

# DESAIN DAN IMPLEMENTASI EXTENDED PC-104 SEBAGAI MODUL PENDUKUNG PERANCANGAN SISTEM PENGENDALIAN PENGOPERASIAN MOTOR ARUS SEARAH TANPA SIKAT TANPA SENSOR MENGGUNAKAN FREKUENSI TANGGA

Robith Urwatal Wusko, Iyas Munawar  
Institut Teknologi Bandung/Sekolah Teknik Elektro dan Informatika  
[robith.u.w@gmail.com](mailto:robith.u.w@gmail.com)

## Abstrak

Motor Arus Searah Tanpa Sikat (MASTS) termasuk jenis motor AC yang banyak digunakan karena memiliki banyak keunggulan dibandingkan dengan motor jenis lain. Salah satu penggunaannya adalah dalam dunia transportasi. Banyak kajian menarik yang dapat diteliti dari MASTS salah satunya dalam hal pengoperasiannya. MASTS pada umumnya dilengkapi sensor *feedback* untuk mengetahui posisinya, namun dalam kasus tertentu pengoperasian MASTS tanpa sensor juga dapat dilakukan. Pengoperasian MASTS merupakan salah satu tema yang cukup sering dijadikan penelitian karena banyaknya metode dan pengkajian untuk meningkatkan efisiensi. Pengujian dilakukan melalui beberapa prosedur terhadap MASTS yang dioperasikan tanpa menggunakan sensor *feedback* atau *open loop*. Pengoperasian dilakukan melalui pensaklaran inverter mosfet yang dihubungkan ke mikrokontroler sebagai pemicu pengaktifan pensaklaran. Hall sensor dalam penelitian ini digunakan sebagai pengganti encoder untuk mengamati karakteristik perubahan kecepatan dari motor saat mendapatkan perlakuan tertentu. Pengujian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa dalam mengendalikan kecepatan MASTS diperlukan teknik khusus yaitu berkaitan dengan tegangan dan juga terhadap frekuensinya. Sehingga dari kesimpulan tersebut dapat dirancang sebuah algoritma yang memungkinkan MASTS dapat dioperasikan menggunakan pemberian frekuensi bertingkat meskipun tanpa sensor.

Kata kunci: pengoperasian tanpa sensor, frekuensi tangga, algoritma pengaturan frekuensi.

## Abstract

*Brushless direct current motor (BLDCM) is one of AC motor type that is widely used because it has many advantages compared with other types of motor. One of example is for transportation. Many interesting topics can be researched with BLDCM, for example in terms of operation. BLDCM generally have a feedback sensor to determine its position, but in another case operate BLDCM without sensor could also be performed. Operating BLDCM is one quite often used to be research topic because of the large assessment and methods to improve efficiency. The tests are done through several procedures to operate BLDCM without using feedback sensors or open loop. Operation can be done via the switching MOSFET inverter connected to the microcontroller as the switching trigger. Hall effect sensor in this research is used as a replacement of encoder for observing the speed characteristics of the motor while getting specific treatment. The research shows that controlling the speed of BLDCM required a special technique that related to voltage and also the frequency. From this conclusion algorithm can be designed that allows the BLDCM can be operated smoothly by using a ladder frequency even without sensor.*

*Keywords : sensorless operation, ladder frequency, frequency control algorithm.*

## 1. PENDAHULUAN

Motor merupakan bagian utama pada sebuah kendaraan atau alat transportasi, yaitu sebagai bagian penggerak agar kendaraan bisa berpindah. Dewasa ini banyak dilakukan pengurangan penggunaan motor berbahan bakar minyak bumi yang digunakan sebagai alat transportasi. Sebagai alternatif untuk mengganti motor berbahan bakar minyak bumi, kini sedang banyak dikembangkan motor listrik yang menggunakan energi listrik sebagai sumber penggerakannya. Keuntungan mengganti motor berbahan bakar minyak dengan

motor energi listrik diantaranya adalah sebagai langkah penghematan sumber daya alam berupa minyak yang semakin lama semakin menipis, selain itu dengan menggunakan motor energi listrik pencemaran gas buang yang biasa terjadi pada motor berbahan minyak bumi dapat terminimalisir. Salah satu jenis motor penggerak yang sering digunakan untuk alat transportasi adalah motor magnet permanen atau motor arus searah tanpa sikat (MASTS). MASTS sering digunakan sebagai penggerak karena memiliki banyak kelebihan dibandingkan motor jenis lain.

