



**RANCANG BANGUN SISTEM KONTROL MOTOR *BRUSHLESS DIRECT*
CURRENT KONTRUKSI *AXIAL FLUX* CELAH UDARA TUNGGAL
MENGUNAKAN ARDUINO - UNO**

SKRIPSI

Oleh

Hadiid Haidhar Hartono

NIM 141910201002

PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS JEMBER

2019



**RANCANG BANGUN SISTEM KONTROL MOTOR *BRUSHLESS DIRECT*
CURRENT KONTRUKSI *AXIAL FLUX* CELAH UDARA TUNGGAL
MENGUNAKAN ARDUINO - UNO**

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Elektro (S1)
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh
Hadiid Haidhar Hartono
NIM 141910201002

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2019**

PERSEMBAHAN

Puji syukur terjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan limpah rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulis menyadari bahwa dalam pengerjaan skripsi ini banyak sekali semangat yang didapatkan dari banyak pihak. Untuk itu persembahan ini penulis berikan kepada :

1. Bapak Mulyadi Hartono dan Ibu Dwi Ambawani tercinta, yang selalu mendoakan, mengarahkan, serta memberikan dukungan penuh dengan segala perhatiannya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas skripsi ini dengan baik dan lancar.
2. Bapak Dosen Pembimbing Utama Bapak Ir. Widyono Hadi, M.T serta Bapak Dosen Pembimbing Anggota Bapak H. Samsul Bachri M, S.T., M.MT. atas kesabaran dan keikhlasan dalam membimbing saya menyelesaikan skripsi ini.
3. Seluruh dosen Teknik Elektro Universitas Jember yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan dan bimbingan selama mengikuti pendidikan di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.
4. Seluruh dulur KETEK UJ 2014 yang telah memberikan dukungan dan doanya.
5. Sahabat-sahabat ku tercinta yang telah memberikan semangat serta perhatian yang luar biasa.
6. Saudara-saudara ku Teknik Elektro Universitas Jember.
7. Almamater Tercinta Fakultas Teknik Universitas Jember.

MOTTO

“Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan”

(QS. Al-Insyirah : 5)

*“Sometimes when you innovate, you make mistakes. It is best to admit them quickly,
and get on with improving your other innovations”*

(Steve Jobs)

“You must Practice being stupid, dumb, unthinking, and empty”

(Benedict Cumberbatch)

“Stay hungry, stay foolish”

(Steve Jobs)

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Hadiid Haidhar Hartono

NIM : 141910201002

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul ” Rancang Bangun Sistem Kontrol Motor *Brushless Direct Current* Kontruksi *Axial Flux* Celah Udara Tunggal Menggunakan Arduino - Uno” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi manapun dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab penuh atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 10 Juni 2019

Yang menyatakan,

Hadiid Haidhar Hartono
NIM 141910201002

SKRIPSI

**RANCANG BANGUN SISTEM KONTROL MOTOR *BRUSHLESS DIRECT*
CURRENT KONTRUKSI *AXIAL FLUX* CELAH UDARA TUNGGAL
MENGUNAKAN ARDUINO - UNO**

Oleh

Hadiid Haidhar Hartono

NIM 141910201002

Pembimbing :

Dosen Pembimbing Utama : Ir. Widyono Hadi, M.T

Dosen Pembimbing Anggota : H. Samsul Bachri M, S.T., M.MT.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Rancang Bangun Sistem Kontrol Motor *Brushless Direct Current* Kontruksi *Axial Flux* Celah Udara Tunggal Menggunakan Arduino - Uno” karya Hadiid Haidhar Hartono telah diuji dan disahkan pada :

Hari : Rabu

Tanggal : 26 Juni 2019

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim penguji,

Ketua,

Anggota I,

Ir. Widyono Hadi, M.T.
NIP 196104141989021001

H. Samsul Bachri M, S.T., M.MT.
NIP 196403171998021001

Anggota II,

Anggota III,

Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T.
NIP 197004041996011001

Prof. Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M.
NIP 196312011994021002

Mengesahkan
Dekan,

Dr. Ir. Entin Hidayah, M.U.M.
NIP 196612151995032001

Rancang Bangun Sistem Kontrol Motor *Brushless Direct Current* Kontruksi *Axial*

Flux Celah Udara Tunggal Menggunakan Arduino – Uno

Hadiid Haidhar Hartono

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember

ABSTRAK

Motor *Brushless* DC (BLDC) semakin banyak dipakai pada aplikasi rumah tangga hingga industri karena efisiensinya yang tinggi, bentuknya yang kompak, tidak menimbulkan polusi suara (*silent operation*) dan tidak memerlukan perawatan yang tinggi. Perancangan sistem kontrol motor *brushless direct current* (bldc) kontruksi *axial flux* celah udara tunggal menggunakan Arduino – UNO berupa rangkaian satu buah MOSFET IRF540N yang kaki *gate* terhubung dengan pin 9 Arduino – UNO, kaki *drain* terhubung pada kutub positif motor bldc tersebut dan kaki *drain* terhubung pada *ground* yang ada pada Arduino – UNO. Rangkaian tersebut dihubungkan pada sumber tegangan tetap DC sebesar 13 V. Pada penelitian ini digunakan pengaruh nilai perubahan frekuensi terhadap perubahan nilai kecepatan motor tersebut. Nilai frekuensi yang digunakan adalah 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz dan 35 Hz. Nilai kecepatan motor yang diperoleh nantinya dibandingkan dengan nilai kecepatan motor hasil perhitungan sesuai dengan teori.

Kata Kunci: Motor *Brushless* DC (BLDC), *Axial Flux*, MOSFET IRF540N, Arduino – UNO, Frekuensi, *Duty Cycle*, Kecepatan Motor

*Rancang Bangun Sistem Kontrol Motor Brushless Direct Current Kontruksi Axial
Flux Celah Udara Tunggal Menggunakan Arduino – Uno*

Hadiid Haidhar Hartono

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Jember

ABSTRACT

Brushless DC motors (BLDC) are increasingly used in household applications to industry because of their high efficiency, compact shape, uncomplicated, and do not require high maintenance. The design of the brushless direct current (bldc) control system for axial flux construction of air separation using Arduino-UNO consists of one IRF540N MOSFET whose gate leg is connected to Arduino-UNO pin 9, drain foot uses a good Bldc motor pole and drain foot connects to the ground available on Arduino - UNO. The intended circuit at the DC fixed voltage source is 13 V. In this study, the value of the change in the change in motor speed value is used. The frequency values used are 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz and 35 Hz. Motor speed values obtained by comparison with motor speed values calculated according to the theory.

Keywords: *Brushless DC Motor (BLDC), Axial Flux, IRF540N MOSFET, Arduino - UNO, Frequency, Duty Cycle, Motor Speed*

RINGKASAN

Rancang Bangun Sistem Kontrol Motor *Brushless Direct Current* Kontruksi *Axial Flux* Celah Udara Tunggal Menggunakan Arduino - Uno; Hadiid Haidhar Hartono; 141910201002; 2019; 92 halaman; Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Listrik merupakan kebutuhan yang sangat penting di zaman yang serba modern ini. Setiap aspek kehidupan manusia saat ini membutuhkan energi listrik untuk menunjang setiap kegiatan yang dilakukan oleh manusia. Kemajuan teknologi pada peralatan baik industri maupun rumah tangga tidak akan lepas dengan penggunaan motor. Motor merupakan alat yang dapat berputar jika dialiri dengan listrik. Motor listrik sendiri masih terbagi menjadi 2 jenis motor yang mempunyai sumber energi listrik yang berbeda, yaitu motor listrik AC dan motor listrik DC. Motor *Brushless* DC (BLDC) semakin banyak dipakai pada aplikasi rumah tangga hingga industri karena efisiensinya yang tinggi, bentuknya yang kompak, tidak menimbulkan polusi suara (*silent operation*) dan tidak memerlukan perawatan yang tinggi.

Perancangan sistem kontrol motor *brushless direct current* (bldc) kontruksi *axial flux* celah udara tunggal menggunakan Arduino – UNO berupa rangkaian satu buah MOSFET IRF540N yang kaki *gate* terhubung dengan pin 9 Arduino – UNO, kaki *drain* terhubung pada kutub positif motor bldc tersebut dan kaki *drain* terhubung pada *ground* yang ada pada Arduino – UNO. Rangkaian tersebut dihubungkan pada sumber tegangan tetap DC sebesar 13 V.

Pada penelitian yang ini dilakukan perancangan sistem kontrol untuk motor listrik searah tanpa sikat atau motor *brushless direct current* menggunakan Arduino – UNO. Prinsip kerja dari sistem kontrol tersebut adalah dengan mengubah nilai frekuensi yang digunakan sehingga diperoleh kecepatan tertentu sesuai dengan pengaruh dari frekuensi tersebut. Frekuensi ini terdiri dari gelombang *high* dan *low*, dimana saat dalam kondisi *high* maka magnet *stator* dalam kondisi *on* maka akan

terjadi tolak menolak dengan manget permanen pada rotor karena kutub kedua magnet tersebut sama, sehingga *rotor* bergerak pada magnet stator yang berada pada kondisi *on* yang lain sehingga terjadilah gaya tolak menolak yang berkelanjutan sehingga *rotor* berputar. Namun saat kondisi *low* maka magnet *stator* akan berada pada kondisi *off* atau tidak bersifat magnet sehingga *rotor* tidak akan tertolak karena gaya tolak magnet *stator* yang menolak magnet *rotor* tidak ada. Frekuensi yang digunakan pada penelitian ini nilainya adalah 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz, dan 35 Hz. Pada penelitian ini dilihat dan dianalisa pengaruh perubahan frekuensi tersebut terhadap kecepatan motor bldc tersebut.

Kesimpulan dari penelitian ini, perubahan nilai frekuensi mempengaruhi kinerja dari motor *brushless direct current* kontruksi *axial flux* celah udara tunggal karena jika semakin besar nilai frekuensi maka kecepatan motor juga akan semakin besar, sedangkan perubahan nilai *duty cycle* pada pengujian pertama dan nilai *duty cycle* yang tetap pada pengujian kedua tidak mempengaruhi kecepatan dari motor tersebut.

PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang maha kuasa atas segalanya, karena dengan ridho, hidayah dan petunjukNya, penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Rancang Bangun Sistem Kontrol Motor *Brushless Direct Current* Kontruksi *Axial Flux* Celah Udara Tunggal Menggunakan Arduino - Uno”. Selama penyusunan skripsi ini penulis mendapat bantuan berbagai pihak yang turut memberikan bantuan berupa motivasi, inspirasi, bimbingan, doa, fasilitas dan dukungan lainnya yang membantu memperlancar pengerjaan skripsi ini.

Untuk itu penulis mengucapkan terimakasih kepada.

1. Allah SWT yang telah melimpahkan rezeki, rahmat, hidayah dan karunia serta kasih sayang-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.
2. Nabi besar Muhammad SAW, yang telah menjadi suri tauladan bagi seluruh umat.
3. Ibu Dr. Ir. Entin Hidayah, M.U.M., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember.
4. Bapak Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T., Selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember.
5. Bapak Bapak Ir. Widyono Hadi, M.T selaku Dosen Pembing Utama serta Bapak H. Samsul Bachri M, S.T., M.MT selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam penulisan skripsi ini.
6. Bapak Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T dan Bapak Prof. Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M. selaku dosen penguji yang sudah memberikan saran untuk memperbaiki tugas akhir ini.
7. Bapak Prof. Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M. selaku Dosen Pembing Akademik yang telah membimbing penulis selama menjadi mahasiswa.
8. Ayahanda Mulyadi Hartono dan Ibunda Dwi Ambawani yang selalu memberikan motivasi, nasehat, cinta, perhatian, dan kasih sayang serta doa yang tak terhingga.
9. Sahabat tercinta “Pasukan Berani ST” dan “Fafiruers” yang telah menemani dan memberikan motivasi serta semangat yang sangat luar biasa.

10. Dulur seperjuangan KETEK UJ 2014 yang telah memberikan motivasi dan semangat dalam perjalanan di bangku kuliah.

11. semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Semoga skripsi ini dapat bermanfaat dalam mengembangkan ilmu pengetahuan khususnya untuk disiplin ilmu teknik elektro. Kritik dan saran yang mambangun diharapkan terus mengalir untuk lebih menyempurnakan skripsi ini dan dapat dikembangkan untuk penelitian selanjutnya.

Jember, 10 Juni 2019

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN PEMBIMBING	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
RINGKASAN	ix
PRAKATA	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR	xviii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Motor Listrik	5
2.1.1 Pengertian Motor Listrik.....	5
2.1.2 Motor Arus Bolak Balik (AC)	5
2.1.4 Motor Arus Searah (DC)	5
2.1.4 Motor DC Dengan Sikat atau <i>Brushed</i> DC Motor	6

2.1.5 Motor DC Tanpa Sikat atau <i>Brushless</i> DC Motor	7
2.2 Motor Brushless DC (BLDC)	8
2.3 Sistem Kontrol Motor	9
2.4 Arduino UNO	9
2.4.1 <i>Software</i> Arduino	11
2.4.2 Catu Daya.....	12
2.4.3 Memori.....	12
2.4.4 <i>Input</i> dan <i>Output</i>	13
2.4.5 Komunikasi	13
2.5 Transistor	14
2.5.1 Jenis Transistor.....	14
2.5.1.1 Transistor Bipolar (BJT)	14
2.5.1.2 Jenis-Jenis Transistor Bipolar	15
2.5.2 Transistor Medan Efek (<i>Field Effect Transistor</i>).....	16
2.5.2.1 Jenis-Jenis Transistor Medan Efek (<i>Field Effect Transistor</i>).....	16
2.6 Magnet	19
2.6.1 Magnet Permanen (<i>Neodymium</i>).....	19
2.7 Faktor- Faktor yang Berpengaruh Terhadap Kinerja Motor	20
2.5.1 Kuat Medan Magnet.....	20
2.5.2 Kecepatan Motor.....	21
2.5.3 Fluks Magnet.....	21
2.5.4 EMF (<i>Electro Motive Force</i>)	21
2.5.5 Solenoida.....	22
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN.....	24
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	24
3.1.1 Tempat Penelitian.....	24
3.1.2 Waktu Penelitian	24

