



**Analisis Gelombang Frekuensi Pada Motor BLDC menggunakan Arduino
UNO Konstruksi *Axial Flux***

SKRIPSI

Oleh:

**Mohammad Nurudin
NIM 161910201120**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2018**



**Analisis Gelombang Frekuensi Pada Motor BLDC menggunakan Arduino
UNO Konstruksi *Axial Flux***

SKRIPSI

**diajukan guna melengkapi skripsi dan memenuhi salah satu syarat untuk
menyelesaikan Program Studi S1 Teknik Elektro
dan mencapai gelar Sarjana Teknik**

Oleh:

**Mohammad Nurudin
NIM 161910201120**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2018**

PERSEMBAHAN

Tugas Akhir ini merupakan sebuah awal, langkah kecil menuju lompatan besar guna menggapai kesuksesan yang lebih baik lagi. Untuk itu saya ucapkan rasa syukur dan terima kasih sebesar-besarnya kepada...

Allah SWT, dengan segala Keagungan dan Keajaiban-Nya yang senantiasa mendengar do'a ku, menuntunku dari dari kegelapan, serta senantiasa menaungiku dengan rahmat dan hidayah-Nya dan junjunganku Nabi Muhammad SAW yang telah menjadi penerang di dunia dan suri tauladan bagi kita semua;

Ibunda Siti Muhayatun, Ayahanda Mistari, dan Keluarga Besar ABD Majid terima kasih atas segala kasih sayang, dukungan, semangat, dan doa selama ini;

Dosen Pembimbing Tugas Akhir Bapak Ir. Widyono Hadi, M.T. dan Bapak Dr. Triwahju Hardianto, ST., MT. terimakasih atas ketekunan dan kesabarannya dalam membimbing saya;

Seluruh teman dan sahabat seperjuangan Teknik Elektro angkatan 2013, kalian sebagai tempat berbagi suka dan duka yang tidak akan terlupakan. Aku menjadikan kalian semua bagian dari diriku dan aku sangat menyayangi kalian semua;

Buat semua teman-teman Jurusan Elektro angkatan 2014, 2015, dan 2016. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan yang ikut dalam membantu dan berdoa;

Guru-guruku sejak TK sampai Perguruan Tinggi yang terhormat, terima kasih telah memberikan ilmu dan mendidik dengan penuh kesabaran;

Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember.

MOTTO

"Cobalah dulu baru cerita. Pahami dulu baru menjawab. Pikirlah dulu baru berkata. Dengarlah dulu baru berpendapat. Bekerjalah dulu baru berharap."

(Socrates)

"melihat pekerjaan sendiri lebih melelahkan dari pada mengerjakannya"

(Mohammad Nurudin)

"Semakin berat kehidupan yang dialami, semakin berat juga tanggung jawabnya"

(Mohammad Nurudin)

"berusaha terus menerus tanpa mengeluh, pasti memperoleh hasil"

(Mohammad Nurudin)

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Mohammad Nurudin

NIM : 161910201120

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul “Analisis Gelombang Frekuensi Pada Motor BLDC menggunakan Arduino UNO Konstruksi *Axial Flux* ” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya dan belum pernah diajukan pada institusi mana pun serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab 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, 16 Juli 2018

Yang menyatakan,

Mohammad Nurudin

NIM 161910201120

SKRIPSI

**Analisis Gelombang Frekuensi Pada Motor BLDC menggunakan Arduino
UNO Konstruksi Axial Flux**

Oleh

Mohammad Nurudin

NIM 161910201120

Pembimbing :

Dosen Pembimbing Utama : Ir. Widyono Hadi, MT.

Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Triwahju Hardianto, ST., MT.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Analisis Gelombang Frekuensi Pada Motor BLDC menggunakan Arduino UNO Konstruksi *Axial Flux* ” karya Mohammad Nurudin NIM: 161910201120 telah diuji dan disahkan oleh Fakultas Teknik Elektro Universitas Jember pada:

Hari : Senin

Tanggal : 16 Juli 2018

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji:

Ketua,

Anggota I,

Ir. Widyono Hadi, M.T.

NIP 19610414 198902 1 001

Dr. Triwahju Hardianto, ST., MT

NIP 197008261997021001

Anggota II,

Anggota III,

Dr. Bambang Sri Kaloko, ST.,MT

NIP 197104022003121001

Ali Rizal Chaidir, S.T., M.T

NRP 760015754

Mengesahkan
Dekan,

Dr.Ir. Entin Hidayah M.U.M

NIP. 19661215 199503 2 001

RINGKASAN

Analisis Gelombang Frekuensi Pada Motor BLDC menggunakan Arduino UNO Konstruksi Axial Flux Mohammad Nurudin, 161910201120; 2018; halaman; Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Dalam jaman yang modern ini, masyarakat sangat membutuhkan listrik sebagai sumber energi. Dimana listrik ini merupakan energi sekunder yang paling populer. Motor listrik ini juga merupakan sebuah alat pengubah energi listrik menjadi energi mekanis. Energi mekanis ini sendiri sebagai penggerak yang digunakan untuk berbagai macam keperluan. Perkembangan motor listrik ini sendiri sangat pesat di dunia ini akibat terjadinya pemanasan global dan menipisnya bahan bakar minyak dunia. Dengan berkembangnya teknologi pada saat ini sangat memudahkan kegiatan manusia dalam melakukan kegiatan-kegiatan setiap harinya. Salah satu hasil dari perkembangan teknologi tersebut yaitu motor DC. Motor DC adalah suatu perangkat yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dengan tegangan searah, berbeda dengan motor AC yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dengan tegangan bolak-balik. Motor DC ini memiliki banyak kekurangan dimana kekurangan tersebut seperti membutuhkan perawatan yang ekstra, tidak bisa digunakan dengan kecepatan yang tinggi karena penggunaan sikat (*brush*) dan juga komutator membatasi kecepatannya, dan tidak bisa digunakan untuk aplikasi yang besar. *Brush* pada motor DC ini sangat mudah rusak karena pada saat motor berputar akan timbul *arching* pada *brush* akibat komutasi.

Dengan adanya kekurangan tersebut, maka bertambahnya jaman dan teknologi yang semakin maju maka banyak orang yang mengembangkan berbagai macam cara untuk memperbaiki kekurangan tersebut, dengan cara tanpa menggunakan sikat (*brush*). Hal ini dapat memperbaiki efisiensi dan dapat meningkatkan kecepatan dari motor DC yang awalnya dibatasi oleh adanya sikat (*brush*). Motor yang tanpa menggunakan sikat (*brush*) dikenal dengan nama motor BLDC. Motor BLDC (*Brushless Direct Current*) adalah sebuah mesin listrik berputar, dimana stator merupakan belitan stator tiga fasa seperti motor induksi, dan rotor terdapat magnet permanen dipermukaannya. Motor BLDC setara dengan

motor DC dengan komutator terbalik, dimana magnet berputar sedangkan komutator tetap diam. Dalam motor BLDC, pembalikan polaritas dilakukan oleh transistor *switching* untuk mensinkronkan dengan posisi rotor.

Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian dengan *driver H-bridge*. *Driver* jenis ini menggunakan Arduino UNO. Dengan rangkaian *driver* jenis *H-bridge* diharapkan kekurangan-kekurangan yang ada pada *driver-driver* yang telah digunakan sebelumnya dapat diminimalisir. Dengan menggunakan Arduino UNO diharapkan *driver H-bridge* dapat menahan arus dan tegangan yang lebih besar sehingga kecepatan yang dihasilkan dapat lebih tinggi. Dengan begitu dapat meningkatkan performa atau kinerja dari motor BLDC yang di uji.

Dibedakan dari banyaknya fasa, motor BLDC dapat dibagi menjadi tiga yakni BLDC satu fasa, dua fasa dan tiga fasa. Pada penelitian ini saya akan menggunakan motor BLDC satu fasa dengan enam buah magnet permanen pada rotornya, pada stator menggunakan enam buah kumparan, dengan posisi tiga buah kumparan diatas rotor dan tiga buah kumparan dibawah rotor. Dengan konstruksi tersebut motor BLDC yang di buat memiliki celah ganda.

PRAKATA

Bismillahirrohmanirrohim

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga skripsi yang berjudul ” Analisis Gelombang Frekuensi Pada Motor BLDC menggunakan Arduino UNO Konstruksi *Axial Flux* ” dapat terselesaikan dengan baik. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan pendidikan Strata Satu (S1) pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Terselesaikannya skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu disampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan rizki-Nya serta memberi kelancaran dan kemudahan sehingga terselesaikannya skripsi ini.
2. Nabi Muhammad SAW yang telah membawa kita ke peradaban manusia yang lebih baik.
3. Bapak/Ibu, Keluarga Besar yang telah memberikan dorongan semangat, motivasi, dukungan dan doanya demi terselesaikannya skripsi ini.
4. Ibu Dr. Ir. Entin Hidayah M.U.M selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember.
5. Bapak Dr. Ir. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.
6. Bapak Widya Cahyadi, S.T., M.T. selaku Komisi Bimbingan S1 Teknik Elektro Universitas Jember.
7. Bapak Ir. Widyono Hadi, M.T. selaku Dosen Pembimbing Utama dan Bapak Dr. Triwahju Hardianto, ST., MT selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu dan pikiran serta perhatiannya guna memberikan bimbingan dan pengarahan demi terselesaikannya skripsi ini.
8. Bapak Dr. Bambang Sri Kaloko, ST., MT selaku Dosen Penguji I dan Bapak Ali Rizal Chaidir, S.T., M.T selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan kritik dan saran yang sangat membangun demi penyempurnaan skripsi ini.

9. Bapak Sumardi, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing Akademik (DPA) yang telah memberikan bimbingan dan pengarahannya.
10. Seluruh Dosen yang ada di Fakultas Teknik khususnya Teknik Elektro beserta karyawan.
11. Keluarga besar Teknik Elektro angkatan 2013, 2014, 2015, 2016 terimakasih atas dukungan dan motivasi yang kalian berikan.
12. Semua pihak yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu, terima kasih atas dukungan dan motivasi kalian dalam penyusunan skripsi ini.

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

Jember, 16 Juli 2018

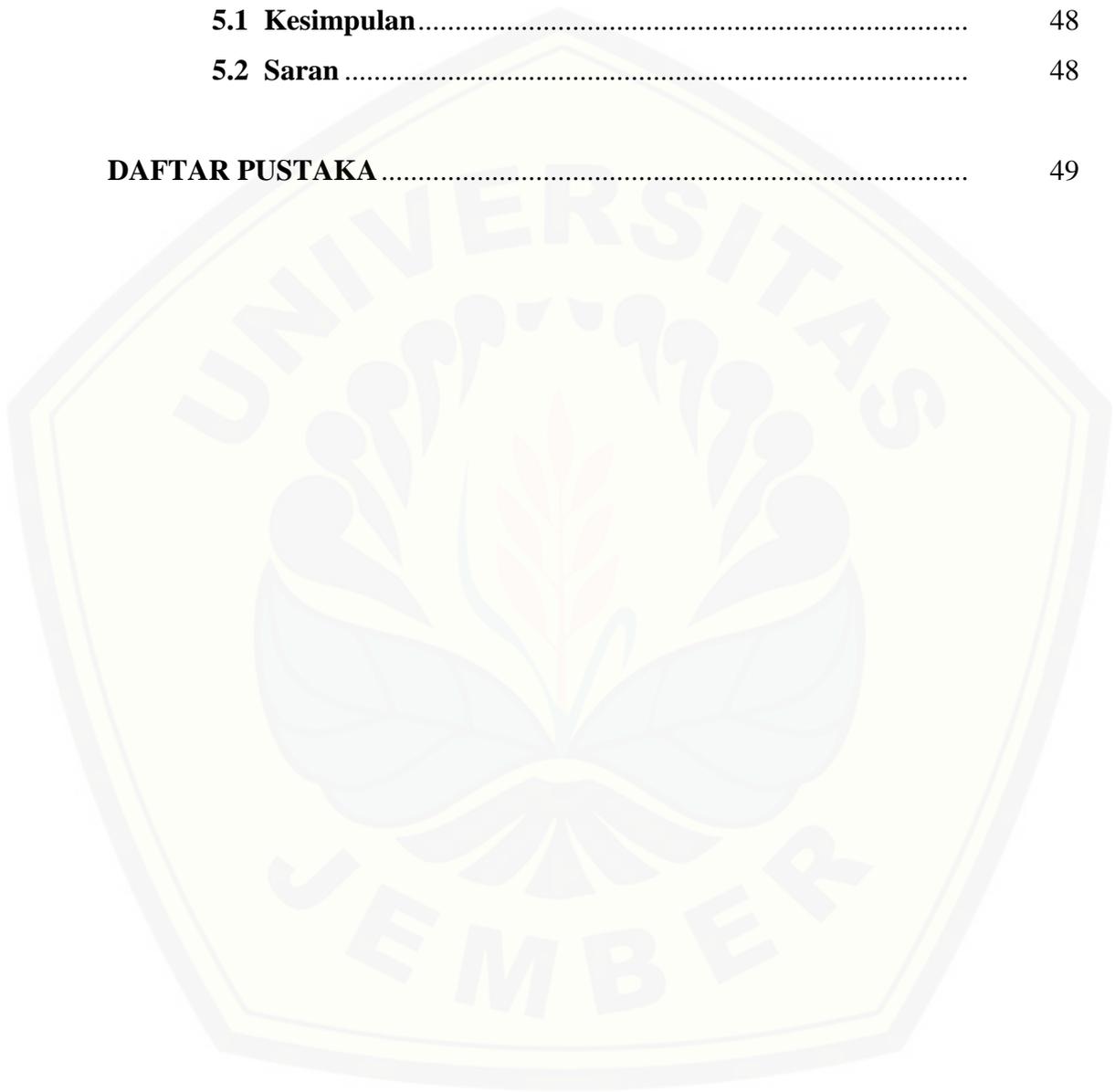
Penyusun

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
HALAMAN MOTTO	iv
HALAMAN PERNYATAAN	v
HALAMAN PEMBIMBING	vi
HALAMAN PENGASAHAN	vii
RINGKASAN	viii
PRAKATA	x
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Motor	5
2.1.1 Jenis-jenis Motor.....	6
2.2 Stator	9
2.3 Rotor	10
2.4 Driver Motor	11