Kelebihan motor magnet permanen antara lain tidak ada energy listrik yang diserap oleh system eksitasi medan magnet sehingga tidak ada kerugian *energy* sehingga bisa lebih efisien, memiliki torsi dandaya 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 atau motor arus searah tanpa sikat, sering disebut juga MASTS. Motor ini berbeda dengan motor DC pada umumnya. Motor jenis ini tidak dapat bertambah kecepatannya hanya dengan ditambah tegangan masukannya sebagaimana motor DC. Kecepatan motor ini dipengaruhi oleh kecepatan *switching* atau besar kecilnya frekuensi sinyal *input*. Motor ini juga memiliki karakteristik kusus yaitu hanya akan bergerak dengan optimal pada tegangan dan frekuensi tertentu.

Kecepatan motor arus searah tanpa sikat dapat diatur menggunakan tegangan menambahkan sebuah komponen sensor posisi, pada umumnya sensor posisi yang digunakan adalah sensor *hall* atau encoder. Berdasarkan informasi tersebut peneliti mendapatkan sebuah ide untuk untuk mendapatkan karakteristik hubungan tegangan terhadap frekuensi pada MASTS, dimana melalui data tersebut nantinya dapat diturunkan algoritma untuk menggerakkan MASTS dengan memberikan frekuensi *step*, diharapkan pula dari data pengujian memungkinkan dilakukan analisa agar motor dapat melakukan *soft starting* dan bergerak lebih halus tanpa harus menggunakan sensor *feedback*.

## 2. METODOLOGI

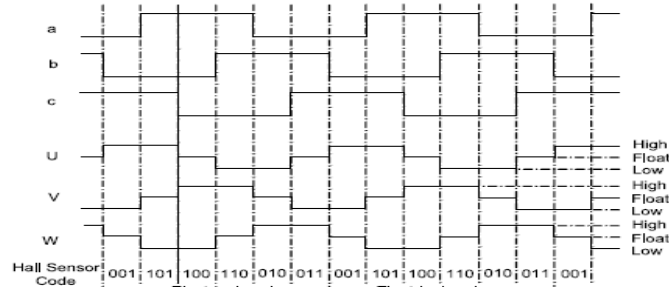
### 2.1. Pengoperasian Motor Arus Searah Tanpa Sikat Menggunakan Sensor Maupun Tanpa Menggunakan Sensor

Secara umum motor arus searah tanpa sikat dibagi menjadi 2, yaitu *sensored* dan *sensorless*[1][2].

- a) *Sensored, brushless* motor jenis ini dilengkapi dengan encoder dan atau *hall effect* sensor yang berfungsi sebagai detector pada medan magnet, *hall effect* sensor akan menghasilkan sebuah tegangan yang proporsional dengan kekuatan medan magnet yang diterima oleh sensor tersebut. Motor jenis ini memiliki tingkat efisiensi yang tinggi dan lebih halus pergerakannya disbanding 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 bisa dilakukan dengan cara mendeteksi BEMF dan *zero-crossing*.

Untuk menggerakkan motor arus searah tanpa sikat diperlukan sebuah konverter dari DC ke AC sehingga terbentuk sinyal berbentuk *trapezoid* sebagai *input* sinyal ke motor. Sinyal *trapezoid* dapat dibangkitkan menggunakan 3 pasang mosfet, masing-masing terdiri dari 2 buah mosfet untuk sisi atas dan sisi bawah mosfet yang akan aktif secara bergantian sehingga terbentuk sinyal *trapezoid*[7].

Dengan menggunakan tiga sensor *hall* akan didapatkan 6 kombinasi yang berbeda. Keenam kombinasi ini menunjukkan *timing* perubahan komutasi. Ketiga sensor *hall* didapatkan kombinasi tertentu, sinyal komutasi pada mikrokontroler harus diubah sesuai dengan kombinasi yang didapatkan agar terbentuk keluaran tegangan berupa sinyal *trapezoid*[6]. Hasil sinyal keluaran terhadap posisi dari sensor *hall* yang terdeteksi dijelaskan pada Gambar 2-1 di bawah ini.