3.2	Alat dan Bahan	24
3.3	Tahapan Penelitian	25
3.4	Diagram Perancangan Sistem Kontrol.....	27
3.5	Perancangan Sistem Kontrol Motor	28
3.5.1	Arduino Uno	29
3.6	Pengujian Pada Sistem Kontrol	30
3.6.1	Pemberian Tegangan Tetap	30
3.6.2	Pengaturan Variasi Nilai Frekuensi dan <i>Duty Cycle</i> Pada Sistem Kontrol	31
3.6.3	Perhitungan Kecepatan Motor	31
BAB 4.	HASIL DAN PEMBAHASAN	32
4.1	Perancangan Sistem Kontrol Motor <i>Brushless Direct Current</i> (BLDC) Kontruksi <i>Axial Flux</i> Celah Udara Tunggal.....	32
4.2	Pengujian Sistem Kontrol Motor <i>Brushless Direct Current</i> (BlDC) Kontruksi <i>Axial Flux</i> Celah Udara Tunggal	34
4.2.1	Pengujian Sistem Kontrol Motor Saat Menggunakan Frekuensi 10 Hz Sampai Dengan 35 Hz dan <i>Duty Cycle</i> 15% Sampai dengan 40%.....	35
4.2.2	Pengujian Sistem Kontrol Motor Saat Menggunakan Frekuensi 10 Hz Sampai dengan 35 Hz Dan <i>Duty Cycle</i> Tetap 15%	38
4.3	Perhitungan Kecepatan Motor <i>Brushless Direct Current</i> (BLDC) Kontruksi <i>Axial Flux</i> Celah Udara Tunggal.....	41
4.3.1	Perhitungan Kecepatan Motor Saat Menggunakan Frekuensi 10 Hz Sampai dengan 35 Hz dan <i>Duty Cycle</i> 15% Sampai dengan 40%	41
4.3.2	Perhitungan Kecepatan Motor Saat Menggunakan Frekuensi 10 Hz Sampai dengan 35 Hz dan <i>Duty Cycle</i> Tetap 15%	45

4.4 Perbandingan Kecepatan Motor <i>Brushless Direct Current</i> (BLDC) Kontruksi <i>Axial Flux</i> Celah Udara Tunggal Hasil Perhitungan dengan Hasil Pengujian	49
4.4.1 Perbandingan Kecepatan Motor Hasil Perhitungan dengan Pengujian Saat Menggunakan Frekuensi 10 Hz Sampai 35 Hz dan <i>Duty Cycle</i> 15% Sampai 40%	49
4.4.2 Perbandingan Kecepatan Motor Hasil Perhitungan dengan Pengujian Saat Menggunakan Frekuensi 10 Hz Sampai 35 Hz dan <i>Duty Cycle</i> Tetap 15%	51
4.5 Analisa Pengaruh Perubahan Nilai Frekuensi Dan <i>Duty Cycle</i> Pada Motor <i>Brushless Idrect Current</i> (BLDC) Kontruksi <i>Axial Flux</i> Celah Udara Tunggal.....	52
BAB 5. PENUTUP.....	54
5.1 Kesimpulan.....	54
5.2 Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA	56
LAMPIRAN.....	59

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Deskripsi Arduino – UNO	10
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Menggunakan Frekuensi 10 Hz Sampai dengan 35 Hz dan <i>Duty Cycle</i> 15% Sampai dengan 40%	35
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Menggunakan Frekuensi 10 Hz Sampai dengan 35 Hz dan <i>Duty Cycle</i> Tetap 15%	38
Tabel 4.3 Data Perhitungan Kecepatan Menggunakan Frekuensi 10 Hz Sampai dengan 35 Hz dan <i>Duty Cycle</i> 15% Sampai dengan 40%	42
Tabel 4.4 Data Perhitungan Kecepatan Motor Menggunakan Frekuensi 10 Hz Sampai dengan 35 Hz dan <i>Duty Cycle</i> Tetap 15%	46
Tabel 4.5 Data Perbandingan Kecepatan Motor Hasil Perhitungan Dengan Hasil Pengujian Menggunakan Nilai Frekuensi 10 Hz Sampai dengan 35 Hz dan Nilai <i>Duty Cycle</i> 15% sampai 40%	50
Tabel 4.6 Data Perbandingan Kecepatan Motor Hasil Perhitungan Dengan Hasil Pengujian Menggunakan Nilai Frekuensi 10 Hz Sampai dengan 35 Hz dan Nilai <i>Duty Cycle</i> tetap 15%	51

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 <i>Brushed</i> DC Motor konvensional.....	6
Gambar 2.2 <i>Brushed</i> DC Motor	7
Gambar 2.3 <i>Brushless</i> DC Motor.....	7
Gambar 2.4 Konstruksi <i>Brushless</i> DC Motor	8
Gambar 2.5 Arduino – UNO.....	9
Gambar 2.6 Tampilan <i>Toolbar</i> Arduino	11
Gambar 2.7 Transistor.....	14
Gambar 2.8 Transistor NPN.....	15
Gambar 2.9 Transistor PNP	16
Gambar 2.10 JFET (<i>Junction Field Effect Transistor</i>)	17
Gambar 2.11 MOSFET (<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>)	18
Gambar 2.12 UJT (<i>Uni Junction Transistor</i>).....	18
Gambar 2.13 Magnet <i>Neodymium</i>	20
Gambar 2.14 Medan Magnet Pada Solenoida.....	23
Gambar 3.1 Diagram alir Penelitian.....	25
Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem	27
Gambar 3.3 Rangkaian sistem kontrol menggunakan Arduino – UNO.....	28
Gambar 3.4 Skema Rangkaian Sistem Kontrol Menggunakan Arduino – UNO	28
Gambar 3.5 Arduino – UNO	29
Gambar 3.6 Program sistem kontrol menggunakan Arduino – UNO.....	29

Gambar 4.1 Desain Sistem Kontrol Motor <i>Brushless Direct Current</i> Kontruksi <i>Axial Flux</i> Celah Udara Tunggal Menggunakan Arduino - UNO.....	32
Gambar 4.2 Hasil Rancang Bangun Sistem Kontrol Motor <i>Brushless Direct</i> <i>Current</i> (Blde) Kontruksi <i>Axial Flux</i> Celah Udara Tunggal.....	33
Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Nilai Kecepatan Motor dengan Nilai Tegangan <i>Input</i>	37
Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Nilai Kecepatan Motor dengan Nilai <i>Duty</i> <i>Cycle</i>	37
Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Nilai Kecepatan dengan Nilai Frekuensi ...	38
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Nilai Kecepatan Motor dengan Nilai Tegangan <i>Input</i>	40
Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Nilai Kecepatan Motor dengan Nilai <i>Duty</i> <i>Cycle</i>	40
Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Nilai Kecepatan dengan Nilai Frekuensi ...	41
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Nilai Kecepatan Motor dengan Nilai Tegangan <i>Input</i>	48
Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Nilai Kecepatan Motor dengan Nilai <i>Duty</i> <i>Cycle</i>	44
Gambar 4.11 Grafik Perbandingan Nilai Kecepatan dengan Nilai Frekuensi .	44
Gambar 4.12 Grafik Perbandingan Nilai Kecepatan Motor dengan Nilai Tegangan <i>Input</i>	47
Gambar 4.13 Grafik Perbandingan Nilai Kecepatan Motor dengan Nilai <i>Duty Cycle</i>	48
Gambar 4.14 Grafik Perbandingan Nilai Kecepatan dengan Nilai Frekuensi	48
Gambar 4.15 Grafik Perbandingan Kecepatan Motor Hasil Perhitungan Dengan hasil Pengujian Menggunakan Nilai Frekuensi 10 Hz Sampai dengan 35 Hz dan Nilai <i>Duty Cycle</i> 15% sampai 40%	50

Gambar 4.16 Grafik Perbandingan Kecepatan Motor Hasil Perhitungan Dengan hasil Pengujian Menggunakan Nilai Frekuensi 10 Hz Sampai dengan 35 Hz dan Nilai *Duty Cycle* Tetap 15% 52



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Listrik merupakan kebutuhan yang sangat penting di zaman yang serba modern ini. Setiap aspek kehidupan manusia saat ini membutuhkan energi listrik untuk menunjang setiap kegiatan yang dilakukan oleh manusia. Kemajuan teknologi pada peralatan baik industri maupun rumah tangga tidak akan lepas dengan penggunaan motor. Motor merupakan alat yang dapat berputar jika dialiri dengan listrik. Motor listrik ini banyak kita jumpai penggunaannya dalam kehidupan sehari-hari kita, misalnya motor pada mesin cuci, blender, kipas angin dan peralatan listrik lainnya yang menggunakan motor listrik sebagai sumber penggerakannya. Selain peralatan tersebut motor listrik juga biasanya digunakan pada kendaraan yang kita gunakan sehari-hari, seperti pada mobil listrik dan sepeda motor listrik. Motor listrik sendiri masih terbagi menjadi 2 jenis motor yang mempunyai sumber energi listrik yang berbeda, yaitu motor listrik AC dan motor listrik DC. Jenis motor yang sering digunakan adalah motor DC karena mudah dalam pengendalian kecepatan yakni hanya mengatur nilai tegangan atau arus medan saja namun motor DC menggunakan komutator mekanik (sikat) sehingga memiliki keandalan rendah, karena terdapat rugirugi sikat dan memerlukan pemeliharaan atau penggantian secara berkala. Kelemahan tersebut dapat diatasi dengan menggunakan motor *brushless* DC yang menggunakan komutasi elektrik sehingga memiliki efisiensi yang tinggi dan waktu operasi yang lama. (Mahadian Dewangga, 2014)

Motor *Brushless* DC (BLDC) semakin banyak dipakai pada aplikasi rumah tangga hingga industri karena efisiensinya yang tinggi, bentuknya yang kompak, tidak menimbulkan polusi suara (*silent operation*) dan tidak memerlukan perawatan yang tinggi. Sebagai contoh, pompa minyak pada mobil yang menggunakan motor dc hanya bisa beroperasi maksimum 6.000 jam tetapi jika menggunakan motor BLDC siklus operasinya bisa ditingkatkan hingga 15.000 jam atau hampir tiga kali lipat. Sayangnya pengendalian variasi kecepatan motor BLDC mempunyai kompleksitas yang tinggi dan biayanya yang tinggi, karena

pada umumnya menggunakan sensor posisi rotor dengan *hall effect*, *resolver* atau *absolute sensor position*. (Tri Wahono & Tole Sutikno, 2016).

Pada penelitian yang ini dilakukan perancangan sistem kontrol untuk motor listrik searah tanpa sikat atau motor *brushless direct current* menggunakan Arduino – UNO. Motor BLDC yang digunakan pada penelitian ini adalah yang satu fasa dan memiliki kontruksi *axial flux* dengan rotor yang berada di bagian atas dan stator berada di bagian bawah. Nantinya sistem kontrol Arduino - UNO ini akan diuji untuk mengetahui karakteristiknya dengan cara merubah nilai frekuensi yang ada untuk membuat motor searah tanpa sikat satu fasa ini bekerja. Untuk desain motor searah tanpa sikat ini peneliti menggunakan 12 buah magnet permanen *neodymium* sebagai rotor dan 6 buah *coil* yang tersusun atas kawat *email* berdiameter 0,4 mm sebagai stator. Penelitian ini diharapkan dapat mengetahui kinerja serta memperbaiki kinerja dari motor BLDC yang tidak menggunakan sensor pada sistem kontrolnya dengan cara mengatur nilai frekuensi yang digunakan pada sistem kontrol tersebut yang disesuaikan dengan yang dibutuhkan oleh motor BLDC *axial flux* ini agar dapat bekerja dengan baik.

Dengan menggunakan sistem kontrol berbasis Arduino – UNO pengaturan nilai frekuensi juga diharapkan lebih mudah daripada menggunakan pengontrolan dengan cara analog pada sistem kontrol yang biasa. Hal ini dikarenakan pengontrolan nilai frekuensinya dapat dilakukan melalui *softwarre* Arduino yang ada di laptop dengan cara merubah nilai frekuensi sesuai dengan kebutuhan untuk dapat membuat motor bekerja dengan baik. Perubahan nilai frekuensi ini diharapkan berpengaruh kepada kinerja motor khususnya pada kecepatan motor searah tanpa sikat Dengan dilakukannya penelitian ini nantinya juga dapat dikembangkan kembali untuk membuat sistem kontrol motor listrik searah tanpa sikat yang lebih baik dan lebih efisien dibandingkan dengan penelitian yang sebelumnya.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang diatas dapat dirumuskan beberapa rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana merancang sistem kontrol motor *brushless direct current* satu fasa kontruksi *axial flux* celah udara tunggal menggunakan Arduino - UNO?
2. Bagaimana pengaruh perubahan frekuensi terhadap kecepatan dan kinerja motor *brushless direct current* satu fasa kontruksi *axial flux* celah udara tunggal?

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan penelitian diatas, supaya pembahsan tidak terlalu luas maka diperlukan suatu pembatasan masalah yaitu :

1. *Starting* awal motor diabaikan.
2. Magnet permanen berjumlah 12 buah dan *coil* berjumlah 6 buah.
3. Menggunakan jumlah lilitan sebanyak 600.
4. Menggunakan diameter kawat 0,4 mm.
5. Magnet *neodymium* silinder 1 X 0,2 cm.
6. Menggunakan tegangan tetap sebesar 13 Vdc.
7. Menggunakan nilai frekuensi dalam pengaruh kinerja motor
8. Pengujian pada alat hanya di kecepatan motor.
9. Pengujian motor dilakukan tanpa beban.