2.5 Arduino UNO	11
2.5.1 <i>Power Supply</i>	13
2.5.2 Memori	13
2.5.3 <i>Input dan Output</i>	13
2.5.4 Komunikasi	14
2.5.5 <i>Software Arduino</i>	14
2.5.6 Perangkat Lunak (<i>Arduino IDE</i>)	15
2.6 Magnet Permanen	15
2.7 Mosfet	15
2.7.1 Kurva Karakteristik Mosfet.....	16
2.7.2 Karakteristik MOSFET pada daerah Cut-Off.....	17
2.7.3 Karakteristik MOSFET pada kondisi saturasi.....	18
2.8 Optocoupler IC PC817	19
2.8.1 Transmitter	19
2.8.2 Receiver	19
2.9 Faktor-faktor yang Berpengaruh terhadap Kinerja Motor	22
2.9.1 Kecepatan Motor	22
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1 Blok Diagram Alat	23
3.2 Perancangan Sistem	24
3.4.1 Rangkaian Skema	24
3.4.2 Rangkaian Driver Mosfet	25
3.3 Diagram Flowchart	26
3.4 Flowchart program	28
3.5 Desain Motor BLDC Konstruksi <i>Axial Flux</i> (Celah Ganda)	29
3.6 Desain Driver Menggunakan Arduino UNO	29
BAB 4. ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN	30
4.1 Cara Menentukan Frekuensi Dengan Arduino UNO	31
4.2 Pengujian Tegangan, Arus, Kecepatan dan Hasil Gelombang	31

4.3 Data Perhitungan.....	45
BAB 5. PENUTUP.....	48
5.1 Kesimpulan.....	48
5.2 Saran.....	48
DAFTAR PUSTAKA.....	49



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Kontruksi DC <i>Brushed Motor</i>	7
2.2 Stator BLDC motor	8
2.3 <i>Board Arduino Uno</i>	11
2.4 Kurva Karakteristik	16
2.5 rangkaian MOSFET kondisi Cut-Off	16
2.6 Rangkaian MOSFET kondisi satu rasi	17
2.7 Piringan Sensor	19
2.8 Rangkaian Optocoupler	21
3.1 Blok Diagram dan Perancangan Sistem	23
3.2 Skema Rangkaian	23
3.3 Skema Rangkaian MOSFET	24
3.4 <i>Flowchart</i>	25
3.5 Flowchart Program	27
3.6 Perancangan Motor <i>Brushless Direct Current Axial Flux</i> Tampak Atas	28
3.7 Perancangan Motor <i>Brushless Direct Current Axial Flux</i> Tampak Samping	28
3.8 Perancangan Motor <i>Brushless Direct Current Axial Flux</i> Tampak Belakang	29
3.9 Perancangan <i>Driver</i> Menggunakan Arduino UNO Tampak Atas	29
4.1 Driver Arduino UNO	30
4.2 Serial Monitor Pada Aplikasi Arduino	31
4.3 Grafik perbandingan Nilai rpm	47

DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Kemampuan Hantar Arus (KHA) pada Kawat Email berdasarkan American <i>Wire Gauge</i> (AWG)	8
2.2 Deskripsi Arduino Uno	12
4.1 Hasil Pengujian Tegangan, Arus, dan kecepatan dari lilitan 100	31
4.2 Hasil Gelombang pada lilitan 100.....	32
4.3 Hasil Gelombang pada lilitan 100.....	35
4.4 Hasil Gelombang Lilitan 200	36
4.5 Hasil Pengujian Tegangan, Arus, dan kecepatan dari lilitan 300	38
4.6 Hasil Gelombang Lilitan 300	39
4.7 Hasil Pengujian Tegangan, Arus, dan kecepatan dari lilitan 400	42
4.8 Hasil Gelombang Lilitan 400	43
4.9 Perhitungan Kecepatan dengan Teori	45
4.10 Perhitungan Error Persent	46
4.11 Perbandingan Nilai rpm	47

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dalam masyarakat modern, listrik merupakan sumber energi sekunder yang paling populer. Aplikasi motor telah menyebar ke semua jenis lapangan dalam ekonomi nasional dan kehidupan sehari-hari sebagai alat konversi energi mekanik utama selama lebih dari satu abad. Teknologi yang berkembang pada saat ini dalam rangka memenuhi kebutuhan dan memudahkan kegiatan manusia. Salah satu hasil dari perkembangan teknologi adalah motor DC. Motor DC merupakan suatu perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dengan tegangan searah sebagai sumber tenaganya. Oleh sebab itu, manusia tidak dapat terlepas dengan alat yang bernama motor DC. Karena motor DC membantu kegiatan manusia dalam menggerakkan suatu sistem misalnya fungsi motor DC pada dunia industri untuk menggerakkan *lift*, konveyor, traktor, dan lain-lain. Selain itu, motor DC juga membantu kegiatan manusia dibidang transportasi untuk menggerakkan mobil, sepeda listrik dan lain-lain. (Muhammad, 2007)

Dengan bertambahnya zaman dan teknologi yang semakin maju maka diciptakanlah motor BLDC. Motor BLDC itu sendiri dikembangkan dengan dasar motor DC yang disikat. Teori mesin modern ini terbentuk ketika Faraday menemukan fenomena induksi elektromagnetik pada tahun 1831. Membatasi perkembangan perangkat tenaga elektronik dan bahan magnet permanen, desain motor BLDC berhasil sampai lebih dari 1 abad. Pada tahun 1915, seorang Amerika, Langmuir, menemukan penyearah merkuri untuk mengendalikan *grid* elektroda dan membuat konverter DC/AC. Mengurangi kerugian motor tradisional, pada tahun 1930, beberapa ilmuwan mulai mengembangkan motor *brushless* dc dimana pergantian elektronik diimplementasikan, yang membuat persiapan untuk motor BLDC. Namun, pada saat itu perangkat *power electronic* dalam tahap pengembangan, ilmuwan tidak dapat menemukan pergantian yang tepat. (Chang Liang Xia, 2012)

Motor listrik merupakan pengubah energi listrik menjadi energi mekanik utama selama ini. Perkembangan motor listrik di dunia menjadi sangat pesat

akibat berkembangnya isu pemanasan global dan menipisnya persediaan bahan bakar minyak dunia, sehingga banyak peneliti mencari alternative penggerak selain motor dengan bahan bakar minyak, karena menggunakan listrik sebagai sumber utama, serta tanpa emisi maka motor listrik menjadi pilihan utama pengganti motor dengan bahan bakar minyak.