**Gambar 2-1. Kombinasi Komutasi Berdasarkan Kondisi SensorHall dan Output Tegangan yang Dihasilkan [9]**

Pada perancangan inverter digunakan bantuan bahan semikonduktor mosfet. Penggunaan mosfet sebagai *switching* dipilih karena mosfet memiliki banyak keunggulan dibandingkan dengan transistor salah satunya dalam hal disipasi daya[10]. Pengoperasian mosfet sendiri membutuhkan pemicu pengaktifan tegangan gate-source agar drain dapat mengalirkan arus, untuk itu digunakan IR2110 sebagai komponen elektronika yang berfungsi sebagai pemicu pengaktifan mosfet. Dengan bantuan IR2110 mempermudah perancangan *driver inverter* salah satunya dengan menggunakan komponen tersebut *driver* dapat dirancang hanya menggunakan mosfet tipe N saja tanpa harus menggunakan komplemen mosfet, dengan cara tersebut maka dapat meminimalisir jumlah catu daya yang digunakan[11].

Pada BLDC sensorless metode yang biasanya digunakan adalah menggunakan Back EMF. Namun ada kendala untuk mengoperasikan BLDC menggunakan metode ini, yaitu back EMF akan sulit dideteksi saat kecepatannya masih rendah, terutama pada motor-motor kecil daya rendah seperti yang digunakan pada piringan hard disk atau CD drive[8][9]. Oleh karena itu pengoperasian motor BLDC tanpa sensor masih perlu banyak dikembangkan agar dapat bekerja lebih optimal.

Mulanya pengoperasian motor BLDC dilakukan menggunakan sensor untuk mendapatkan informasi komutasi yang tepat pada pengoperasiannya, informasi komutasi tersebut kemudian digunakan untuk mengoperasikan motor BLDC secara sensorless[8]. Dengan cara memberikan pengulangan sinyal komutasi yang telah didapat, adapun Tabel komutasi yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2-1 berikut.

**Tabel 2-1. Tabel komutasi pengoperasian MASTS**

Com Num	$V_R$	$V_S$	$V_T$	KeluaranMosfet					
				RL	RH	SL	SH	TL	TH
0	+	-	+	0	1	1	0	0	1
1	-	-	+	1	0	1	0	0	1
2	-	+	+	1	0	0	1	0	1
3	-	+	-	1	0	0	1	1	0
4	+	+	-	0	1	0	1	1	0
5	+	-	-	0	1	1	0	1	0

## 2.2. Desain Pengoperasian Bldc Motor Dengan Step Frekuensi

Alasan mengapa frekuensi yang digunakan harus bertingkat, tidak langsung diberikan frekuensi yang dibutuhkan sesuai kecepatan yang ingin dituju. Hal tersebut dikarenakan penambahan percepatan yang terlalu tinggi akan menyebabkan kegagalan starting.

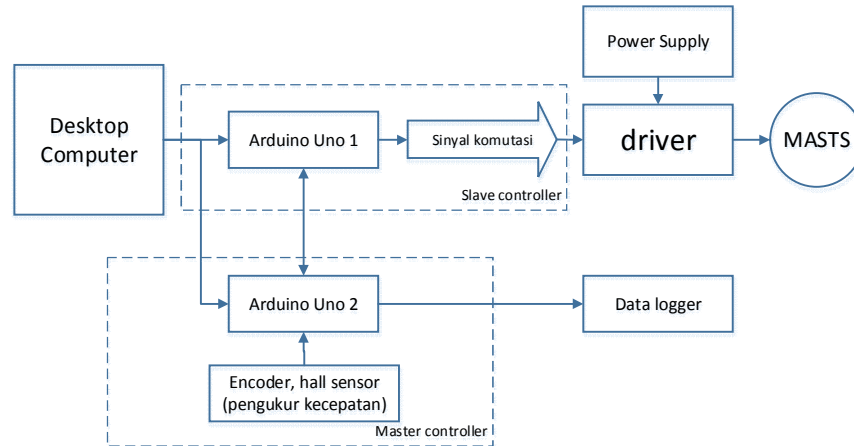
Persamaan mekanik motor dapat dinyatakan sebagai berikut[4][5][6].

$$K_t i = \tau_s = J \frac{d\omega}{dt} + B \omega + \tau_L \quad (1)$$

Jika langsung diberi frekuensi tinggi pada kondisi diam, sama dengan memberikan percepatan yang tinggi atau memberikan perubahan kecepatan yang tinggi. Tingginya percepatan dengan kata lain perubahan komutasinya terlalu cepat, akan menimbulkan arus yang besar dan torsi beban yang besar pula, sehingga rotor tidak mampu mengikuti perubahan tersebut, akibatnya akan menyebabkan terjadinya gagal

