai pwm rendah (turun) dengan tegangan 12V dan 24V serta tanpa beban dan pakai beban. Pada hasil pengukuran pada tabel IV.1 dapat dilihat bahwa tidak terdapat histerisis pada pengukuran baik pada saat motor BLDC diberi tegangan 12V tanpa beban, 24V tanpa beban, 12V pakai beban, dan 24V pakai beban. Sehingga pengukuran dapat dikatakan linier.

4.2 Pengujian Pengaruh Tegangan Terhadap Jumlah RPM Untuk Kombinasi 2 lilitan Phasa Terhubung

Berikut merupakan hasil pengujian pengaruh tegangan terhadap jumlah RPM motor BLDC untuk kombinasi 2 lilitan phasa terhubung. RPM 12

mempunyai arti bahwa jumlah RPM yang di tampilkan diukur ketika motor BLDC diberi tegangan 12V, begitu juga untuk RPM 24 mempunyai arti bahwa nilai RPM yang di tampilkan diukur ketika motor BLDC diberi tegangan 24V.



Gambar 17 Pengujian Pengaruh Tegangan Terhadap Jumlah RPM Untuk Kombinasi 2 lilitan Phasa Terhubung

Dari gambar 17 ketika motor BLDC tanpa beban, dapat dilihat adanya perbedaan yang terjadi ketika diberikan tegangan 12V dan tegangan 24V. Saat tegangan input disetting 12V maka RPM yang dihasilkan untuk kondisi minimum adalah 0 dan RPM kondisi maksimum adalah 360. Saat tegangan input disetting 24V maka RPM yang dihasilkan untuk kondisi minimum adalah 6 dan untuk kondisi maksimum adalah 420. Ketika motor diberikan nilai pwm 10% atau 102, baik untuk 12V maupun 24V sama-sama menunjukkan angka 0, yang dapat diartikan bahwa motor BLDC masih dalam keadaan diam. Jumlah RPM terus naik seiring dengan bertambahnya nilai PWM. Tapi jumlah RPM mengalami penurunan di saat nilai PWM terlalu tinggi, atau pada saat nilai PWM mencapai nilai 90% atau 908. Hal ini terjadi karena adanya *slip* pada sistem komutasi dan sistem PWM yang dirancang.

Ketika motor BLDC diberi beban, untuk tegangan input 12V maka RPM yang dihasilkan untuk kondisi minimum adalah 0 dan RPM kondisi maksimum adalah 240. Ketika tegangan input disetting 24V maka RPM untuk kondisi minimum adalah 0 dan RPM kondisi maksimum adalah 399. Pada kondisi pwm masih rendah atau pada rentang 10% sampai 20% motor msih belum bergerak baik untuk kondisi tegangan 12V maupun 24V. Pada saat

motor telah mencapai titik 90%, jumlah RPM mengalami penurunan, hal yang sama terjadi seperti pada saat motor tidak diberi beban.

4.3 Pengujian Pengaruh Tegangan Terhadap Jumlah RPM Untuk Kombinasi 2 lilitan Phasa terhubung dengan Analisa Anova Oneway

H0: Terdapat persamaan yang signifikan antara jumlah RPM untuk tegangan 12V dengan jumlah RPM untuk tegangan 24V untuk kombinasi 2 lilitan phasa terhubung dan tanpa menggunakan beban.

H1: Terdapat perbedaan yang signifikan antara jumlah RPM untuk tegangan 12V dengan jumlah RPM untuk tegangan 24V untuk kombinasi 2 lilitan phasa terhubung dan tanpa menggunakan beban.

Descriptives

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
12 Volt	10	1.9246E2	120.9240349	3.8239E1	105.962823	278.970510	.0000	360.0000
24 Volt	10	2.8220E2	132.6869703	4.1959E1	187.281459	377.118541	6.0000	420.6667
Total	20	2.3733E2	131.8524783	2.9483E1	175.624474	299.042193	.0000	420.6667

Test of Homogeneity of Variances

RPM

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
.035	1	18	.854

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups (Combined)	40260.356	1	40260.356	2.498	.131
Linear Term Contrast	40260.356	1	40260.356	2.498	.131
Within Groups	290056.089	18	16114.227		
Total	330316.444	19			

Dari tabel *descriptive* nampak bahwa antara tegangan 12V dan tegangan 24V mempunyai nilai rata-rata yang jauh yaitu pada 12 V bernilai 1.924 dan pada 24V bernilai 2.822

Selanjutnya pada tabel *homogeneity of variances* terlihat bahwa hasil uji menunjukkan bahwa varian kedua kelompok tersebut sama (P-value = 0.854) sehingga uji Anova valid untuk menguji hubungan ini. Selanjutnya untuk melihat adakah perbedaan RPM dari kedua kelompok dapat dilihat pada tabel Anova, dari tabel pada kolom *Sig* diperoleh nilai P(P-value) = 0.131. dengan demikian pada taraf nyata = 0.05 diterima H1, sehingga kesimpulan yang didapat adalah terdapat perbedaan yang signifikan antara jumlah RPM untuk tegangan 12V dengan jumlah RPM untuk tegangan 24V untuk kombinasi 2 lilitan phasa terhubung dan tanpa menggunakan beban.