Namun selama ini motor listrik yang telah umum digunakan yakni motor DC dan motor induksi masih memiliki banyak kekurangan yang harus diperbaiki. Seperti pada motor DC walaupun motor DC memiliki torsi yang tinggi namun penggunaan sikat (*brush*) dan juga komutator membatasi kecepatannya dan memerlukan perawatan. Penggunaan *brush* pada komutasi motor yang membatasi kecepatannya. Selain itu *brush* pada motor DC juga cepat rusak, hal ini diakibatkan oleh *arching* yang timbul pada *brush* akibat komutasi saat motor berputar. Sedangkan untuk motor induksi, sebenarnya memiliki biaya perawatan yang lebih murah dan kecepatan yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan motor DC namun memiliki efisiensi yang lebih rendah dan motor lebih cepat panas ketika bekerja. (Wengi, *et al.* 2014).

Karena banyaknya kekurangan tersebut, banyak orang yang mengembangkan berbagai cara untuk memperbaiki kekurangannya. Seperti dengan mengganti sikat dan komutator pada motor DC dengan rangkaian elektronika daya. Hal ini dapat memperbaiki efisiensi dan juga akan meningkatkan kecepatan dari motor DC tersebut yang tadinya dibatasi oleh adanya sikat. Sehingga tercipta *brushless DC motor* atau biasa disebut dengan BLDC motor.

Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian dengan *driver H-bridge*. *Driver* jenis ini menggunakan Arduino UNO. Dengan rangkaian *driver* jenis *H-bridge* diharapkan kekurangan-kekurangan yang ada pada *driver-driver* yang telah digunakan sebelumnya dapat diminimalisir. Dengan menggunakan Arduino UNO diharapkan *driver H-bridge* dapat menahan arus dan tegangan yang lebih besar sehingga kecepatan yang dihasilkan dapat lebih tinggi. Dengan begitu dapat meningkatkan performa atau kinerja dari motor BLDC yang di uji.

Dibedakan dari banyaknya fasa, motor BLDC dapat dibagi menjadi tiga yakni BLDC satu fasa, dua fasa dan tiga fasa. Pada penelitian ini saya akan menggunakan

motor BLDC satu fasa dengan enam buah magnet permanen pada rotornya, pada stator menggunakan enam buah kumparan, dengan posisi tiga buah kumparan diatas rotor dan tiga buah kumparan dibawah rotor. Dengan konstruksi tersebut motor BLDC yang di buat memiliki celah ganda.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang permasalahan sebelumnya, maka dapat dirumuskan sebagai berikut:

- a. Bagaimana merancang dan membuat *Driver* dengan menggunakan Arduino pada BLDC konstruksi *Axial Flux*?
- b. Bagaimana menguji kinerja dari *Driver* dengan menggunakan Arduino pada BLDC konstruksi *Axial Flux*?
- c. Bagaimana menganalisis gelombang frekuensi dengan menggunakan Arduino pada motor BLDC kontruksi *Axial Flux*?

1.3. Batasan Masalah

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

- a. Pengujiannya hanya kecepatan motor, tegangan, arus dan frekuensi.
- b. Menggunakan frekuensi 20-80 Hz
- c. Menggunakan rangkaian MOSFET.
- d. Menggunakan tegangan 10V.
- e. Motor tidak menggunakan beban.

1.4. Tujuan Penelitian

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

- a. Mengetahui perancangan dan pembuatan *Driver* dengan menggunakan Arduino pada BLDC konstruksi *Axial Flux*.
- b. Mengetahui kinerja dari *Driver* dengan menggunakan Arduino pada BLDC konstruksi *Axial Flux*.

1.5. Manfaat Penelitian

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

- a. Mendukung pengembangan ilmu pengetahuan tentang penggunaan *driver* pada motor BLDC .
- b. Dapat menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya mengenai *driver* motor BLDC.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang terdapat dalam skripsi ini adalah sebagai berikut

- :
- | | | |
|----------------|------------------------------|--|
| BAB I | Pendahuluan | Berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan. |
| BAB II | Tinjauan Pustaka | Membahas teori-teori tentang <i>driver</i> menggunakan Arduino UNO dan komponen yang digunakan dalam mendesain pembuatan alat. |
| BAB III | Metodologi Penelitian | Berisi tentang tahapan penelitian, perancangan, dan desain <i>driver</i> menggunakan Arduino UNO. |
| BAB IV | Hasil dan Pembahasan | Berisi tentang proses pengujian alat, pengambilan data, dan analisa data yang kemudian dimasukkan dalam pembahasan. |
| BAB V | Kesimpulan dan Saran | Berisi tentang kesimpulan dan saran dari pengujian dan pembuatan alat yang telah dilakukan. |

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Motor Listrik

Motor merupakan komponen elektronik yang berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Motor listrik menggunakan prinsip medan elektromagnetik untuk dapat bekerja. Bahwa bila terdapat suatu kumparan yang dialiri oleh arus listrik maka akan menyebabkan adanya medan magnet disekitar kumparan tersebut. Medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan tersebut digunakan untuk menggerakkan motor. Motor listrik umumnya terdiri dari dua bagian, yaitu bagian yang diam atau biasa disebut stator dan bagian yang bergerak atau biasa disebut dengan rotor. Sebagaimana kita ketahui bahwa, kutub-kutub dari magnet yang senama akan tolak menolak dan kutub-kutub yang tidak senama akan tarik-menarik. Maka kita dapat memperoleh gerakan jika kita menempatkan sebuah magnet pada sebuah poros yang dapat berputar, dan magnet yang lain pada suatu kedudukan yang tetap (Sutrisno, *et al.* 2012).

Energi mekanik yang dihasilkan oleh motor listrik umum dimanfaatkan untuk memutar impeller pompa, kipas, atau *blower*, menggerakkan kompresor, mengangkat beban, dan lain-lain. Dalam memahami sebuah motor listrik, penting untuk mengetahui apa yang dimaksud dengan beban yang akan diberikan pada motor. Beban mengacu pada keluaran tenaga putar/torsi sesuai dengan kecepatan yang diperlukan. Mekanisme kerja untuk keseluruhan motor listrik secara umum, yaitu :

1. Arus listrik dalam medan magnet akan memberikan gaya. Jika kawat yang digunakan untuk menghantarkan arus dibengkokkan menjadi sebuah lingkaran yang berulang (*loop*), maka kedua sisi *loop*, yaitu pada sudut kanan medan magnet, akan mendapatkan gaya pada arah yang berlawanan.
2. Pasangan gaya menghasilkan tenaga putar/torsi untuk memutar kumparan.
3. Motor-motor memiliki beberapa *loop* pada dinamonya untuk memberikan tenaga putaran yang lebih seragam dan medan magnetnya dihasilkan oleh susunan elektromagnetik yang disebut kumparan medan (Kurniawan, 2016).