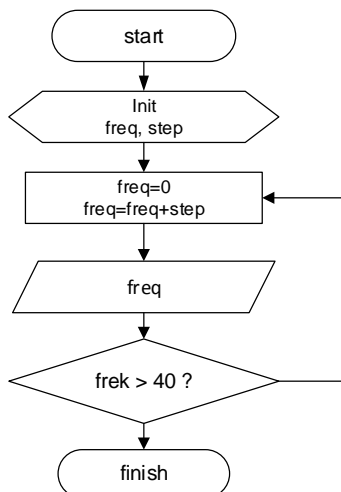
*starting*. Pengoperasian motor arus searah tanpa sikat tanpa sensor posisi atau *hall* pada dasarnya sama halnya dengan mengoperasikan motor sinkron. Motor sinkron merupakan motor yang tidak dapat melakukan starting secara sendiri[3][4].

Desain sistem pengoperasian motor arus searah tanpa sikat menggunakan *step* frekuensi diperlihatkan pada Gambar 2-2 di bawah ini.



**Gambar 2-2. Desain Sistem Pengoperasian Motor Arus Searah Tanpa Sikat Menggunakan Step Frekuensi**

Arduino 1 digunakan untuk menguji driver apakah dapat bekerja secara optimal sesuai perancangan, serta melihat kombinasi dari system pensaklaran yang akan dirancang. Dari perancangan ini kemudian ditentukan seperti apa kombinasi pensaklaran yang terbaik. Arduino 2 digunakan sebagai pemroses data-data dari sensor seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Alasan digunakan dua mikrokontroler pada penelitian ini adalah agar proses komutasi dan komputasi dilakukan secara terpisah sehingga meminimalisir adanya kemungkinan gangguan. Untuk mendapatkan pengendalian *step* frekuensi dilakukan dengan algoritma program yang diperlihatkan pada Gambar 2-3 sebagai berikut :

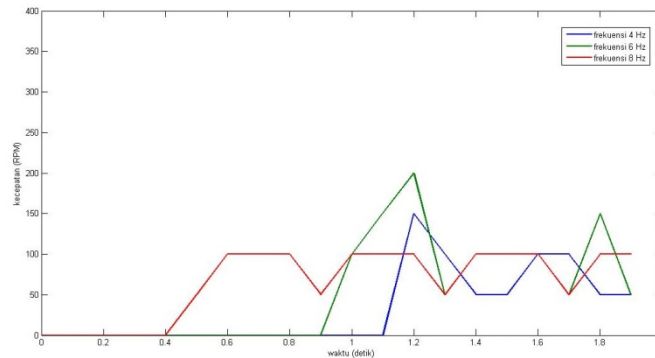


**Gambar 2-3. Diagram Blok Pemberian Step Frekuensi**

Untuk langkah pengujian akan dilakukan dengan cara memberikan masukan berupa frekuensi step yang diinginkan. Penelitian ini menggunakan tiga variasi *step* frekuensi yang dipilih dalam pengujian, antara lain 4 Hz, 6 Hz dan 8 Hz. Tegangan kerja untuk menggerakkan motor adalah 12V dan frekuensi maksimum yang digunakan adalah 40 Hz. Dilakukan juga pengujian untuk merubah selang waktu perubahan frekuensi atau *delay*-nya. Pada penelitian ini *delay* yang diberikan ada tiga variasi yaitu *delay time* atau perubahan *step* frekuensi tiap 0,1 detik, 0,3 detik dan 0,5 detik.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian pertama dilakukan dengan menguji kecepatan motor jika diberikan *step* frekuensi 4 Hz, 6 Hz dan 8 Hz dengan rentang *delay time* atau waktu kenaikan tiap *step* adalah 0,1 detik. Pengujian dilakukan pada tegangan kerja motor 12V. Data pengujian yang akan diambil adalah data hubungan antara waktu terhadap frekuensi dan waktu terhadap kecepatan. Hasil pengujian terlihat pada Gambar 3-1 di bawah ini.