4.4 Pengujian Pengaruh Pembebanan Terhadap Jumlah RPM Untuk Kombinasi 2 lilitan Phasa Terhubung dalam Analisa Anova Oneway

H0: Terdapat persamaan yang signifikan antara jumlah RPM untuk tegangan 12V dengan jumlah RPM untuk tegangan 24V untuk kombinasi 2 lilitan phasa terhubung dan menggunakan beban.

H1: Terdapat perbedaan yang signifikan antara jumlah RPM untuk tegangan 12V dengan jumlah RPM untuk tegangan 24V untuk kombinasi 2 lilitan phasa terhubung dan menggunakan beban.

Descriptives

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
12 Volt	10	1.1493E2	88.3059776	2.7924E1	51.763042	178.103624	.0000	240.6667
24 Volt	10	2.0653E2	137.6482545	4.3528E1	108.065704	305.000963	.0000	399.3333
Total	20	1.6073E2	121.9701622	2.7273E1	103.649540	217.817126	.0000	399.3333

RPM

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.423	1	18	.248

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	41952.600	1	41952.600	3.137	.093
Within Groups	240704.889	18	13372.494		
Total	282657.689	19			

Dari tabel *descriptive* nampak bahwa antara tegangan 12V dan tegangan 24V mempunyai nilai rata-rata yang jauh yaitu pada 12V bernilai 1.149 dan pada 24V bernilai 2.065.

Selanjutnya pada tabel *homogeneity of variances* terlihat bahwa hasil uji menunjukkan bahwa varian kedua kelompok tersebut sama (P-value = 0.248) sehingga uji Anova valid untuk menguji hubungan ini. Selanjutnya untuk melihat adakah perbedaan RPM dari kedua kelompok dapat dilihat pada tabel Anova, dari tabel pada kolom *Sig* diperoleh nilai P(P-value) = 0.093. dengan demikian pada taraf nyata = 0.05 diterima H1, sehingga kesimpulan yang didapat adalah Terdapat perbedaan yang signifikan antara jumlah RPM untuk tegangan 12V dengan jumlah RPM untuk tegangan 24V untuk kombinasi 2 lilitan phasa terhubung dan menggunakan beban.

5 KESIMPULAN

Pengujian error pengukuran pada sistem yang dirancang baik untuk kombinasi 2 lilitan phasa terhubung dengan memvariasikan tegangan input dan variasi pembebanan menghasilkan respon kenaikan nilai PWM terhadap jumlah RPM menampakkan nilai pengukuran yang linier. Untuk sistem yang telah dirancang bekerja baik pada *dutycycle* 10%-80% Pengujian pengaruh tegangan terhadap jumlah RPM untuk kombinasi 2 lilitan

phasa terhubung Didapatkan bahwa adanya perbedaan jumlah RPM antara tegangan input 12V dengan tegangan input 24V. Pengaruh tegangan ataupun pembebanan pada saat motor BLDC diberi beban atau tanpa beban dilihat dari analisis Anova Oneway menghasilkan kesimpulan bahwa H_1 diterima dan Menolak H_0 .

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Paul A.R, and George Mary, "Brushless DC Motor Control Using Digital PWM Technique," *IEEE*, pp. 1-6, 2011.
- [2] P. Alaeinovin, S. Chiniforoosh and J. Jatskevich, "Evaluating Misalignment of Hall Sensors in Brushless DC Motor," *IEEE*, pp. 1-6, 2008.
- [3] Fathoni, K., *Perancangan dan Implementasi Sistem Kendali Kecepatan Motor Magnet Permanen Tiga Fasa sebagai Motor Arus Searah tanpa Sikat*, Tesis Magister, Institut Teknologi Bandung, 2014.
- [4] Tadeus, D.Y., *Perancangan dan Implementasi Rangkaian Sistem Kendali Posisi Rotor Magnet Permanen Tanpa Sikat yang Diperankan Sebagai Motor Stepper*, Tesis Magister, Institut Teknologi Bandung, 2014.
- [5] Hartono, R, *Perancangan dan Implementasi Sistem Kendali Sinkronisasi Kecepatan Dua Motor Magnet Permanent Tiga Fasa*, Tesis Magister, Institut Teknologi Bandung, 2014.
- [6] bagenda, D.N, *Rancang Bangun Sistem Kendali Sudut Pada Motor mangnet Permanent Sebagai Motor Stepper Dengan Pengaturan PWM*, Tesis Magister, Institut Teknologi Bandung, 2014.
- [7] Universitas Islam Indonesia, Anova OneWay, Bandung, Universitas Islam 2013
- [8] Dharmawan, Abe. Pengendali Motor DC Brushless dengan Metode PWM Sinusoidal Menggunakan ATmega16. 2009.
- [9] Tri Sutrisno, Himawan., Borian, Pinto.: Kursi Roda Elektrik. 2012. diakses pada tanggal 20 maret 2015