1.4 Tujuan Penelitian

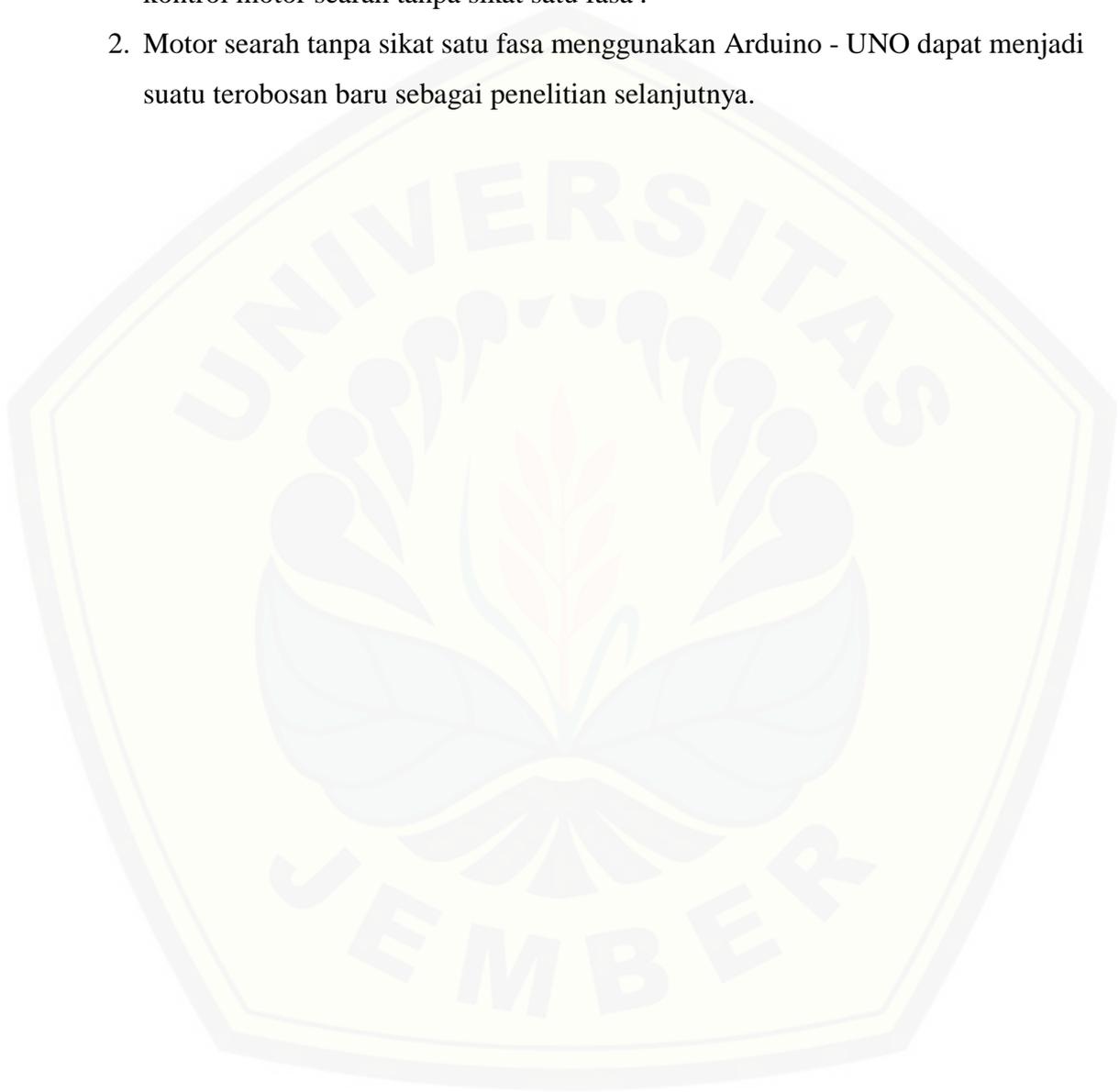
Adapun tujuan yang akan dicapai dalam melaksanakan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Merancang sistem kontrol motor *brushless direct current* satu fasa kontruksi *axial flux* celah udara tunggal menggunakan Arduino - UNO.
2. Menganalisa pengaruh perubahan frekuensi terhadap kecepatan dan kinerja motor *brushless direct current* satu fasa kontruksi *axial flux* celah udara tunggal.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian yang diharapkan setelah melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mendukung pengembangan ilmu pengetahuan tentang penggunaan sistem kontrol motor searah tanpa sikat satu fasa .
2. Motor searah tanpa sikat satu fasa menggunakan Arduino - UNO dapat menjadi suatu terobosan baru sebagai penelitian selanjutnya.



BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor listrik

2.1.1 Pengertian Motor Listrik

Motor merupakan sebuah alat yang merubah energi masukannya menjadi bentuk energi yang lain, misalnya energi listrik menjadi energi gerak. Pengertian dari motor listrik adalah sebuah alat yang merubah energi sumber yang berupa listrik menjadi energi gerak yang dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan benda lain. Bergeraknya sebuah motor (yaitu berputar horizontal) disebabkan karena adanya gaya dan torsi yang diberikan oleh energi utama tersebut. Motor listrik berputar karena adanya gaya dan torsi elektromagnetik di dalam mesin tersebut. (Yakob L, 2014)

2.1.2 Motor Arus Bolak-Balik (AC)

Menurut (Drs. Yon Rijono) hal³⁰⁹ Motor listrik AC memiliki beberapa jenis, yang jenis ini dibedakan berdasarkan beberapa faktor utama yang antara lain berdasarkan prinsip kerja, berdasarkan macam arus dan berdasarkan kecepatan.

- a. Berdasarkan prinsip kerja
 - Motor sinkron dan Motor asinkron
 - Motor induksi (*Squirrel cage & slip ring*).
 - Motor komutator (Seri, terkompensasi, shunt, repulsi).
- b. Berdasarkan macam arus
 - *Phase* tunggal
 - Tiga *phase*
- c. Berdasarkan kecepatan
 - Kecepatan konstan
 - Kecepatan berubah
 - Kecepatan diatur

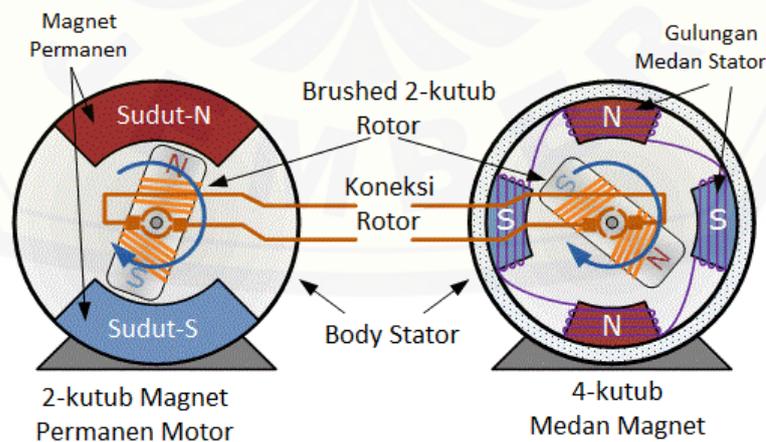
2.1.3 Motor Arus Searah (DC)

Merupakan jenis motor yang menggunakan tegangan searah sebagai sumber tenaganya. Dengan memberikan beda tegangan pada kedua terminal tersebut, motor akan berputar pada satu arah, dan bila polaritas dari tegangan tersebut dibalik maka arah putaran motor akan terbalik pula. Polaritas dari tegangan yang diberikan pada dua terminal menentukan arah putaran motor sedangkan besar dari beda tegangan pada kedua terminal menentukan kecepatan motor. Motor DC ini memiliki 2 bagian utama, yaitu:

1. Bagian yang tetap/stasioner yang disebut stator. Stator ini menghasilkan medan magnet, baik yang dibangkitkan dari sebuah koil (elektro magnet) ataupun magnet permanen.
2. Bagian yang berputar disebut rotor. Rotor ini berupa sebuah koil dimana arus listrik mengalir.

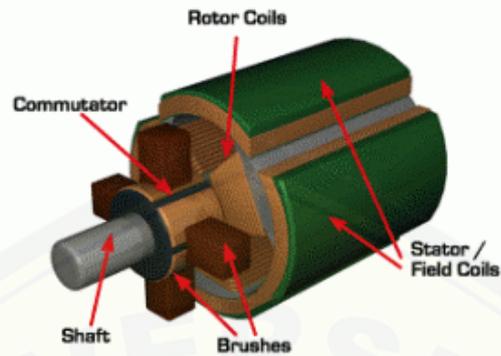
2.1.4 Motor DC Dengan Sikat atau *Brushed* DC Motor

Motor jenis ini menghasilkan medan magnet pada rotor (bagian yang berputar) dengan melewati arus listrik melalui komutator dan sikat karbon, maka dari itu istilah "*Brushed* atau Sikat". Medan medan *stators* (medan stasioner) dihasilkan dengan menggunakan medan belitan stator atau dengan magnet permanen. Umumnya *brushed* motor DC yang murah, kecil dan mudah dikontrol.



Gambar 2.1 *Brushed* DC Motor konvensional

Sumber : <http://www.tespenku.com/2018/01/motor-dc-brushed-dan-brushless.html>

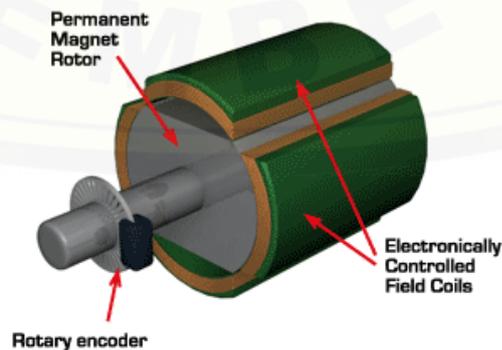


Gambar 2.2 *Brushed* DC Motor

Sumber : <https://crizkydwi.wordpress.com/2014/11/05/motor-dc-dan-generator-dc/>

2.1.5 Motor DC Tanpa Sikat atau *Brushless* DC Motor

Brushless DC motor gambar 2.3 adalah motor magnet permanen di mana fungsi komutator dan sikat dilaksanakan oleh *solid state switch*. *Brushless* DC motor dikenal tidak hanya oleh efisiensi yang tinggi, tetapi juga oleh mereka tidak pemeliharaan. Sebagai wujud peran serta dalam melaksanakan pengembangan bidang energi untuk mengatasi krisis energi khususnya migas yang sedang dihadapi masyarakat Indonesia, salah satu program pengembangan *Axial Brushless* DC Motor untuk *prototype* mobil listrik sebagai sarana pengembangan mobil listrik nasional. (Hudha Rencana P.S.W. , 2014)



Gambar 2.3 *Brushless* DC Motor

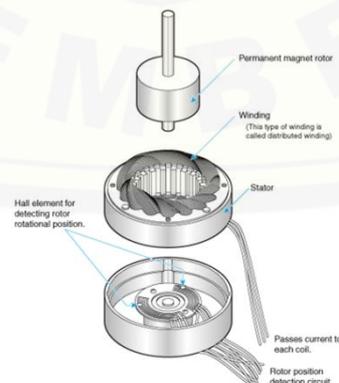
Sumber : <http://www.evworks.com.au/page/technical-information/motors/>

2.2 Motor Brushless DC (BLDC)

Motor Brushless DC (BLDC) adalah motor sinkron dengan magnet permanen pada rotor dan kumparan jangkar pada stator. Keuntungan paling jelas dari konfigurasi tanpa sikat adalah penghilangan sikat, yang menghilangkan pemeliharaan sikat dan bunga api. Penggunaan kumparan jangkar pada stator membantu konduksi panas pada kumparan. Karena tidak ada kumparan pada rotor, kerugian listrik dalam rotor menjadi minimal. Motor BLDC lebih disukai dibandingkan dengan motor induksi untuk daerah daya sebagian-sebagian.

Motor BLDC memiliki efisiensi yang dan faktor daya yang lebih baik dan oleh karena itu, daya keluaran lebih besar untuk kerangka yang sama, karena penguatan medan dipengaruhi oleh magnet permanen dan tidak harus disuplai oleh arus jangkar. Keuntungan-keuntungan yang didapat dari motor BLDC disertai dengan peningkatan kompleksitas di kontroler elektronik dan perlunya penginderaan posisi poros. Eksitasi magnet permanen (PM) lebih layak untuk motor kecil, biasanya di bawah 20 kW. Untuk motor yang lebih besar, biaya dan berat magnet menjadi terlalu tinggi, dan itu akan membuat lebih masuk akal untuk memilih eksitasi dengan elektromagnet.

Namun, dengan pengembangan bahan magnet permanen medan tinggi, motor PM dengan kapasitas beberapa megawatt telah dibangun. Meskipun motor BLDC memakan biaya lebih dari motor DC dengan sikat, hal ini akan sepadan seiring dengan banyaknya waktu dan uang yang dihabiskan motor DC dengan sikat jika sikat aus. (Ahmad Fcahrudin, 2016)



Gambar 2.4 Konstruksi *Brushless* DC Motor

Sumber : <https://onexperience.wordpress.com/2016/09/04/blog-post-title-2/>

2.3 Sistem Kontrol Motor

Merupakan sebuah rangkaian elektronika daya yang memiliki fungsi untuk mengatur dan menggerakkan sebuah motor. Sederhananya sistem kontrol motor ini merupakan otak yang mengatur bagaimana motor itu bekerja sesuai dengan yang kita harapkan. Sistem kontrol motor ini biasanya mengatur seberapa besar tegangan yang dibutuhkan oleh sebuah motor listrik untuk bekerja, dengan cara menaikkan atau menurunkan tegangan masukan dari sumber. Sistem kontrol ini juga dapat mengatur arah putaran dari motor BLDC tersebut.

Sistem kontrol motor ini sangat diperlukan pada Motor BLDC karena motor tersebut tidak menggunakan sikat dan komutator, yang dimana fungsi dari sikat dan komutator pada motor adalah sebagai pengatur masuknya arus dan tegangan yang dapat menggerakkan motor listrik tersebut digantikan oleh sistem kontrol ini.

2.4 Arduino Uno

Arduino UNO adalah sebuah *board* mikrokontroler yang didasarkan pada ATmega328. Arduino UNO mempunyai 14 pin *digital input/output* (6 di antaranya dapat digunakan sebagai output PWM), 6 input analog, sebuah osilator Kristal 16 MHz, sebuah koneksi USB, sebuah *power jack*, sebuah ICSP *header*, dan sebuah tombol *reset*. Arduino UNO memuat semua yang dibutuhkan untuk menunjang mikrokontroler, mudah menghubungkannya ke sebuah computer dengan sebuah kabel USB atau mensuplainya dengan sebuah adaptor AC ke DC atau menggunakan baterai untuk memulainya. (Andi A & Oka H, 2013)



Gambar 2.5 Arduino – UNO

Sumber : <https://www.robotistan.com/arduino-uno-r3-clone-with-usb-cable-usb-chip-ch340>

Mikrokontroler Arduino ini mempunyai kelebihan yang tidak ada pada jenis mikrokontroler lainnya, yaitu Arduino ini mempunyai bahasa pemrograman yang cukup mudah yaitu bahasa C. Selain itu Arduino juga bersifat *open source* atau sumber terbuka dimana dapat digunakan dan diterapkan dimana saja. Untuk pemrograman Arduino ini juga terbilang sangat mudah, yaitu hanya dengan menghubungkan *board* Arduino itu ke laptop atau komputer kita melalui *loader* yang sudah ada pada *board*-nya yang berupa USB. Pemrogramannya menggunakan aplikasi khusus dari Arduino yang mudah digunakan dan dapat diunduh pada situs resmi dari Arduino. Papan arduino dapat mengambil daya dari USB *port* pada komputer dengan menggunakan USB *charger* atau dapat pula mengambil daya dengan menggunakan suatu AC adapter dengan tegangan 9 volt. Jika tidak terdapat *power supply* yang melalui AC adapter, maka papan arduino akan kembali mengambil daya dari USB *port*. Tetapi apabila diberikan daya melalui AC adapter secara bersamaan dengan USB *port* maka papan arduino akan mengambil daya melalui AC adapter secara otomatis. (Istiyanto, 2014:19)

Terdapat 14 *pin I/O digital* dan 6 *pin input analog* dan jika ditotal sebuah *board* Arduino memiliki 20 *pin I/O*. Dari 14 *pin I/O* tersebut 6 diantaranya merupakan *pin* yang menyediakan keluaran PWM, yaitu *pin* 2 hingga *pin* 7. Sedangkan untuk *pin analog* yang terdiri dari 6 *pin* yaitu *pin* A0 hingga *pin* A5.