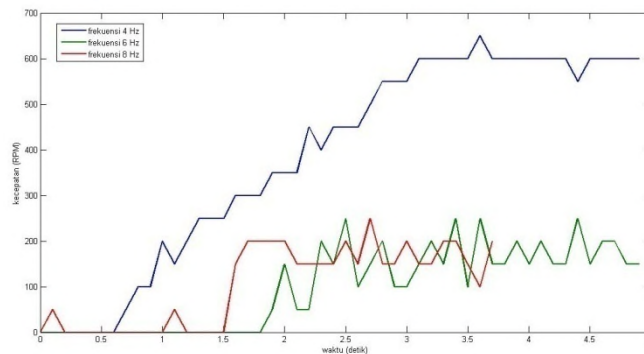


**Gambar 3-1. Hasil Pengujian Step Frekuensi 4 Hz, 6 Hz dan 8 Hz dengan Delay Time 0,1 detik**

Pada pengujian diatas terlihat bahwa terjadi fenomena gagal starting atau keadaan dimana motor gagal berputar. Baik untuk frekuensi 4 Hz, 6 Hz maupun 8 Hz. Kemungkinan gagal starting terjadi karena *delay time* yang diberikan terlalu kecil atau laju perubahan frekuensinya terlalu tinggi.

Gambar grafik diatas menunjukkan respon kecepatan terhadap waktu, dimana setiap waktunya terjadi perubahan frekuensi dengan step grafik warna biru adalah 4 Hz, warna hijau 6 Hz dan warna merah 8 Hz. Rentang waktu perubahan kenaikan frekuensi tersebut terjadi tiap 0,1 detik.

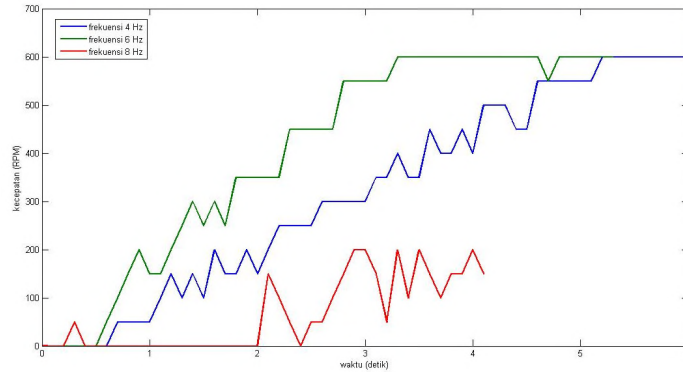
Pengujian kedua dilakukan dengan mengubah rentang waktu kenaikan tiap step menjadi 0,3 detik, pengujian dilakukan pada tegangan kerja motor tetap yaitu 12V dan hasil pengujian terlihat pada gambar di bawah 3-2 di bawah ini. Tujuan dilakukannya kenaikan *delay time* atau waktu tunda untuk kenaikan frekuensi ini adalah untuk mencari tahu efek dari adanya *delay time* yang semakin tinggi. Berdasarkan hipotesa melalui persamaan mekanik motor, seharusnya pemberian *delay time* dapat memperbaiki performa pengoperasian motor dan memungkinkan untuk meminimalisir terjadinya gagal starting.



**Gambar 3-2. Hasil Pengujian Step Frekuensi 4 Hz, 6 Hz dan 8 Hz dengan Delay Time 0,3 detik**

Grafik pengujian kedua menunjukkan bahwa pada pengujian untuk *step* frekuensi 4 Hz dengan penambahan *delay time* menjadi 0.3 detik ternyata mampu membuat motor beroperasi dan menunjukkan adanya pergerakan atau perubahan kecepatan.

Pengujian ketiga dilakukan dengan merubah besar *delay time* yaitu kenaikan tiap *step* menjadi sebesar 0,5 detik dan pada tegangan kerja motor tetap yaitu 12V. Hasil pengujian terlihat pada Gambar 3-3.