2.1.1 Jenis-Jenis Motor

Berdasarkan pasokan supply yang digunakan saat beroperasi, motor listrik dapat dibedakan menjadi dua yaitu motor DC dan motor AC. Namun pada dasarnya kedua jenis motor tersebut dapat disebut sama (Zekavat, 2013).

a. *Motor AC*

Pada dasarnya penggunaan sumber arus bolak-balik sudah umum digunakan sebagai penggerak motor. Motor AC merupakan mesin listrik yang diigerakkan dengan sumber arus bolak-balik. Motor jenis ini menggunakan arus listrik yang membalikkan arahnya secara teratur pada rentang waktu tertentu. Prinsip kerja motor AC menggunakan induksi magnet dari kumparan yang terhubung dengan sumber tegangan. Umumnya motor AC terdiri dari dua buah komponen utama yaitu rotor dan stator. Stator pada motor ini menggunakan kumparan tembaga (kawat email) yang dililitkan pada sebuah besi lunak tipis yang disusun hingga berbentuk seperti sebuah sangkar, sedangkan statornya terbuat dari komponen yang bersifat feromagnetik atau mudah dipengaruhi oleh medan magnet. Pada motor AC induksi tidak menggunakan magnet permanen seperti pada motor DC. Motor AC dapat dilengkapi dengan pengubah frekuensi untuk mengendalikan kecepatan sekaligus menurunkan konsumsi daya pada motor. Pembalikan arah putaran pada motor arus bolak-balik dapat dilakukan dengan membalik arah stator pada motor tersebut.

b. *Motor DC*

Motor DC (*Direct Current*) menggunakan sumber arus searah sebagai penggeraknya. Dua bagian utama yang terdapat pada motor DC yakni stator dan rotor. Pada motor DC rotor terbuat dari lilitan sedangkan statornya merupakan magnet permanen. Rotor merupakan bagian yang berputar sedangkan stator merupakan bagian yang tidak bergerak. Motor DC dapat bekerja apabila pada kedua ujung kumparan pada rotor diberikan tegangan. Polaritas yang diberikan pada kedua ujung kumparan motor DC menentukan arah putarnya. Pada umumnya terdapat tiga bagian utama dari motor DC, yaitu :

1. Kutub Medan. Pada motor DC sederhana setidaknya memiliki dua buah kutub medan, yakni kutub utara dan kutub selatan. Garis magnetik melebar

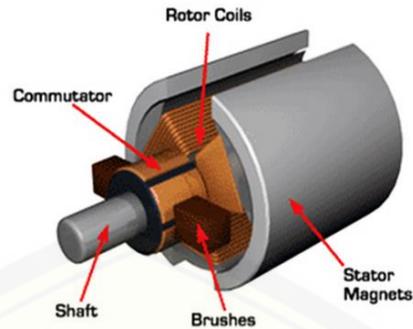
melintasi ruang diantara kutub utara dan kutub selatan tersebut. Untuk motor yang lebih kompleks bisa terdapat lebih dari satu elektromagnetik.

2. *Current electromagnet* atau dinamo. Dinamo dihubungkan ke as penggerak untuk menggerakkan beban. Pada motor DC dengan ukuran yang kecil, dinamo berputar dalam medan magnet yang dibentuk oleh kutub-kutub hingga kutub utara dan selatan magnet berganti.
3. Komutator. Komutator umum digunakan pada motor DC konvensional. Fungsi dari komponen ini adalah untuk transmisi arus antara dinamo dan sumber daya (Kurniawan, 2016).

Motor DC memerlukan *supply* tegangan yang searah pada kumparan medan untuk diubah menjadi energi mekanik. Dalam motor DC terdapat dua kumparan yaitu kumparan medan yang berfungsi untuk menghasilkan medan magnet dan kumparan jangkar yang berfungsi sebagai tempat terbentuknya gaya gerak listrik (ggl E). Jika arus dalam kumparan jangkar berinteraksi dengan medan magnet, akan timbul torsi (T) yang akan memutar motor (Gottlieb, *et al.*1997).

a. *Brushed DC Motor*

Pada motor DC biasanya digunakan sikat yang berfungsi untuk mengubah arus pada kumparan, sehingga arah putaran motor akan selalu tetap. Tetapi penggunaan sikat tersebut dapat membatasi kecepatan pada motor. Selain itu gesekan antara komutator dan sikat membuat sikat cepat aus dan membuat motor memerlukan perawatan yang lebih. Cepat ausnya sikat yang digunakan pada motor DC diakibatkan oleh timbulnya *arching* pada sikat akibat komutasi motor saat motor berputar.



Gambar 2.1 Konstruksi DC *Brushed Motor*

Sumber : <https://www.electricbike.com/motor-tech-learn-the-terms-part-1/>

b. *Brushless DC Motor*

Penggantian sikat dan komutator yang ada pada motor DC dengan menggunakan rangkaian elektronika daya membuat jenis motor DC dengan desain yang baru. *Brushless DC motor*, atau yang biasa disebut dengan BLDC motor, menggunakan rangkaian elektronika sebagai pengganti sikat dan komutator yang biasa digunakan pada motor DC. Dengan tidak adanya sikat pada motor tersebut kecepatan yang dihasilkan oleh motor dapat ditingkatkan. Selain itu perawatan yang dibutuhkan oleh motor juga tidak serumit bila menggunakan sikat. Pada motor BLDC stator terdiri dari beberapa inti besi yang dililit dengan tembaga sedang rotornya merupakan magnet permanen. Walaupun sama-sama tidak menggunakan sikat efisiensi motor BLDC lebih tinggi bila dibandingkan dengan motor AC induksi, hal ini dikarenakan rotornya yang terbuat dari magnet permanen sehingga menghasilkan torsi awal yang lebih besar. Walaupun memiliki kelebihan bila dibandingkan dengan motor jenis lain metode pengendalian BLDC jauh lebih rumit untuk kecepatan dan torsi yang konstan, karena tidak adanya *brush* yang menunjang proses komutasi, selain itu harga untuk motor BLDC juga jauh lebih mahal dibandingkan dengan motor jenis lain (Kurniawan, 2016).



Gambar 2.2 Stator BLDC motor

Sumber : www.mathworks.com dalam Husaini,A.N (2015)

2.2. Stator

Solenoid adalah salah satu jenis kumparan terbuat dari kabel panjang yang dililitkan secara rapat dan dapat diasumsikan bahwa panjangnya jauh lebih besar daripada diameternya. Dalam kasus *solenoid* ideal, panjang kumparan adalah tak hingga dan dibangun dengan kabel yang saling berhimpit dalam lilitannya, dan medan magnet di dalamnya adalah seragam dan paralel terhadap sumbu *solenoid* (Halliday, 2001).

Rotor yang berupa lilitan juga dapat disebut sebagai gabungan banyak kawat melingkar (*loop* arus melingkar). Rotor yang terdiri dari lilitan kawat yang berbentuk garis sekrup pada suatu silinder, biasanya mempunyai penampang lingkaran. Terdapat ratusan atau ribuan lilitan yang sangat rapat, yang masing-masing dapat dianggap sebagai kawat lingkaran berarus. Namun tidak semua, juga ada beberapa lapisan lilitan. Apabila diberikan tegangan pada ujung-ujung kawat maka stator akan menghasilkan medan magnet dan medan magnet tersebut dipengaruhi oleh kuat arus listrik dan banyaknya lilitan. Kumparan seolah-olah mempunyai dua kutub, yaitu ujung yang satu merupakan kutub utara dan ujung kumparan yang lain merupakan kutub selatan.