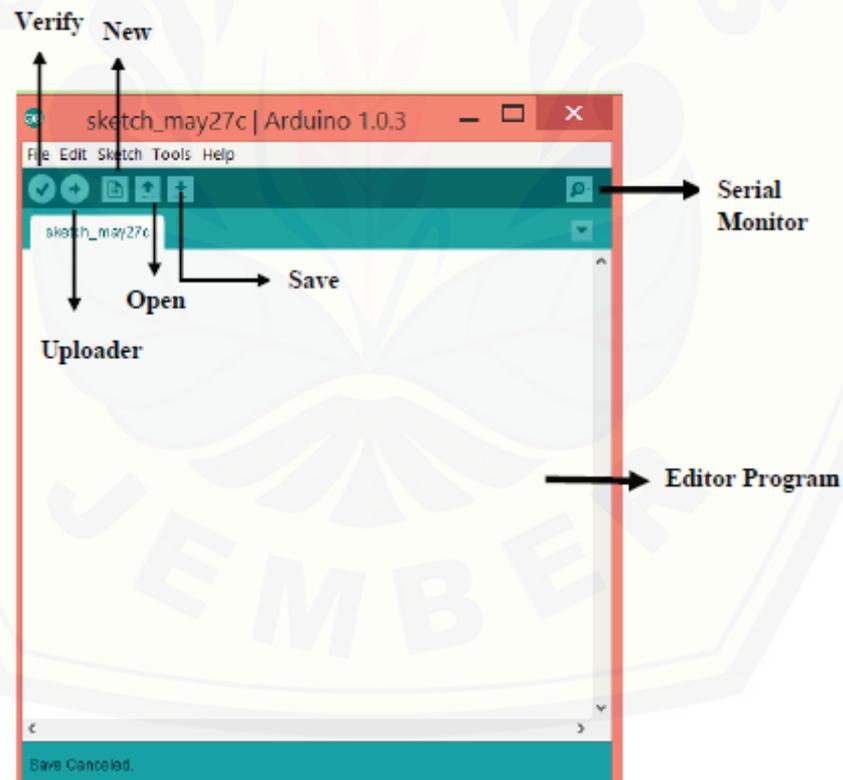
Tabel 2.1 Deskripsi Arduino - UNO

Mikrokontroler	Atmega 328
Tegangan Pengoperasian	5V
Tegangan Input yang disarankan	7 – 12 V
Batas Tegangan Input	6 - 20 V
Jumlah pin I/O digital	14 pin digital (6 diantaranya menyediakan keluaran PWM)
Jumlah pin input Analog	6 pin
Arus DC tiap pin I/O	40mA
Arus DC untuk pin 3,3 V	50mA
Memori Flash	32 KB (ATmega 328) sekitar 0,5 KB digunakan oleh bootloader

SRAM	2 KB (ATmega 328)
EPROM	1 KB (ATmega 328)
Clock Speed	16 Hz

2.4.1 Software Arduino

Software arduino yang digunakan adalah *driver* dan IDE, walaupun masih ada beberapa *software* lain yang sangat berguna selama pengembangan arduino. IDE atau *Integrated Development Environment* merupakan suatu program khusus untuk suatu komputer agar dapat membuat suatu rancangan atau sketsa program untuk papan Arduino. IDE arduino merupakan *software* yang sangat canggih ditulis dengan menggunakan java. IDE arduino terdiri dari :



Gambar 2.6 Tampilan *Toolbar* Arduino

(Sumber : Syahwil,2013:42)

2.4.2 Catu Daya

Arduino dapat diberikan *power* melalui koneksi USB atau Catu Daya. *Power* di *select* secara otomatis. Catu Daya dapat menggunakan adaptor DC atau baterai. Adaptor dapat dikoneksikan dengan mencolok *jack* adaptor pada koneksi *port input supply*. *Board* arduino dapat dioperasikan menggunakan *supply* dari luar sebesar 6 - 20 *volt*. Jika *supply* kurang dari 7V, kadangkala *pin 5V* akan menyuplai kurang dari 5 *volt* dan *board* bisa menjadi tidak stabil. Jika menggunakan lebih dari 12 V, tegangan di regulator bisa menjadi sangat panas dan menyebabkan kerusakan pada *board*. Rekomendasi tegangan ada pada 7 sampai 12 *volt*. Penjelasan pada *pin power* adalah sebagai berikut :

- a. *Vin* : Tegangan *input* ke *board* arduino ketika menggunakan tegangan dari luar (seperti yang disebutkan 5 *volt* dari koneksi USB atau tegangan yang diregulasikan). Pengguna dapat memberikan tegangan melalui *pin* ini, atau jika tegangan suplai menggunakan *power jack*, aksesnya menggunakan *pin* ini.
- b. 5V : Regulasi *power supply* digunakan untuk *power* mikrokontroler dan komponen lainnya pada *board*. 5V dapat melalui *Vin* menggunakan regulator pada *board*, atau *supply* oleh USB atau *supply* regulasi 5V lainnya.
- c. 3V3 : Suplai 3.3 *volt* didapat oleh FTDI *chip* yang ada di *board*. Arus maksimumnya adalah 50 mA.
- d. *Pin Ground* : berfungsi sebagai jalur *ground* pada arduino.

2.4.3 Memori

ATmega328 memiliki 32 KB *flash* memori untuk menyimpan kode, juga 2 KB yang digunakan untuk *bootloader*. ATmega328 memiliki 2 KB untuk SRAM dan 1 KB untuk EEPROM.

2.4.4 Input dan Output

Setiap 14 *pin digital* pada Arduino dapat digunakan sebagai *input* atau *output*, menggunakan fungsi *pinMode()*, *digitalWrite()*, dan *digitalRead()*. *Input/output* dioperasikan pada 5 *volt*. Setiap *pin* dapat menghasilkan atau menerima maksimum 40 mA dan memiliki *internal pull-up resistor* (*disconnected* oleh *default*) 20-50K Ohm. Beberapa *pin* memiliki fungsi sebagai berikut :

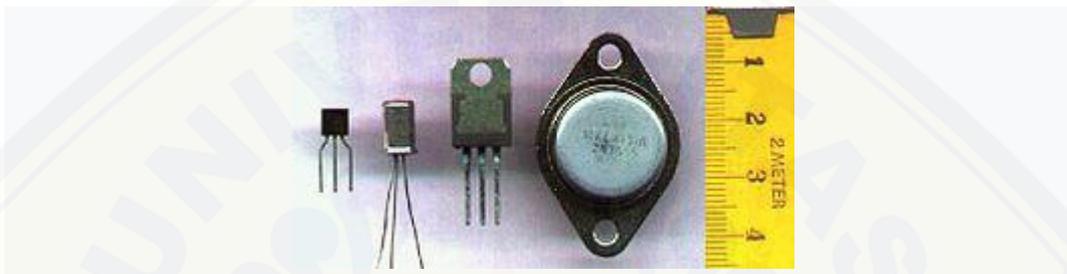
- a. *Serial* : 0 (RX) dan 1 (TX). Digunakan untuk menerima (RX) dan mengirim (TX) TTL data *serial*. *Pin* ini terhubung pada *pin* yang *koresponding* dari USB ke TTL *chipserial*.
- b. *Interrupt eksternal* : 2 dan 3. *Pin* ini dapat dikonfigurasi untuk *trigger* sebuah *interap* pada *lowvalue*, *rising* atau *fallingedge*, atau perubahan nilai.
- c. PWM : 3, 5, 6, 9, 10, dan 11. Mendukung 8-bit *output* PWM dengan fungsi *analogWrite()*.
- d. SPI : 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). *Pin* ini *support* komunikasi SPI, yang mana masih mendukung *hardware*, yang tidak termasuk pada bahasa arduino.
- e. LED : 13. Ini adalah dibuat untuk koneksi LED ke *digital pin* 13. Ketika *pin* bernilai *HIGH*, LED hidup, ketika *pin* *LOW*, LED mati.

2.4.5 Komunikasi

Arduino UNO memiliki sejumlah fasilitas untuk berkomunikasi dengan komputer, arduinolain, atau mikrokontroler lain. ATmega328 ini menyediakan UART TTL (5V) komunikasi *serial*, yang tersedia pada *pin digital* 0 (RX) dan 1 (TX). *Firmware* arduinomenggunakan USB *driver standart* COM, dan tidak ada *driver* eksternal yang dibutuhkan. Namun, pada *Windows*, file. Ini diperlukan. Perangkat lunak arduino termasuk *monitor serial* yang memungkinkan data sederhana yang akan dikirim ke *board* arduino. RX dan TX LED di *board* akan berkedip ketika data sedang dikirim melalui *chip* USB-to-serial dan koneksi USB ke komputer.

2.5 Transistor

Transistor adalah alat semikonduktor yang dipakai sebagai penguat, sebagai sirkuit pemutus dan penyambung (*switching*), stabilisasi tegangan, modulasi sinyal atau sebagai fungsi lainnya. Transistor dapat berfungsi semacam kran listrik, di mana berdasarkan arus *input* nya (BJT) atau tegangan *input* nya (FET), memungkinkan pengaliran listrik yang sangat akurat dari sirkuit sumber listriknya.



Gambar 2.7 Transistor

Sumber : <https://id.wikipedia.org/wiki/Transistor>

Pada umumnya, transistor memiliki 3 terminal, yaitu Basis (B), Emitor (E) dan Kolektor (C). Tegangan yang di satu terminalnya misalnya Emitor dapat dipakai untuk mengatur arus dan tegangan yang lebih besar daripada arus input Basis, yaitu pada keluaran tegangan dan arus output Kolektor.

Transistor merupakan komponen yang sangat penting dalam dunia elektronik modern. Dalam rangkaian *analog*, transistor digunakan dalam amplifier (penguat). Rangkaian analog melingkupi pengeras suara, sumber listrik stabil (stabilisator) dan penguat sinyal radio. Dalam rangkaian-rangkaian digital, transistor digunakan sebagai saklar berkecepatan tinggi. Beberapa transistor juga dapat dirangkai sedemikian rupa sehingga berfungsi sebagai *logic gate*, memori dan fungsi rangkaian-rangkaian lainnya. (Wikipedia, 2018)

2.5.1 Jenis Transistor

2.5.1.1 Transistor Bipolar (BJT)

Transistor Bipolar adalah Transistor yang struktur dan prinsip kerjanya memerlukan perpindahan muatan pembawanya yaitu electron di kutup negatif

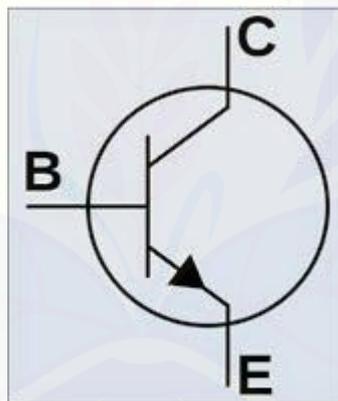
untuk mengisi kekurangan electron atau hole di kutub positif. Bipolar berasal dari kata “*bi*” yang artinya adalah “dua” dan kata “*polar*” yang artinya adalah “kutub”. Transistor Bipolar juga sering disebut juga dengan singkatan BJT yang kepanjangannya adalah *Bipolar Junction Transistor*.

2.5.1.2 Jenis-jenis Transistor Bipolar

Transistor Bipolar terdiri dari dua jenis yaitu Transistor NPN dan Transistor PNP. Tiga Terminal Transistor ini diantaranya adalah terminal Basis, Kolektor dan Emitor.

a. Transistor NPN

Transistor bipolar yang menggunakan arus listrik kecil dan tegangan positif pada terminal Basis untuk mengendalikan aliran arus dan tegangan yang lebih besar dari Kolektor ke Emitor.

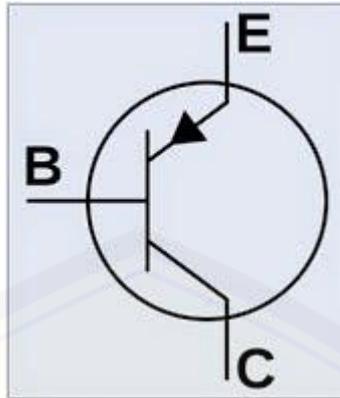


Gambar 2.8 Transistor NPN

Sumber : <http://werden-forscher.blogspot.co.id/2015/03/pengertian-transistor-jenis-dan.html>

b. Transistor PNP

Transistor bipolar yang menggunakan arus listrik kecil dan tegangan negatif pada terminal Basis untuk mengendalikan aliran arus dan tegangan yang lebih besar dari Emitor ke Kolektor.



Gambar 2.9 Transistor PNP

Sumber : <http://werden-forscher.blogspot.co.id/2015/03/pengertian-transistor-jenis-dan.html>

2.5.2 Transistor Efek Medan (*Field Effect Transistor*)

Transistor Efek Medan atau Field Effect Transistor yang disingkat menjadi FET ini adalah jenis Transistor yang menggunakan listrik untuk mengendalikan konduktifitasnya. Yang dimaksud dengan Medan listrik disini adalah Tegangan listrik yang diberikan pada terminal Gate (G) untuk mengendalikan aliran arus dan tegangan pada terminal Drain (D) ke terminal Source (S). Transistor Efek Medan (FET) ini sering juga disebut sebagai Transistor Unipolar karena pengoperasiannya hanya tergantung pada salah satu muatan pembawa saja, apakah muatan pembawa tersebut merupakan Electron maupun Hole.

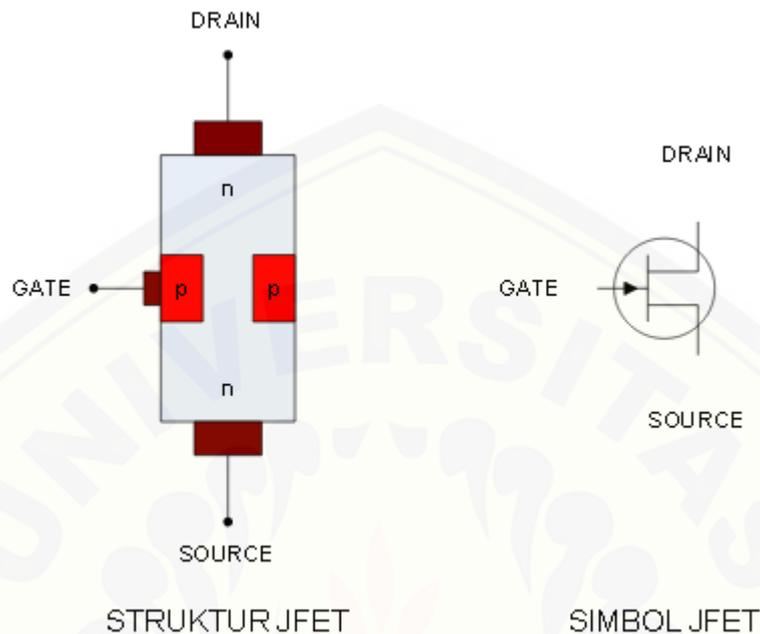
2.5.2.1 Jenis-jenis Transistor Efek Medan (*Field Effect Transistor*)

Transistor jenis FET ini terdiri dari tiga jenis yaitu Junction Field Effect Transistor (JFET), Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) dan Uni Junction Transistor (UJT).

a. JFET (*Junction Field Effect Transistor*)

Transistor Efek Medan yang menggunakan persimpangan (junction) p-n bias terbalik sebagai isolator antara Gerbang (Gate) dan Kanal nya. JFET terdiri dari dua jenis yaitu JFET Kanal P (p-channel) dan JFET Kanal N (n-channel).