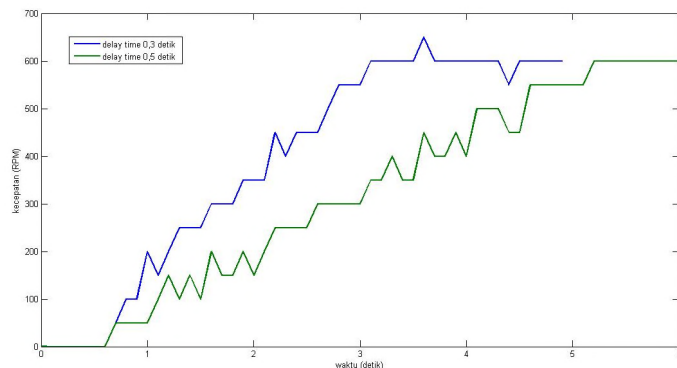
**Gambar 3-3. Hasil Pengujian Step Frekuensi 4 Hz, 6 Hz dan 8 Hz dengan Delay Time 0,5 detik**

Pengujian ketiga dengan mengubah *delay time* menjadi 0,5 detik menunjukkan bahwa motor dapat berputar untuk kondisi *step* frekuensi 4 Hz dan 6 Hz, namun pada 8 Hz motor masih mengalami gagal *starting*.

Pada ketiga pengujian diatas terlihat bahwa untuk mencapai kecepatan yang dituju yaitu kecepatan pada frekuensi 40 Hz, dibutuhkan waktu yang relatif lama. Pada pengujian untuk kenaikan *step* frekuensi 8 Hz, motor sama sekali tidak mampu berputar baik untuk *delay time* 0,1 detik, 0,3 detik maupun 0,5 detik, sedangkan untuk 6 Hz motor hanya dapat berputar untuk *delay time* 0,5 detik, dan untuk *step* frekuensi 4 Hz motor dapat berputar untuk *delay time* 0,3 dan 0,5 detik.

Berdasarkan data di atas dapat diperlihatkan bahwa *step* frekuensi yang terlalu tinggi akan menyebabkan motor mengalami gagal *starting*, semakin kecil *step* frekuensi yang diambil maka kemungkinan motor dapat beroperasi lebih tinggi, namun dengan resiko semakin kecil *step* frekuensi maka respon motor untuk mencapai frekuensi maksimum akan semakin lama. Dari sisi *delay time*, dengan memperbesar *delay time* juga memungkinkan motor untuk dapat beroperasi dibandingkan dengan *delay time* yang rendah, namun dengan *delay time* yang tinggi juga akan menyebabkan respon motor untuk mencapai frekuensi maksimum yang dituju menjadi lebih lama.

Hal tersebut wajar mengingat untuk mencapai frekuensi yang diharapkan dibutuhkan beberapa *step* atau langkah dengan kenaikan tertentu, sehingga waktu untuk mencapai frekuensi 40 Hz akan cukup panjang, dengan kata lain sudah jelas bahwa untuk kenaikan 8 Hz akan mencapai 40 Hz lebih cepat dibandingkan dengan kenaikan 6 Hz dan 4 Hz. Kemudian untuk melihat pengaruh perubahan *delay time* dilakukan perbandingan terhadap performa kecepatan motor untuk kondisi *step* frekuensi 4 Hz dengan *delay time* 0,3 detik dan 0,5 detik. Grafik hasil perbandingan ditunjukkan pada Gambar 3-4 di bawah ini.



**Gambar 3-4. Komparasi Hasil Pengujian Step Frekuensi 4 Hz dengan Delay Time 0,3 detik dan 0,5 detik**

Pada pengujian di atas terlihat bahwa pengaruh *delay time* yang semakin tinggi menyebabkan respon *time* motor untuk mencapai frekuensi maksimumnya menjadi lebih lambat.

#### 4. KESIMPULAN

Diketahui bahwa motor arus searah tanpa sikat dapat diatur kecepatannya dengan cara mengubah frekuensinya sinyal *input*-nya. Berbeda halnya dengan motor DC biasa yang dapat bertambah kecepatannya cukup dengan ditambah tegangannya. Pada motor arus searah yang menggunakan sensor, kenaikan kecepatan dapat dilakukan dengan menggunakan tegangan karena BLDC dapat diperlakukan sebagai motor DC. Motor dapat berjalan dengan baik jika digerakkan dengan cara mencacah frekuensinya menjadi beberapa *step* kecil dimana semakin rendah nilai *step* frekuensi yang diberikan maka semakin bagus pula performa kecepatan motor dan kemungkinan gagal *starting* jadi rendah. Sebaliknya dengan menggunakan *step* frekuensi yang tinggi akan menyebabkan resiko terjadinya gagal *starting* meningkat, namun jika *step* frekuensi terlalu rendahakan menyebabkan respon motor untuk mencapai kecepatan yang diinginkan menjadi lambat. Disamping menggunakan *step* frekuensi, perubahandelay *time* untuk kenaikan *step* frekuensi juga memiliki pengaruh terhadap pengoperasian motor. *Delay time* yang terlalu kecil dapat menyebabkan terjadinya gagal *starting*, namun dapat mempercepat respon kecepatan motor untuk mencapai kecepatan pada frekuensi yang diinginkan.