Pada rotor semua lilitan dilalui arus yang sama, dan medan magnet total B di tiap-tiap titik adalah jumlah vektor dari medan-medan magnet yang disebabkan oleh masing-masing lilitan. Jika semua kawat yang dililitkan berjarak sangat dekat,

medan didalam lilitan akan parallel dengan sumbu terkecuali dibagian ujung-ujungnya.

Tabel 2.1 Kemampuan Hantar Arus (KHA) pada Kawat Email berdasarkan American Wire Gauge (AWG)]

	Diameter Kawat (mm)	Kemampuan Hantar Arus (KHA) (Ampere)
1	0,1	0,016 s/d 0,024
2	0,2	0,064 s/d 0,094
3	0,3	0,141 s/d 0,212
4	0,4	0,251 s/d 0,377
5	0,5	0,390 s/d 0,588
6	0,6	0,566 s/d 0,849
7	0,7	0,770 s/d 1,160
8	0,8	1,010 s/d 1,510
9	0,9	1,270 s/d 1,910
10	1,0	1,570 s/d 2,360
11	1,5	3,530 s/d 5,300
12	2,0	6,280 s/d 9,420

Sumber : Mustofa, 2010 dalam Kurniawan, 2016

2.3. Rotor

Pada motor tanpa sikat rotor terbuat dari magnet permanen, berbeda dengan motor DC pada umumnya yang rotornya berupa kumparan (*solenoid*) sehingga membutuhkan sikat (*brush*) dan komutator. Dengan rotornya yang berupa magnet permanen membuat kecepatan pada motor tanpa sikat menjadi lebih maksimal. Pada motor BLDC rotor dapat berputar karena adanya gaya tarik dan gaya tolak yang dihasilkan oleh medan magnet yang ada pada stator yang berupa kumparan. Jumlah magnet pada rotor dapat divariasikan sesuai dengan kebutuhan, semakin banyak jumlah kutub akan meningkatkan torsi yang dihasilkan oleh motor namun konsekuensinya kecepatannya akan menurun (Prayitno, 2018).

Pada motor dengan Driver *H-Bridge* yang akan diteliti rotornya terbuat dari magnet permanen dengan jumlah 6, berbeda dengan susunan pada motor BLDC dengan driver *on/off* yang magnetnya searah, pada driver *H-Bridge* susunan magnet pada rotornya bolak-balik.

2.4. Driver Motor

Driver motor merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi sebagai pengatur atau kontroler pada motor. Nilai dari kecepatan yang dihasilkan oleh motor tergantung dari besarnya nilai tegangan yang diberikan pada drivernya. Karena itu driver juga dapat disebut sebagai piranti yang dapat mengatur arah dan kecepatan putaran dari motor. Driver kontrol tegangan, dengan driver motor kontrol tegangan menggunakan level tegangan secara langsung untuk mengatur kecepatan dari putaran motor (Prayitno, 2018).

Pada motor BLDC, driver berfungsi sebagai rangkaian elektronika daya untuk menggantikan sikat dan komutator yang dihilangkan dari motor. Namun pada dasarnya, memiliki fungsi yang sama dengan driver yang ada pada motor umumnya. Pada motor BLDC driver merupakan bagian yang penting, karena tanpa driver motor BLDC tidak dapat bekerja. Berbeda dengan motor DC yang dapat bekerja walaupun tanpa driver.

2.5. Arduino UNO

Arduino UNO adalah sebuah *board* mikrokontroler yang berbasis ATmega328. Arduino memiliki 14 *pin input* atau *output* yang mana 6 *pin* dapat digunakan sebagai *output* PWM, 6 *analog input*, *crystal* osilator 16 MHz, koneksi *USB*, *jack power*, kepala ICSP, dan tombol *reset*. Arduino mampu *support* mikrokontroler, dapat dikoneksikan dengan komputer menggunakan kabel *USB* (Feri Djuandi, 2011).



Gambar 2.3 *Board* Arduino Uno

Sumber : <http://www.arduino.cc>

Arduino memiliki kelebihan tersendiri dibanding *board* mikrokontroler yang lain selain bersifat *open source*. Arduino juga mempunyai bahasa pemrogramannya sendiri yang berupa bahasa C. Selain itu dalam *board* arduino sendiri sudah terdapat *loader* yang berupa USB sehingga memudahkan pengguna ketika memprogram mikrokontroler didalam arduino. Sedangkan pada kebanyakan *board* mikrokontroler yang lain yang masih membutuhkan rangkaian *loader* terpisah untuk memasukkan program ketika kita memprogram mikrokontroler. *Port* USB tersebut selain untuk *loader* ketika memprogram, dapat juga difungsikan sebagai *port* komunikasi *serial*.

Arduino menyediakan 20 *pin* I/O, yang terdiri dari 6 *pin* *input analog* dan 14 *pin* *digital input* atau *output*. Untuk 6 *pin* *analog* dapat difungsikan sebagai *output digital* jika diperlukan *output digital* tambahan selain 14 *pin* yang sudah tersedia. Untuk mengubah *pin* *analog* menjadi *digital* cukup mengubah konfigurasi *pin* pada program. Dalam *board* kita bisa lihat *pin* *digital* diberi keterangan 0-13, jadi untuk menggunakan *pin* *analog* menjadi *output digital*, *pin* *analog* yang pada keterangan *board* 0-5 kita ubah menjadi *pin* 14-19. dengan kata lain *pin* *analog* 0-5 berfungsi juga sebagai *pin* *output digital* 14-16 (Azzi Taufik, 2014).

Deskripsi Arduino UNO:

Tabel 2.2 Deskripsi Arduino Uno

Mikrokontroler	ATmega 328
Tegangan Pengoperasian	5 V
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 MHz

2.5.1 Power Supply

Arduino dapat diberikan *power* melalui koneksi USB atau *power supply*. *Power* di *select* secara otomatis. *Power supply* 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.

2.5.2 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.

2.5.3 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. *Interupt 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 *suport* 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.

2.5.4 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.

2.5.5 Software Arduino

Arduino UNO dapat diprogram dengan perangkat lunak arduino. Pada ATMEGA328 di arduino terdapat *bootloader* yang memungkinkan anda untuk *upload* kode baru untuk itu tanpa menggunakan *programmer hardware eksternal*.

2.5.6 Perangkat Lunak (Arduino IDE)

IDE arduino adalah *software* yang sangat canggih ditulis dengan menggunakan Java. IDE arduino terdiri dari:

1. *Editor* program, sebuah *window* yang memungkinkan pengguna menulis dan mengedit program dalam bahasa *processing*.
2. *Compiler*, sebuah modul yang mengubah kode program (bahasa *Processing*) menjadi kode *biner*. Bagaimanapun sebuah mikrokontroler tidak akan bisa memahami bahasa *processing*. Yang bisa dipahami oleh mikrokontroler adalah kode biner. Itulah sebabnya *compiler* diperlukan dalam hal ini.
3. *Uploader*, sebuah modul yang memuat kode biner dari komputer ke dalam *memory* didalam papan arduino. (Azzi Taufik, 2014).