JFET terdiri dari tiga kaki terminal yang masing-masing terminal tersebut diberi nama Gate (G), Drain (D) dan Source (S).

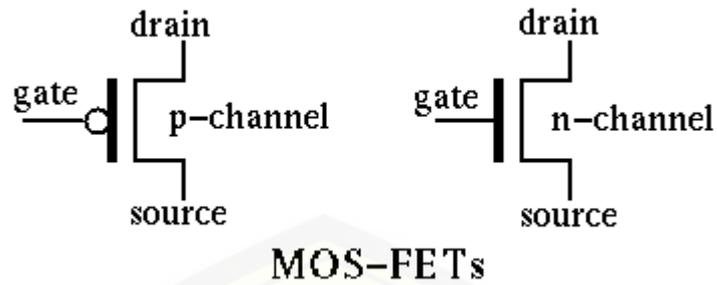


Gambar 2.10 JFET (*Junction Field Effect Transistor*)

Sumber : <http://werden-forscher.blogspot.co.id/2015/03/pengertian-transistor-jenis-dan.html>

b. MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*)

Transistor Efek Medan yang menggunakan Isolator (biasanya menggunakan Silicon Dioksida atau SiO₂) diantara Gerbang (Gate) dan Kanal nya. MOSFET ini juga terdiri dua jenis konfigurasi yaitu MOSFET Depletion dan MOSFET Enhancement yang masing-masing jenis MOSFET ini juga terbagi menjadi MOSFET Kanal-P (P-channel) dan MOSFET Kanal-N (N-channel). MOSFET terdiri dari tiga kaki terminal yaitu Gate (G), Drain (D) dan Source (S).

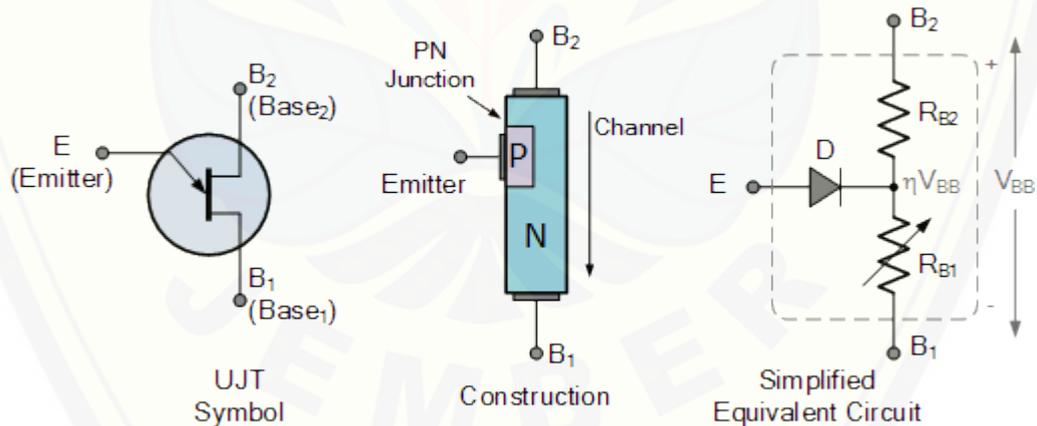


Gambar 2.11 MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*)

Sumber : <http://fourier.eng.hmc.edu/e84/lectures/ch4/node13.html>

c. UJT (*Uni Junction Transistor*)

Transistor yang digolongkan sebagai Field Effect Transistor (FET) karena pengoperasiannya juga menggunakan medan listrik atau tegangan sebagai pengendalinya. Berbeda dengan jenis FET lainnya, UJT memiliki dua terminal Basis (B_1 dan B_2) dan 1 terminal Emitor. UJT digunakan khusus sebagai pengendali (switch) dan tidak dapat dipergunakan sebagai penguat seperti jenis transistor lainnya.



Gambar 2.12 UJT (*Uni Junction Transistor*)

Sumber : <https://www.electronics-tutorials.ws/power/unijunction-transistor.html>

2.6 Magnet

Magnet atau magnit adalah suatu objek yang mempunyai suatu medan magnet. Kata magnet (magnit) berasal dari bahasa Yunani *magnítis líthos* yang berarti batu Magnesian. Magnesia adalah nama sebuah wilayah di Yunani pada masa lalu yang kini bernama Manisa (sekarang berada di wilayah Turki) di mana terkandung batu magnet yang ditemukan sejak zaman dulu di wilayah tersebut.

Pada saat ini, suatu magnet adalah suatu materi yang mempunyai suatu medan magnet. Materi tersebut bisa dalam berwujud magnet tetap atau magnet tidak tetap. Magnet yang sekarang ini ada hampir semuanya adalah magnet buatan. Magnet selalu memiliki dua kutub yaitu: kutub utara (*north/ N*) dan kutub selatan (*south/S*). Walaupun magnet itu dipotong-potong, potongan magnet kecil tersebut akan tetap memiliki dua kutub. Magnet dapat menarik benda lain. Beberapa benda bahkan tertarik lebih kuat dari yang lain, yaitu bahan logam. Namun tidak semua logam mempunyai daya tarik yang sama terhadap magnet. Besi dan baja adalah dua contoh materi yang mempunyai daya tarik yang tinggi oleh magnet. Sedangkan oksigen cair adalah contoh materi yang mempunyai daya tarik yang rendah oleh magnet. (Wikipedia, 2018)

2.6.1 Magnet Permanen (*Neodymium*)

Neodymium adalah logam yang bersifat feromagnetik (lebih khusus menunjukkan sifat antiferromagnetik), yang berarti bahwa seperti besi dapat menjadi magnet untuk menjadi magnet, tetapi suhu Curie (suhu di atas yang feromagnetiknya menghilang) adalah 19 K (-254°C), sehingga dalam bentuk murni kemagnetannya hanya muncul pada suhu yang sangat rendah. Namun, senyawa *neodymium* dengan logam transisi seperti besi dapat memiliki suhu Curie jauh di atas suhu kamar, dan ini digunakan untuk membuat magnet *neodymium*.

Sebuah magnet *neodymium* (juga dikenal sebagai NdFeB, NIB atau Neo magnet), yang paling banyak digunakan jenis magnet rare-earth, adalah magnet permanen yang terbuat dari paduan neodymium, besi dan boron untuk membentuk struktur kristal tetragonal Nd₂Fe₁₄B. Dikembangkan secara independen pada tahun 1982 oleh General Motors dan Sumitomo Special Metals, magnet

neodymium adalah jenis magnet permanen terkuat yang tersedia secara komersial. Mereka telah menggantikan jenis magnet lain dalam banyak aplikasi dalam produk modern yang membutuhkan magnet permanen yang kuat, seperti motor dalam peralatan nirkabel, *hard disk drive* dan pengencang magnet. (Wikipedia, 2018)



Gambar 2.13 Magnet *Neodymium*

Sumber : <http://www.tokomagnetmustang.com/magnet-coin/product5.html>

2.7 Faktor – Faktor yang Berpengaruh terhadap Kinerja Motor

2.7.1 Kuat Medan Magnet

Motor BLDC agar dapat bekerja harus ada kuat medan magnet yang bekerja atau timbul dalam motor. Kuat medan magnet tersebut dipengaruhi oleh banyak serta panjang lilitan, arus yang mengalir dan yang terakhir yaitu permeabilitas bahan. (Septian A, 2018)

Kuat medan dapat di hitung dengan menggunakan rumus yaitu :

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{L} (\text{wb/m}^2) \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana

B = kuat medan magnet

N = jumlah lilitan

- I = arus
 L = panjang penampang
 μ = permeabilitas bahan ($4\pi \times 10^{-7}$ dalam satuan standard)

2.7.2 Kecepatan Motor

Rotor adalah bagian motor yang berputar karena adanya gaya elektromagnetik dari stator. Jumlah kutub magnet berbanding lurus dengan torsi motor, namun berbanding terbalik dengan RPM. Untuk mendapatkan hasil dari kecepatan motor yang sedang berputar dengan nilai frekuensi yang sudah diketahui pada osiloskop dapat digunakan persamaan sebagai berikut.

$$N_s = \frac{120 f}{P} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana

N_s = Kecepatan sinkron motor (RPM)

F = Frekuensi (HZ)

P = Jumlah kutub motor

(pramono, pratama, & warindi, 2016)

2.7.3 Fluks Magnet

Fluks magnetik yang melalui bidang tertentu sebanding dengan jumlah medan magnet yang melalui bidang tersebut. Jumlah ini termasuk pengurangan atas medan magnet yang berlawanan arah. Jika medan magnet seragam melalui bidang dengan tegak lurus, nilai *fluks* magnetik didapat dari perkalian antara medan magnet dan luas bidang yang dilaluinya. (Dian Agus, 2018)

2.7.4 EMF (*Electro Motive Force*)

EMF (*Electro Motive Force*) disebut juga gaya gerak listrik yang berbeda. EMF induksi ditimbulkan karena adanya gaya yang dihasilkan oleh konduktor yang melawan gaya yang diberikan kepada konduktor tersebut. Teorinya adalah jika sebuah konduktor listrik memotong garis medan magnet maka akan timbul gaya gerak listrik pada konduktor tersebut. (Indradewa, 2013)

EMF balik atau gaya gerak listrik balik itu sendiri adalah tegangan balik yang dihasilkan oleh belitan motor BLDC ketika motor BLDC tersebut berputar yang memiliki polaritas tegangan berlawanan arahnya dengan tegangan sumber yang dibangkitkan. Ketika motor BLDC sudah dibuat pada jumlah lilitan stator dan besarnya medan magnet yang dihasilkan nilainya sudah dibuat konstan sehingga yang mempengaruhi besarnya EMF balik adalah besarnya kecepatan sudut yang dihasilkan motor, semakin besar kecepatan sudut yang dihasilkan maka semakin besar pula EMF balik yang dihasilkan oleh motor. Perubahan besarnya EMF balik ini mempengaruhi torsi motor *brushless* DC, apabila kecepatan motor yang dihasilkan melebihi kecepatan rata-rata, maka akan mengakibatkan EMF balik yang dihasilkan oleh motor lebih besar daripada tegangan potensial pada belitan stator sehingga arus yang mengalir pada stator akan turun (Kurniawan, 2016).

Besarnya EMF sendiri dapat dihitung dengan persamaan :

$$V = iR + EMF \dots\dots\dots(2.3)$$

$$EMF = V - I.R \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan :

EMF = GGL (volt).

I = arus (A).

R = tahananpada stator (ohm).

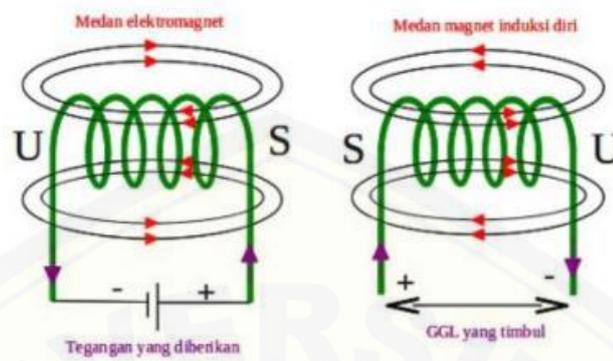
V = tegangan terminal (volt).

2.7.5 Solenoida

Solenoida merupakan sebuah kumparan kawat yang terdiri dari beberapa lilitan (*loop*). Saat arus listrik mengalir solenoida, solenoida tersebut akan memiliki sifat medan magnet. (Kurniawan, 2016)

Sifat medan magnet atau kutub magnet yang dihasilkan oleh solenoida tersebut bergantung pada arah lilitan dan arah arus yang lewat pada kawat penghantar tersebut. Pada stator BLDC terbuat dari solenoid yang terbung

dengan sumber dc. Sehingga konduktor di dalam solenoid berubah menjadi magnet sehingga timbul gaya elektromagnetik.



Gambar 2.14 Medan Magnet Pada Solenoida.

Sumber : (Kurniawan, 2016)

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

Pembahasan pada bab ini dijelaskan beberapa hal pokok yaitu tempat dan waktu penelitian, alat dan bahan penelitian, tahapan penelitian, blok diagram dan perancangan sistem, desain sistem kontrol motor *brushless direct current* kontruksi *axial flux* celah udara tunggal menggunakan Arduino – UNO, serta desain motor *brushless direct current axial flux* celah udara tunggal. Adapun kegiatan yang dilakukan, dijelaskan dalam susunan seperti berikut:

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

3.1.1 Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Konversi Energi Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jl. Slamet Riyadi No. 62 Patrang, Jember 68111.

3.1.2 Waktu Penelitian

Waktu penelitian ini dilakukan selama 10 bulan. Penelitian dilakukan sejak bulan Juni 2018 hingga Februari 2019.