#### PERNYATAAN PENULIS

Seluruh isi dalam laporan penelitian ini menjadi tanggungjawab penulis.

#### DAFTAR PUSTAKA

- 1) Amalia, S., 2015, Pengujian *Karakteristik Motor Arus Searah Tanpa Sikat Menggunakan Analisis Anova*, Bandung : Institut Teknologi Bandung.
- 2) Beaty, H. W dan Kirtley, J. L. Jr., 2004, *Electric Motor Handbook*, McGraw-Hill Handbooks.
- 3) El-sharkawi, M. A., 2000, *Fundamentals of electric drives*, USA: brooks/cole.
- 4) Gieras, J. F dan Wing, M., 2002, *Permanent Magnet Motor Technology*, USA: Marcel Dekker, Inc.
- 5) Kan, K., Tzou, Y., 2012, *Adaptive Soft Starting Method with Current Limit Strategy for Sensorless BLDC Motor*, IEEE.
- 6) Mohan, N., udeland, T dan robbins, W., 1995, *Power Electronics*, USA: john willey & son.
- 7) Ramesh, M.V., Gorantla, S., Amarnath, J., Kamakshaiyah, S dan Jawaharlal, B., 2011, *Speed Torque Characteristics of Brushless DC motor in Either Direction on Load using ARM controller*, IEEE.
- 8) Weizi, W., Zhigan W., Wanbing J dan Jianping Y., 2005, *Starting Methods for Hall-less Single Phase BLDC Motor*, IEEE.
- 9) Zhao, J., Yu, Y., 2011, *Brushless DC motor fundamentals application note*, MPS.
- 10) How a mosfet works:  
[http://www3.eng.cam.ac.uk/DesignOffice/cmiCD03\\_student/lecturenotes/2002/1b/paper8/tra/notesC/1B2001P8TRAL07F.pdf](http://www3.eng.cam.ac.uk/DesignOffice/cmiCD03_student/lecturenotes/2002/1b/paper8/tra/notesC/1B2001P8TRAL07F.pdf). Diunduh tanggal 5 Juni 2015.
- 11) Using the high-low side driver IR2110. <http://tahmidmc.blogspot.co.id/2013/01/using-high-low-side-driver-ir2110-with.html>. Diakses tanggal 17 Juli 2015.

## DAFTAR RIWAYAT HIDUP PENULIS



### DATA UMUM

Nama Lengkap : Robith Urwatal Wusko  
Tempat &Tgl. Lahir : Jember, 26 Desember 1989  
Jenis Kelamin : Laki-Laki  
Instansi Pekerjaan : Institut Teknologi Bandung  
NIP. / NIM. : 23213368  
Pangkat / Gol.Ruang :  
Jabatan Dalam Pekerjaan : Peneliti Utama  
Agama : Islam  
Status Perkawinan : Belum Kawin

### DATA PENDIDIKAN

SLTA : SMA N 1 Kepanjen Tahun: 2005  
STRATA 1 (S.1) : Universitas Brawijaya Tahun: 2008  
STRATA 2 (S.2) : Institut Teknologi Bandung Tahun: 2014

### ALAMAT

Alamat Rumah : Jalan Kramat no.20 Panggungrejo, Kepanjen, Malang  
Alamat Kantor / Instansi : Jalan Ganesha no.10 Bandung  
HP. : 085790803105  
Telp. : -  
Email : robith.u.w@gmail.com

## RIWAYAT SINGKAT PENULIS



**ROBITH URWATAL WUSKO, S.T**, lahir di kota jember (Jawa Timur) pada tanggal 26 Desember 1989. Bertempat tinggal di kota Malang dan domisili saat ini di Bandung. Saat ini telah menyelesaikan studi jenjang S2 di jurusan STEI, Institut Teknologi Bandung, masuk mulai tahun 2014 angkatan 2013 semester genap. Sedang mengerjakan riset dalam bidang mekatronika berkaitan dengan motor listrik arus searah dan juga tertarik dengan riset dibidang *Internet of Things* terutama berkaitan dengan automasi perangkat-perangkat elektronik.