2.6. Magnet Permanen

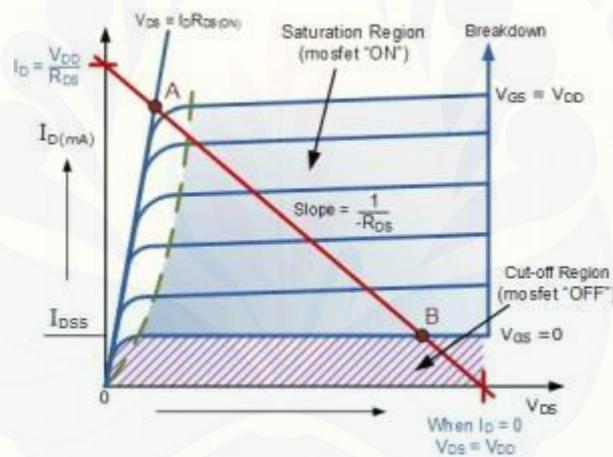
Karena tidak menggunakan sikat dan komutator rotor pada motor BLDC diganti dengan magnet permanen. Magnet *neodymium* merupakan salah satu magnet dengan kekuatan dan daya tahan magnet yang lama. Karena itu magnet *neodymium* sering digunakan dalam penelitian tentang pembangunan motor ataupun penelitian yang memerlukan magnet didalamnya.

Magnet memiliki dua kutub, yakni utara dan selatan. Magnet memiliki nilai kuat medan magnet (B). Besar nilai B dari sebuah magnet akan menentukan besarnya gaya tarik atau gaya tolak terhadap benda lainnya. Pada posisi yang sama antar magnet dengan suatu titik akan dirasakan gaya tarik atau tolak yang berbeda apabila nilai B dari magnet berubah (Atmaja, 2018).

2.7. Mosfet

MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) merupakan salah satu jenis transistor yang memiliki impedansi masukan (gate) sangat tinggi (Hampir tak berhingga) sehingga dengan menggunakan MOSFET sebagai saklar elektronik, memungkinkan untuk menghubungkannya dengan semua jenis gerbang logika. Dengan menjadikan MOSFET sebagai saklar, maka dapat digunakan untuk mengendalikan beban dengan arus yang tinggi dan biaya yang lebih murah daripada menggunakan transistor bipolar. Untuk membuat MOSFET sebagai saklar maka hanya menggunakan MOSFET pada kondisi saturasi (ON) dan kondisi cut-off (OFF).

2.7.1 Kurva Karakteristik MOSFET



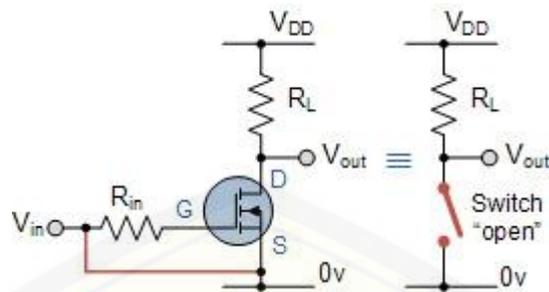
Gambar 2.4 Kurva Karakteristik

sumber : <http://elektronika-dasar.web.id/mosfet-sebagai-saklar/>

Wilayah Cut-Off (MOSFET OFF)

Pada daerah Cut-Off MOSFET tidak mendapatkan tegangan input ($V_{in} = 0V$) sehingga tidak ada arus drain I_D yang mengalir. Kondisi ini akan membuat tegangan $V_{ds} = V_{dd}$. Dengan beberapa kondisi diatas maka pada daerah cut-off ini MOSFET dikatakan OFF (Full-Off). Kondisi cut-off ini dapat diperoleh dengan menghubungkan jalur input (gate) ke ground, sehingga tidak ada tegangan input yang masuk ke rangkaian saklar MOSFET. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut.

Gambar Rangkaian MOSFET Sebagai Saklar Pada Kondisi Cut-Off



Gambar 2.5 rangkaian MOSFET kondisi Cut-Off

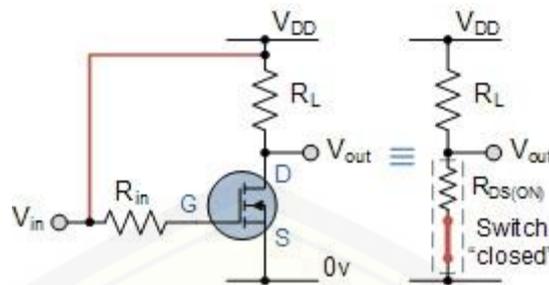
Sumber : <http://elektronika-dasar.web.id/mosfet-sebagai-saklar/>

2.7.2 Karakteristik MOSFET pada daerah Cut-Off antara lain sebagai berikut.

- Input gate tidak mendapat tegangan bias karena terhubung ke ground (0V)
- Tegangan gate lebih rendah dari tegangan threshold ($V_{gs} < V_{th}$)
- MOSFET OFF (Fully-Off) pada daerah cut-off ini.
- Tidak arus drain yang mengalir pada MOSFET
- Tegangan output $V_{out} = V_{ds} = V_{dd}$
- Pada daerah cut-off MOSFET dalam kondisi open circuit.

Dengan beberapa karakteristik diatas maka dapat dikatakan bahwa MOSFET pada daerah Cut-Off merupakan saklar terbuka dengan arus drain $I_d = 0$ Ampere. Untuk mendapatkan kondisi MOSFET dalam keadaan open maka tegangan gate V_{gs} harus lebih rendah dari tegangan threshold V_{th} dengan cara menghubungkan terminal input (gate) ke ground. Wilayah Saturasi (MOSFET ON) Pada daerah saturasi MOSFET mendapatkan bias input (V_{gs}) secara maksimum sehingga arus drain pada MOSFET juga akan maksimum dan membuat tegangan $V_{ds} = 0V$. Pada kondisi saturasi ini MOSFET dapat dikatakan dalam kondisi ON secara penuh (Fully-ON).