3.2 Alat dan Bahan

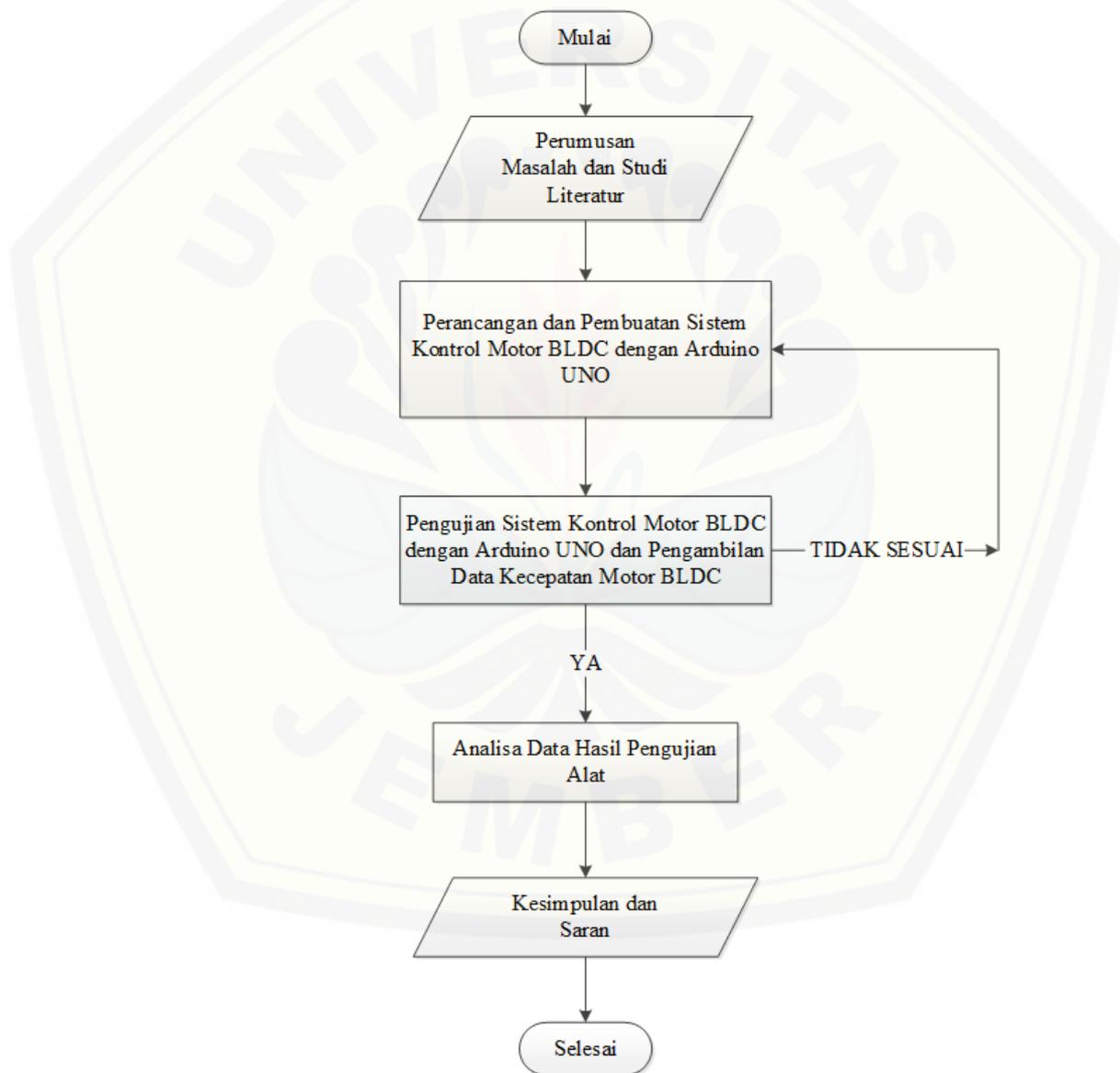
Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut

- a. AVO Meter
- b. Osiloskop
- c. Tachometer
- d. *Power Supply*
- e. Arduino - UNO
- f. Transistor Mosfet IRF540N
- g. *Terminal Block*
- h. PCB polos

- i. *Header Male*
- j. *Bearing*
- k. Kabel pelangi

3.3 Tahapan Penelitian

Adapun tahap-tahap dalam penelitian dan penyusunan laporan ini secara keseluruhan dapat dinyatakan dalam diagram alir sebagaimana terlihat dalam gambar 3.1 berikut ini



Gambar 3.1 Diagram alir Penelitian

Tahapan pada penelitian yang dilakukan pada perancangan, pembuatan, dan pengujian sistem kontrol motor *brushless direct current* konstruksi *axial flux* celah udara tunggal menggunakan Arduino – UNO adalah sebagai berikut :

1. Perumusan masalah dan studi literatur

Pada tahap ini dilakukan pencarian informasi yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan. Pencarian informasi didasarkan pada topik yang diangkat dalam penelitian agar menjadi acuan yang sesuai untuk memperoleh hasil penelitian yang diharapkan. Setelah itu dilakukan perumusan masalah yang sesuai dengan topik penelitian.

2. Perancangan dan pembuatan sistem kontrol motor

Pada tahap ini dilakukan perancangan dan pembuatan sistem kontrol motor *brushless direct current* yang menggunakan Arduino - UNO untuk dapat menggerakkan motor *brushless direct current* konstruksi *axial flux* celah udara tunggal tersebut.

3. Pengujian sistem kontrol Arduino UNO pada motor *brushless direct current* konstruksi *axial flux* celah udara tunggal

Tahap ini adalah pengujian sistem kontrol motor yang telah dibuat dengan menggunakan nilai frekuensi dan *duty cycle* yang berbeda beda. AVO meter digunakan untuk mengukur tegangan dan arus masukan ke sistem kontrol. Untuk mengukur kecepatan motor menggunakan *tachometer*. Penggunaan osiloskop adalah untuk melihat frekuensi masukan pada sistem kontrol Arduino – UNO apakah sesuai dengan yang sudah ditampilkan pada *software* Arduino yang ada pada laptop.

4. Analisis hasil

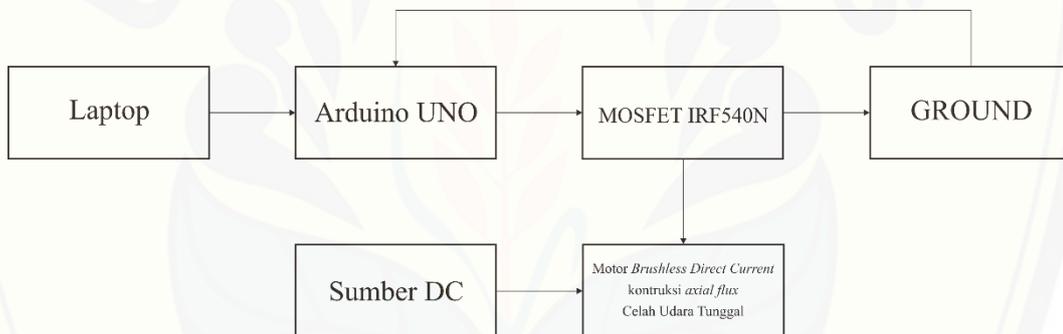
Setelah melakukan pengujian terhadap alat yang dibuat dan diperoleh data yang dibutuhkan maka selanjutnya adalah tahap analisa hasil dari pengujian alat tersebut. Analisa tersebut berfungsi untuk mengetahui karakteristik sistem kontrol motor *brushless direct current* konstruksi *axial flux* celah udara tunggal menggunakan Arduino UNO tersebut.

5. Penarikan kesimpulan dan saran

Setelah menganalisa data dan pembuatan laporan dilakukan kemudian dapat ditarik beberapa kesimpulan yang menyangkut kinerja dari alat yang dibuat dan memberikan saran yang dimaksudkan untuk memperbaiki kekurangan yang ada, kemungkinan pengembangan, serta penyempurnaan alat pada penelitian selanjutnya.

3.4 Diagram Perancangan Sistem Kontrol

Rancang bangun sistem kontrol motor *brushless direct current* konstruksi *axial flux* celah udara tunggal yaitu terdiri dari sebuah rangkaian MOSFET IRF540N dengan Arduino – UNO. Blok diagram dari rancangan sistem kontrol tersebut terdapat pada gambar 3.2.

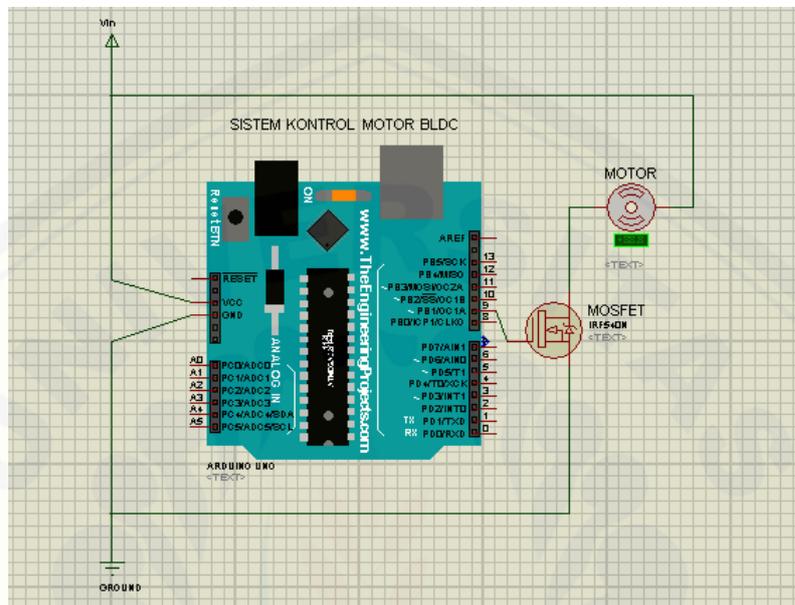


Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem

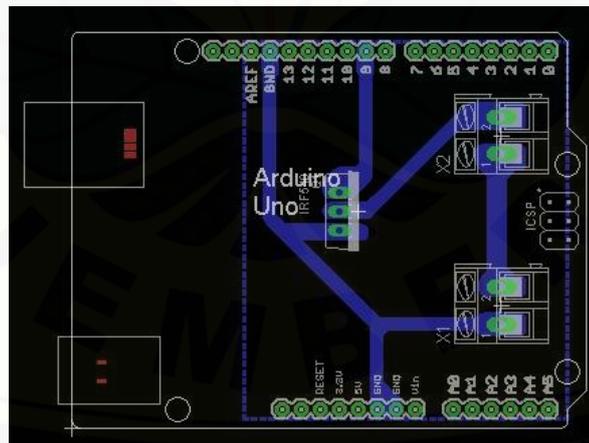
Sumber tegangan yang digunakan pada motor searah tanpa sikat ini adalah menggunakan sumber DC yang berasal dari *power supply*. Untuk tegangan keluaran dari sumber dibuat tetap yaitu 13 V. Terdapat rangkaian sistem kontrol motor yang menggunakan Arduino UNO untuk mengatur nilai frekuensi dan *duty cycle* untuk menggerakkan motor. Pada saat menjalankan motor terlebih dahulu mengatur nilai frekuensi dan *duty cycle* yang terdapat pada *program* Arduino UNO pada laptop sesuai dengan parameter pengujian yang sudah ditentukan. Pada pengujian alat ini bertujuan untuk mendapatkan data dari hasil percobaan yaitu kecepatan motor yang dipengaruhi oleh frekuensi.

3.5 Perancangan Sistem Kontrol Motor

Pada perancangan sistem kontrol motor, komponen yang digunakan diantaranya adalah Arduino – UNO, MOSFET IRF540N, *header male*, dan *terminal block* yang dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 3.3 Rangkaian sistem kontrol menggunakan Arduino - UNO



Gambar 3.4 Skema rangkaian sistem kontrol menggunakan Arduino - UNO

Pada rangkaian sistem kontrol ini Mosfet IRF540N memiliki 3 kaki, yang masing-masing adalah *Gate*, *Source* dan *Ground*. Tegangan tetap 13V langsung masuk ke *input* motor. Kemudian program yang ada pada Arduino – UNO

diteruskan melalui pin 9 yang terhubung dengan gate Mosfet IRF540N. Mosfet ini berfungsi sama seperti *switch* yang bekerja saat kita tekan. Pada hal ini mosfet akan bekerja saat rotor motor kita putar secara manual kemudian mengaktifkan motor tersebut sehingga nantinya kerja motor akan diatur sesuai dengan program arduino yang sudah dibuat. Dalam hal ini kaki *drain* dari mosfet lah yang terhubung pada *input* motor yang bekerja sebagai kontrol dari motor tersebut. Kemudian untuk kaki *source* terhubung pada *ground* yang ada pada Arduino – UNO tersebut.

3.5.1 Arduino Uno

Arduino UNO adalah sebuah *board* mikrokontroler yang didasarkan pada ATmega328. Arduino UNO mempunyai 14 pin *digital input/output* (6 di antaranya dapat digunakan sebagai output PWM), 6 input analog, sebuah osilator Kristal 16 MHz, sebuah koneksi USB, sebuah *power jack*, sebuah ICSP *header*, dan sebuah tombol *reset*. Arduino UNO memuat semua yang dibutuhkan untuk menunjang mikrokontroler, mudah menghubungkannya ke sebuah computer dengan sebuah kabel USB atau mensuplainya dengan sebuah adaptor AC ke DC atau menggunakan baterai untuk memulainya. (Andi A & Oka H, 2013)

Penggunaan Arduino sebagai kontrol motor bldc ini adalah dengan memasukkan program yang nantinya dapat mengatur masukan frekuensi sesuai dengan yang dibutuhkan ke motor bldc tersebut.

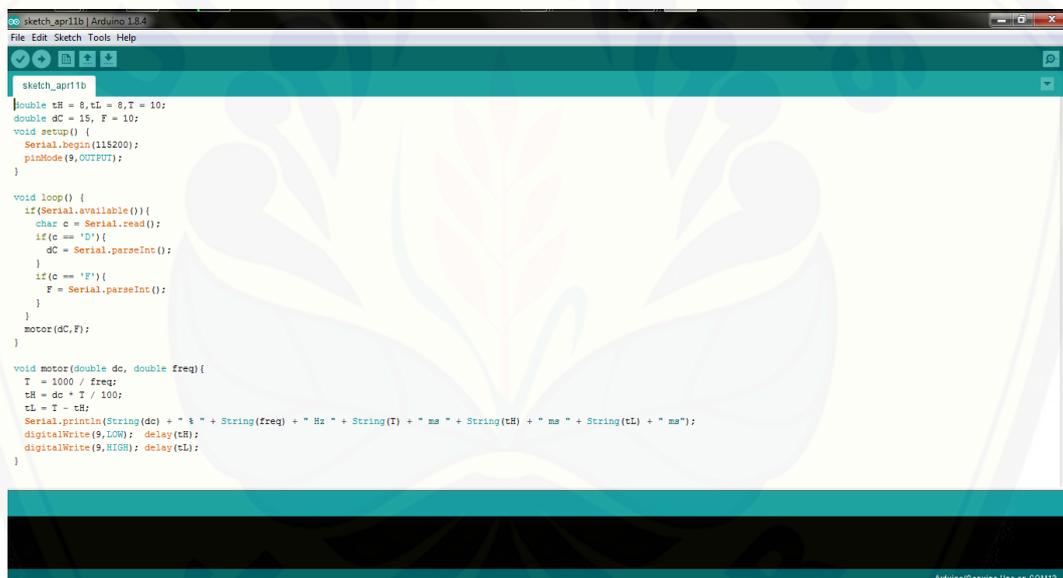


Gambar 3.5 Arduino – UNO

Pada desain sistem kontrol menggunakan Arduino - UNO ini, Arduino - UNO berfungsi sebagai *timer* (pewaktu) dan *pulse* generator (pembangkit pulsa),

selain itu juga dapat digunakan untuk mengatur *Time High* dan *Time Low*. Arduino UNO akan mengatur nilai masukan frekuensi dan *duty cycle* dengan berdasarkan program yang telah dibuat sebelumnya, kemudian frekuensi dan *duty cycle* yang telah diatur tersebut akan langsung dihubungkan ke motor *brushless direct current* konstruksi *axial flux* celah udara tunggal. Dengan desain dan komponen yang digunakan pada sistem kontrol tersebut, diharapkan kinerja motor motor *brushless direct current* satu fasa konstruksi *axial flux* celah udara tunggal yang diuji dapat maksimal.

Program yang digunakan pada sistem kontrol menggunakan Arduino – UNO ini dapat dilihat pada gambar 3.6 berikut ini



```
sketch_apr11b | Arduino 1.8.4
File Edit Sketch Tools Help

sketch_apr11b

double tH = 8, tL = 8, T = 10;
double dC = 15, F = 10;
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  pinMode(9, OUTPUT);
}

void loop() {
  if(Serial.available()){
    char c = Serial.read();
    if(c == 'D'){
      dC = Serial.parseInt();
    }
    if(c == 'F'){
      F = Serial.parseInt();
    }
  }
  motor(dC, F);
}

void motor(double dc, double freq){
  T = 1000 / freq;
  tH = dc * T / 100;
  tL = T - tH;
  Serial.println(String(dc) + " % " + String(freq) + " Hz " + String(T) + " ms " + String(tH) + " ms " + String(tL) + " ms");
  digitalWrite(9, LOW); delay(tH);
  digitalWrite(9, HIGH); delay(tL);
}
```

Gambar 3.6 Program sistem kontrol menggunakan Arduino - UNO

3.6 Pengujian Pada Sistem Kontrol Motor

3.6.1 Pemberian Tegangan Tetap

Untuk pengujian dan pengambilan data dari penelitian ini digunakan besar tegangan masukan untuk sistem kontrol Arduino - UNO untuk motor *brushless direct current* satu fasa konstruksi *axial flux* celah udara tunggal yang bernilai tetap, yaitu sebesar 13 V. Tegangan tetap tersebut bersumber dari *power supply* (DC) yang dihubungkan pada sistem kontrol motor tersebut yang nantinya

tegangan tersebut diubah menjadi sinyal-sinyal yang dapat membuat motor dapat bekerja.

3.6.2 Pengaturan Variasi Nilai Frekuensi Dan *Duty Cycle* Pada Sistem Kontrol

Untuk pengaturan nilai variasi dari frekuensi dan *duty cycle* dilakukan pada program Arduino yang sudah dibuat. Pengaturan ini lebih mudah dibandingkan menggunakan sistem kontrol jenis lain karena mengubah nilai frekuensi dan *duty cycle* nya dapat dilakukan langsung pada program Arduino tersebut. Untuk nilai frekuensi dan *duty cycle* yang digunakan berkisar antara frekuensi 10 Hz sampai 35 Hz dan *duty cycle* 15% sampai 40% pada bagian ini untuk mengatur konversi dari tegangan menjadi sinyal masukan terhadap motor dengan mengatur besar frekuensi dan *duty cycle* agar motor dapat bekerja.

3.6.3 Perhitungan Kecepatan Motor

Untuk mendapatkan hasil dari kecepatan motor yang sedang berputar dengan nilai frekuensi yang sudah diketahui pada osiloskop dapat digunakan persamaan sebagai berikut.

$$N_s = \frac{120 f}{P} \dots\dots\dots (3.1)$$

Dimana

N_s = Kecepatan sinkron motor (RPM)

F = Frekuensi (Hz)

P = Jumlah kutub motor

BAB 5. PENUTUP

Dari hasil penelitian tentang “ Rancang Bangun Sistem Kontrol Motor *Brushless Direct Current* Kontruksi *Axial Flux* Celah Udara Tunggal Menggunakan Arduino – UNO” dapat disimpulkan dan saran dari penulis yang dapat diberikan untuk penelitian lain di masa yang akan datang adalah sebagai berikut.

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian tentang “ Rancang Bangun Sistem Kontrol Motor *Brushless Direct Current* Kontruksi *Axial Flux* Celah Udara Tunggal Menggunakan Arduino – UNO” dapat disimpulkan sebagai berikut;

1. Perancangan sistem kontrol motor *brushless direct current* (bldc) kontruksi *axial flux* celah udara tunggal menggunakan Arduino – UNO berupa rangkaian satu buah MOSFET IRF540N yang kaki *gate* terhubung dengan pin 9 Arduino – UNO, kaki *drain* terhubung pada kutub positif motor bldc tersebut dan kaki *drain* terhubung pada *ground* yang ada pada Arduino – UNO. Rangkaian tersebut dihubungkan pada sumber tegangan tetap DC sebesar 13 V.
2. Perubahan nilai frekuensi mempengaruhi kinerja dari motor *brushless direct current* kontruksi *axial flux* celah udara tunggal karena jika semakin besar nilai frekuensi maka kecepatan motor juga akan semakin besar, sedangkan perubahan nilai *duty cycle* pada pengujian pertama dan nilai *duty cycle* yang tetap pada pengujian kedua tidak mempengaruhi kecepatan dari motor tersebut. Hal ini seperti pada data pengujian pertama yang diperoleh yaitu saat nilai frekuensi 15 Hz dan *duty cylce* 20% maka kecepatan motor sebesar 149,3 Rpm dan saat nilai frekuensi 15 Hz dan *duty cylce* 15% maka kecepatan motor sebesar 151,9 Rpm. Pada saat frekuensi 20 Hz dan *duty cylce* 25% maka kecepatan motor sebesar 198,7 Rpm dan saat nilai frekuensi 20 Hz dan *duty cylce* 15% maka kecepatan motor sebesar 199,5 Rpm

5.2 Saran

Dari hasil penelitian tentang “ Rancang Bangun Sistem Kontrol Motor *Brushless Direct Current* Kontruksi *Axial Flux* Celah Udara Tunggal Menggunakan Arduino – UNO” terdapat saran dari penulis yang dapat diberikan untuk penelitian lain di masa yang akan datang adalah sebagai berikut;

1. Pada penelitian ini terdapat kekurangan seperti pada sistem kontrol motor yang hanya menggunakan satu buah MOSFET IRF540N pada rangkaian sebagai pengontrol motor tersebut, diharapkan pada penelitian selanjutnya dikembangkan rangkaian yang lebih baik lagi.
2. Diharapkan pada penelitian selanjutnya agar dapat memperbaiki sistem kontrol ini agar motor dapat melakukan *starting* tanpa alat bantu agar bisa berputar.

DAFTAR PUSTAKA

Adriansyah, Andi & Oka Hidyatama. 2013. *Rancang Bangun Prototipe Elevator Menggunakan Microcontroller Arduino Atmega 328p*. Jakarta : Jurnal Elektronika.

Ahmad Fachrudin Istananda, Ir. Rusdhianto Effendie A.K. M.T., dan Andri Ashfahani S.T., M.T., M.Sc. 2016. *Perancangan dan Implementasi Sistem Pengaturan Kecepatan Motor Arus Searah Tanpa Sikat Menggunakan Metode PID-Robust*. JURNAL TEKNIK ITS Vol. 5, No. 2, (2016) ISSN: 2337-3539 (2301-9271 Print).

Anthony, Zuriman. 2016. *Pengaruh Perubahan Frekuensi Dalam Sistem Pengendalian Kecepatan Motor Induksi 3-Fasa Terhadap Efisiensi Dan Arus Kumparan Motor*. Institut Teknologi Padang. Padang.

Atmaja, S. D. 2018. RANCANG BANGUN MOTOR SEARAH TANPA SIKAT SATU FASA (BLDC) KONTRUKSI AXIAL FLUX (PANCAKE) DENGAN CELAH UDARA TUNGGAL. *Skripsi*. Fakultas Teknik: Universitas Jember.

Intradewa, E. 2013. Brushless Motor DC. Jurnal Elektromagnetika

Kurniawan, A. R. 2016. *Rancang Bangun Motor Searah Tanpa Sikat Satu Fasa*. Universitas Jember : Jember.

Likiliwatul, yakob. 2014. *Mesin – Mesin Listrik*. Deepublish. Yogyakarta

Mahadian Dewangga, Bambang Sujanarko & Satriyo Budi Utomo. 2014. *Desain Sistem Kontrol Kecepatan Motor Bldc Berbasis Programmable Array Logic Dengan Metode Six Step Commutation*. Jember : Artikel Penelitian Mahasiswa

- Mardiansyah, Riki. 2012. *Potensi Medan Elektromagnetik sebagai sumber pembangkit tenaga listrik. Skripsi*. Depok. Universitas Indonesia.
- Pamungkas, T V. 2018. Pengaruh Jarak Optimum Antara Magnet Dengan Kutub Pada Motor *Brushless Direct Current Axial Flux*. Universitas Jember. Jember
- Pramono, Putra, & Warindi. 2016. *Perancangan Motor Listrik Bldc 10 Kw Untuk Sepeda Motor Listrik*. Universitas Islam Indonesia Yogyakarta. Yogyakarta.
- Prayitno, Dian Agus. 2018. ANALISA DRIVER MOTOR BLDC KONTRUKSI *AXIAL FLUX*. *Skripsi*. Fakultas Teknik: Universitas Jember
- Rencana, H., Sakti, P., & Yuniarto, M. N. 2014. Perancangan dan Uji Performa *Axial Flux Permanent Magnet Coreless Brushless Direct Curent (DC) Motor, 1(1)*, 1–7.
- Saputra, Dwi Aji. 2016. PENGARUH KECEPATAN PUTAR TERHADAP TEGANGAN DAN FREKUENSI GENERATOR INDUKSI 1 FASE 6 KUTUB. *Skripsi*. Fakultas : Universitas Muhammadiyah Surakarta
- Wahono, Tri & Tole Sutikno. 2016. *Skema Pengendali Motor Bldc Tanpa Sensor Posisi Rotor Dengan Metode Deteksi Back Emf Berbasis Mikrokontroler Arduino*. Yogyakarta : Jurnal Ilmu Teknik Elektro Komputer dan Informatika (JITEKI), Vol. 2, No. 2.
- Wengi, Sakti dan Yuniarto, Nur M. 2014. Perancangan dan Uji Performa *Axial Flux Magnet Coreless Brushless Direct (DC) Motor*. Jurnal Teknik POMITS, Vol 1, No 1.

Xia, Chang-liang.(2012). *Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives And Controls*. China. John Wiley & Sons Singapore.



LAMPIRAN**A. Perhitungan Kecepatan Pada Motor****1. Perhitungan 1 kecepatan motor****a. Pengujian pada frekuensi 10 Hz**

❖ Perhitungan kecepatan (Ns)

$$\begin{aligned} N_s &= \frac{120 \times F}{P} \\ &= \frac{120 \times 10}{12} \\ &= 100 \text{ Rpm} \end{aligned}$$

❖ Perhitungan error persen kecepatan motor

$$\begin{aligned} \text{Error persen} &= \frac{|\text{Data Perhitungan} - \text{Data Percobaan}|}{\text{Data Perhitungan}} \times 100\% \\ &= \frac{|100 - 98,4|}{100} \times 100\% \\ &= 1,6\% \end{aligned}$$

b. Pengujian pada frekuensi 15 Hz

❖ Perhitungan kecepatan (Ns)

$$\begin{aligned} N_s &= \frac{120 \times F}{P} \\ &= \frac{120 \times 15}{12} \\ &= 150 \text{ Rpm} \end{aligned}$$

❖ Perhitungan error persen kecepatan motor

$$\begin{aligned} \text{Error persen} &= \frac{|\text{Data Perhitungan} - \text{Data Percobaan}|}{\text{Data Perhitungan}} \times 100\% \\ &= \frac{|150 - 149,3|}{150} \times 100\% \\ &= 0,46\% \end{aligned}$$

c. Pengujian pada frekuensi 20 Hz

❖ Perhitungan kecepatan (Ns)

$$\begin{aligned} N_s &= \frac{120 \times F}{P} \\ &= \frac{120 \times 20}{12} \\ &= 200 \text{ Rpm} \end{aligned}$$

❖ Perhitungan error persen kecepatan motor

$$\begin{aligned} \text{Error persen} &= \frac{|\text{Data Perhitungan} - \text{Data Percobaan}|}{\text{Data Perhitungan}} \times 100\% \\ &= \frac{|200 - 198,7|}{200} \times 100\% \\ &= 0,65 \% \end{aligned}$$

d. Pengujian pada frekuensi 25 Hz

❖ Perhitungan kecepatan (Ns)

$$\begin{aligned} N_s &= \frac{120 \times F}{P} \\ &= \frac{120 \times 25}{12} \\ &= 250 \text{ Rpm} \end{aligned}$$

❖ Perhitungan error persen kecepatan motor

$$\begin{aligned} \text{Error persen} &= \frac{|\text{Data Perhitungan} - \text{Data Percobaan}|}{\text{Data Perhitungan}} \times 100\% \\ &= \frac{|250 - 243,8|}{250} \times 100\% \\ &= 2,48 \% \end{aligned}$$

e. Pengujian pada frekuensi 30 Hz

❖ Perhitungan kecepatan (Ns)

$$\begin{aligned} N_s &= \frac{120 \times F}{P} \\ &= \frac{120 \times 30}{12} \\ &= 300 \text{ Rpm} \end{aligned}$$

❖ Perhitungan error persen kecepatan motor

$$\begin{aligned} \text{Error persen} &= \frac{|\text{Data Perhitungan} - \text{Data Percobaan}|}{\text{Data Perhitungan}} \times 100\% \\ &= \frac{|300 - 301.3|}{300} \times 100\% \\ &= 0,43 \% \end{aligned}$$

f. Pengujian pada frekuensi 35 Hz

❖ Perhitungan kecepatan (Ns)

$$\begin{aligned} N_s &= \frac{120 \times F}{P} \\ &= \frac{120 \times 35}{12} \\ &= 350 \text{ Rpm} \end{aligned}$$

❖ Perhitungan error persen kecepatan motor

$$\begin{aligned} \text{Error persen} &= \frac{|\text{Data Perhitungan} - \text{Data Percobaan}|}{\text{Data Perhitungan}} \times 100\% \\ &= \frac{|350 - 343,5|}{350} \times 100\% \\ &= 1,86 \% \end{aligned}$$

2. Perhitungan 2 kecepatan motor

g. Pengujian pada frekuensi 10 Hz

❖ Perhitungan kecepatan (Ns)

$$\begin{aligned} N_s &= \frac{120 \times F}{P} \\ &= \frac{120 \times 10}{12} \\ &= 100 \text{ Rpm} \end{aligned}$$

❖ Perhitungan error persen kecepatan motor

$$\begin{aligned} \text{Error persen} &= \frac{|\text{Data Perhitungan} - \text{Data Percobaan}|}{\text{Data Perhitungan}} \times 100\% \\ &= \frac{|100 - 99,5|}{100} \times 100\% \\ &= 0,5\% \end{aligned}$$

h. Pengujian pada frekuensi 15 Hz

❖ Perhitungan kecepatan (Ns)

$$\begin{aligned} N_s &= \frac{120 \times F}{P} \\ &= \frac{120 \times 15}{12} \\ &= 150 \text{ Rpm} \end{aligned}$$

❖ Perhitungan error persen kecepatan motor

$$\begin{aligned} \text{Error persen} &= \frac{|\text{Data Perhitungan} - \text{Data Percobaan}|}{\text{Data Perhitungan}} \times 100\% \\ &= \frac{|150 - 151,9|}{150} \times 100\% \\ &= 1,27\% \end{aligned}$$

i. Pengujian pada frekuensi 20 Hz

❖ Perhitungan kecepatan (Ns)

$$\begin{aligned} N_s &= \frac{120 \times F}{P} \\ &= \frac{120 \times 20}{12} \\ &= 200 \text{ Rpm} \end{aligned}$$

❖ Perhitungan error persen kecepatan motor

$$\begin{aligned} \text{Error persen} &= \frac{|\text{Data Perhitungan} - \text{Data Percobaan}|}{\text{Data Perhitungan}} \times 100\% \\ &= \frac{|200 - 199,3|}{200} \times 100\% \\ &= 0,35 \% \end{aligned}$$

j. Pengujian pada frekuensi 25 Hz

❖ Perhitungan kecepatan (Ns)

$$\begin{aligned} N_s &= \frac{120 \times F}{P} \\ &= \frac{120 \times 25}{12} \\ &= 250 \text{ Rpm} \end{aligned}$$

❖ Perhitungan error persen kecepatan motor

$$\begin{aligned} \text{Error persen} &= \frac{|\text{Data Perhitungan} - \text{Data Percobaan}|}{\text{Data Perhitungan}} \times 100\% \\ &= \frac{|250 - 242,3|}{250} \times 100\% \\ &= 3,08 \% \end{aligned}$$

k. Pengujian pada frekuensi 30 Hz

❖ Perhitungan kecepatan (Ns)

$$\begin{aligned} N_s &= \frac{120 \times F}{P} \\ &= \frac{120 \times 30}{12} \\ &= 300 \text{ Rpm} \end{aligned}$$

❖ Perhitungan error persen kecepatan motor

$$\begin{aligned} \text{Error persen} &= \frac{|\text{Data Perhitungan} - \text{Data Percobaan}|}{\text{Data Perhitungan}} \times 100\% \\ &= \frac{|300 - 300,2|}{300} \times 100\% \\ &= 0,06\% \end{aligned}$$

l. Pengujian pada frekuensi 35 Hz

❖ Perhitungan kecepatan (Ns)

$$\begin{aligned} N_s &= \frac{120 \times F}{P} \\ &= \frac{120 \times 35}{12} \\ &= 350 \text{ Rpm} \end{aligned}$$

❖ Perhitungan error persen kecepatan motor

$$\begin{aligned} \text{Error persen} &= \frac{|\text{Data Perhitungan} - \text{Data Percobaan}|}{\text{Data Perhitungan}} \times 100\% \\ &= \frac{|350 - 343,9|}{350} \times 100\% \\ &= 1,74\% \end{aligned}$$

2. Gambar Pengujian 1 Kecepatan Motor



Gambar 1. Hasil pengujian kecepatan motor *brushless direct current* (bldc) menggunakan Tachometer pada frekuensi 10 Hz



Gambar 2. Hasil pengujian kecepatan motor *brushless direct current* (bldc) menggunakan Tachometer pada frekuensi 15 Hz



Gambar 3. Hasil pengujian kecepatan motor *brushless direct current* (bldc) menggunakan Tachometer pada frekuensi 20 Hz



Gambar 4. Hasil pengujian kecepatan motor *brushless direct current* (bldc) menggunakan Tachometer pada frekuensi 25 Hz



Gambar 5. Hasil pengujian kecepatan motor *brushless direct current* (bldc) menggunakan Tachometer pada frekuensi 30 Hz



Gambar 6. Hasil pengujian kecepatan motor *brushless direct current* (bldc) menggunakan Tachometer pada frekuensi 35 Hz

3. Gambar Pengujian 2 Kecepatan Motor



Gambar 7. Hasil pengujian kecepatan motor *brushless direct current* (bldc) menggunakan Tachometer pada frekuensi 10 Hz



Gambar 8. Hasil pengujian kecepatan motor *brushless direct current* (bldc) menggunakan Tachometer pada frekuensi 15 Hz



Gambar 9. Hasil pengujian kecepatan motor *brushless direct current* (bldc) menggunakan Tachometer pada frekuensi 20 Hz



Gambar 10. Hasil pengujian kecepatan motor *brushless direct current* (bldc) menggunakan Tachometer pada frekuensi 25 Hz



Gambar 11. Hasil pengujian kecepatan motor *brushless direct current* (bldc) menggunakan Tachometer pada frekuensi 30 Hz



Gambar 12. Hasil pengujian kecepatan motor *brushless direct current* (bldc) menggunakan Tachometer pada frekuensi 35 Hz

4. Gambar Pengujian Nilai Frekuensi

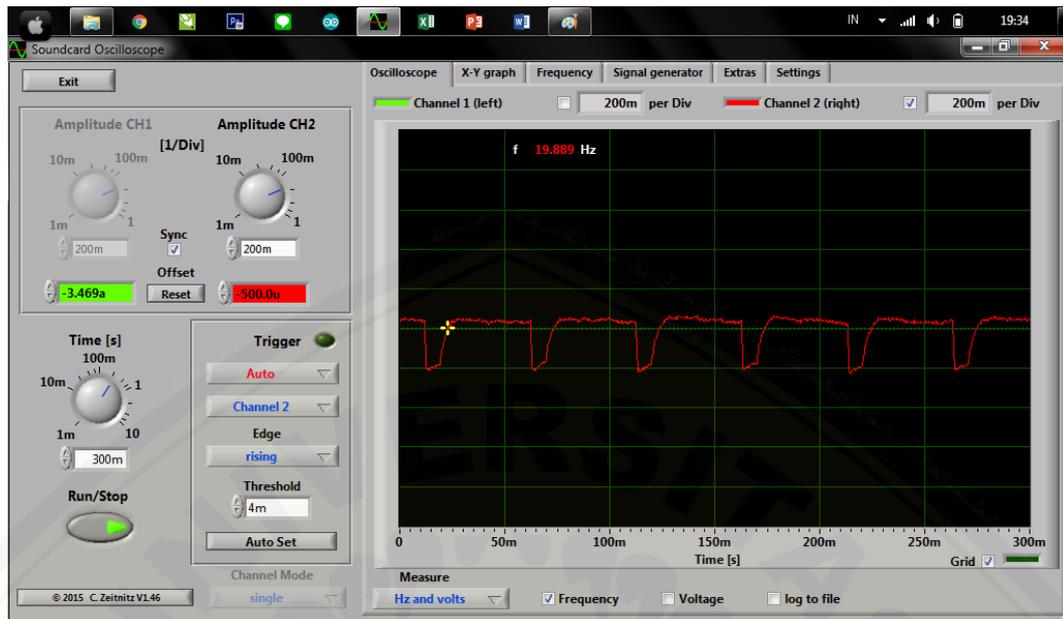
1. Pengujian Nilai Frekuensi Menggunakan *Oscilloscope*



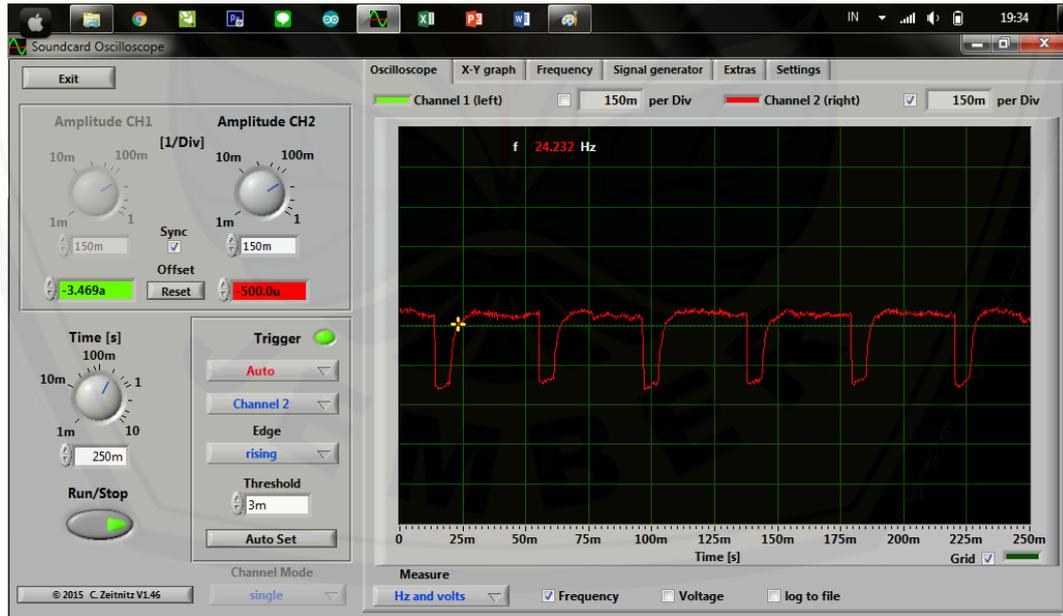
Gambar 13. Hasil nilai frekuensi motor *brushless direct current* (bldc) menggunakan *oscilloscope* pada frekuensi 10 Hz



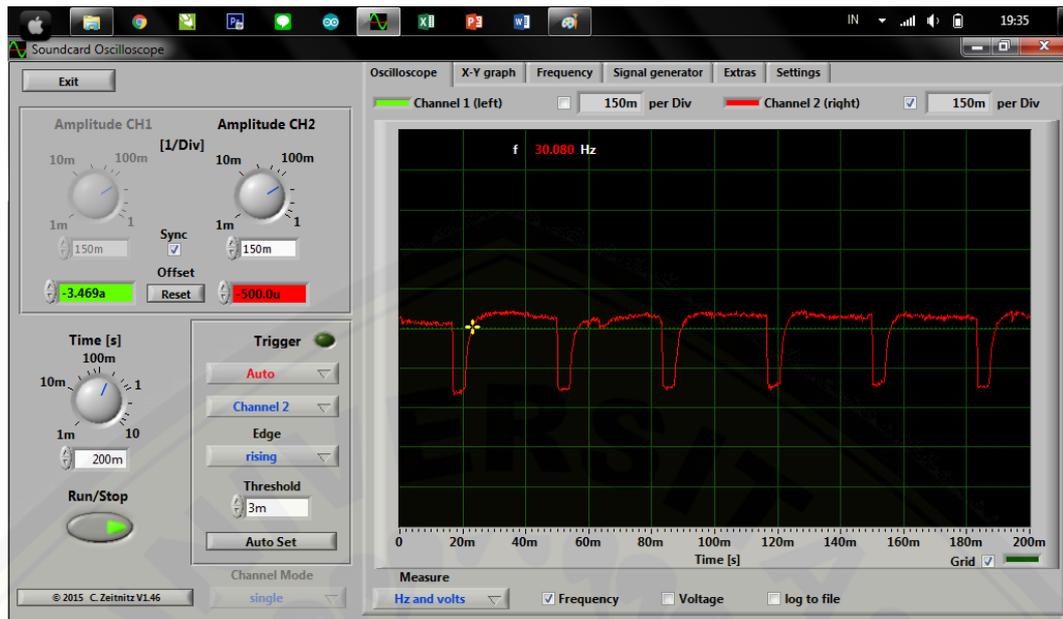
Gambar 14. Hasil nilai frekuensi motor *brushless direct current* (bldc) menggunakan *oscilloscope* pada frekuensi 15 Hz



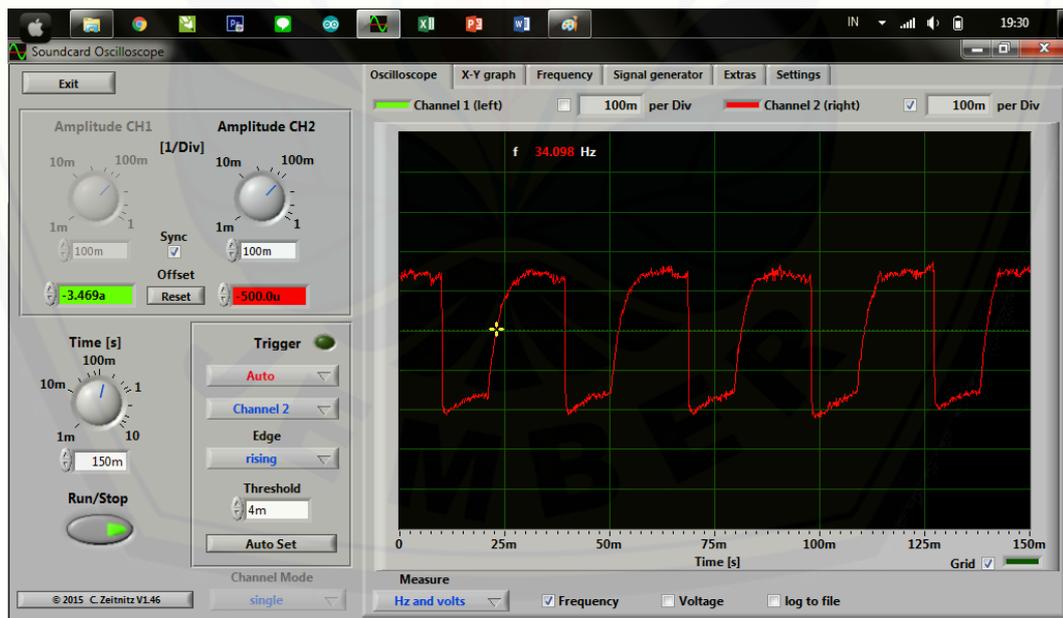
Gambar 15. Hasil nilai frekuensi motor *brushless direct current* (bldc) menggunakan *oscilloscope* pada frekuensi 20 Hz



Gambar 16. Hasil nilai frekuensi motor *brushless direct current* (bldc) menggunakan *oscilloscope* pada frekuensi 25 Hz



Gambar 17. Hasil nilai frekuensi motor *brushless direct current* (bldc) menggunakan *oscilloscope* pada frekuensi 30 Hz



Gambar 18. Hasil nilai frekuensi motor *brushless direct current* (bldc) menggunakan *oscilloscope* pada frekuensi 35 Hz