Gambar Rangkaian MOSFET Sebagai Saklar Pada Kondisi Saturasi



Gambar 2.6 Rangkaian MOSFET kondisi satu rasi

Sumber :<http://elektronika-dasar.web.id/mosfet-sebagai-saklar/>

2.7.3 Karakteristik MOSFET pada kondisi saturasi antar lain adalah :

- Tegangan input gate (V_{gs}) tinggi
- Tegangan input gate (V_{gs}) lebih tinggi dari tegangan treshold ($V_{gs} > V_{th}$)
- MOSFET ON (Fully-ON) pada daerah Saturasi
- Tegangan drain dan source ideal (V_{ds}) pada daerah saturasi adalah 0V ($V_{ds} = 0V$)
- Resistansi drain dan source sangat rendah ($R_{ds} < 0,1 \text{ Ohm}$)
- Tegangan output $V_{out} = V_{ds} = 0,2V (R_{ds} \cdot I_d)$
- MOSFET dianalogikan sebagai saklar kondisi tertutup

Kondisi saturasi MOSFET dapat diperoleh dengan memberikan tegangan input gate yang lebih tinggi dari tegangan tresholdnya dengan cara menghubungkan terminal input ke V_{dd} . Sehingga MOSFET mejadi saturasi dan dapat dianalogikan sebagai saklar pada kondisi tertutup. (khoiri insan, 2012)

2.8. Optocoupler IC PC817

Optocoupler adalah suatu piranti yang terdiri dari 2 bagian yaitu transmitter dan receiver, yaitu antara bagian cahaya dengan deteksi sumber cahaya terpisah. Biasanya optocoupler digunakan sebagai saklar elektrik, yang bekerja secara otomatis. Optocoupler atau optoisilator merupakan komponen penggandeng (coupling) antara rangkaian input dengan rangkaian output yang menggunakan

media cahaya (opto) sebagai penghubung. Dengan kata lain, tidak ada bagian yang konduktif antara kedua rangkaian tersebut. Optocoupler sendiri terdiri dari 2 bagian, yaitu transmitter (pengirim) dan receiver (penerima).

2.8.1 Transmitter

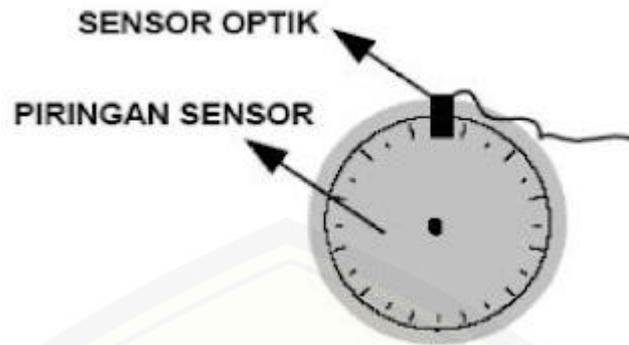
Merupakan bagian yang terhubung dengan rangkaian input atau rangkaian kontrol. Pada bagian ini terdapat sebuah LED infra merah (IR LED) yang berfungsi untuk mengirimkan sinyal kepada receiver. Pada transmitter dibangun dari sebuah LED infra merah. Jika dibandingkan dengan menggunakan LED biasa, LED infra merah memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap sinyal tampak. Cahaya yang dipancarkan oleh LED infra merah tidak terlihat oleh mata telanjang.

2.8.2 Receiver

Merupakan bagian yang terhubung dengan rangkaian output atau rangkaian beban, dan berisi komponen penerima cahaya yang dipancarkan oleh transmitter. Komponen penerima cahaya ini dapat berupa photodiode ataupun phototransistor. Phototransistor merupakan suatu transistor yang peka terhadap tenaga cahaya. Suatu sumber cahaya yang menghasilkan energi panas, begitu pula dengan spektrum infra merah. Karena spektrum infra mempunyai efek panas dari cahaya tampak, maka phototransistor lebih peka untuk menangkap radiasi dari sinar infra merah.

Jika dilihat dari penggunaannya, optocoupler biasa digunakan untuk mengisolasi common rangkaian input dengan common rangkaian output. Sehingga suplay tegangan untuk masing-masing rangkaian tidak saling terbebani dan juga untuk mencegah kerusakan pada rangkaian kontrol (rangkaiannya input).

Sensor Cahaya (Optocoupler) dan Piringan Sensor



Gambar 2.7 Piringan Sensor

Tujuan utama dari digunakan sensor cahaya dan piringan sensor adalah untuk mendapatkan data kecepatan putaran dari setiap roda. Piringan sensor yang digunakan dibuat dari negatif-film yang dijepit oleh dua buah acrylic transparan agar semakin presisi pembacaan datanya.

Sedangkan sensor cahaya yang digunakan oleh optocoupler yang prinsip kerjanya adalah ketika ada benda yang berada diantara celah sensornya, maka cahaya yang dikirimkan tidak bisa diterima oleh bagian penerimanya, sehingga menghasilkan tegangan keluaran yang nilainya mendekati mendekati VCC, begitu juga sebaliknya, jika tidak ada benda diantara celah sensornya maka akan menghasilkan tegangan keluaran yang nilainya mendekati 0 volt.

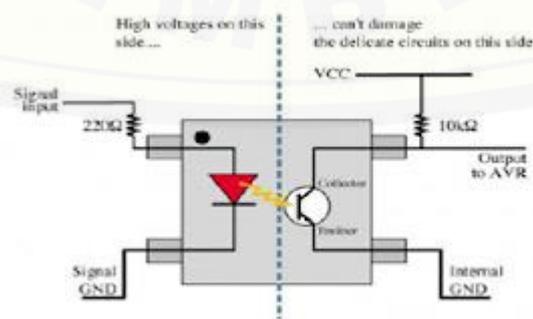
Optocoupler merupakan gabungan dari LED infra merah dengan phototransistor yang terbungkus menjadi satu chips. Cahaya infra merah termasuk dalam gelombang elektromagnetik yang tidak tampak oleh mata telanjang. Sinar tidak tampak oleh mata karena mempunyai panjang gelombang berkas cahaya yang terlalu panjang bagi tanggapan mata manusia. Sinar infra merah mempunyai daerah frekuensi 1×10^{12} Hz sampai dengan 1×10^{14} Ghz atau daerah frekuensi dengan panjang gelombang $1 \mu\text{m} - 1\text{mm}$.

LED infra merah ini merupakan komponen elektronika yang memancarkan cahaya infra merah dengan konsumsi daya sangat kecil. Jika diberi prasiap maju, LED infra merah yang terdapat pada optocoupler akan mengeluarkan panjang gelombang sekitar 0,9 mikrometer.

Proses terjadinya pancaran cahaya pada LED infra merah dalam optocoupler adalah sebagai berikut. Saat dioda menghantar arus, elektron lepas dari ikatannya karena memerlukan tenaga dari catu daya listrik. Setelah elektron lepas, banyak elektron yang bergabung dengan lubang yang ada disekitarnya (memasuki lubang lain yang kosong). Pada saat masuk lubang yang lain, elektron melepaskan tenaga yang akan diradiasikan dalam bentuk cahaya, sehingga dioda akan menyala atau memancarkan cahaya pada saat dilewati arus.

Cahaya infra merah yang terdapat pada optocoupler tidak perlu lensa untuk memfokuskan cahaya karena dalam satu chip mempunyai jarak yang dekat dengan penerimanya. Pada optocoupler yang bertugas sebagai penerima cahaya infra merah adalah phototransistor merupakan komponen elektronika yang berfungsi sebagai detektor cahaya infra merah. Detektor cahaya ini mengubah efek cahaya menjadi sinyal listrik, oleh sebab itu phototransistor termasuk dalam golongan detektor optik. Phototransistor memiliki sambungan kolektor-basis yang besar dengan cahaya infra merah, karena cahaya ini dapat membangkitkan pasangan lubang elektron.

Dengan diberi cahaya maju, cahaya yang masuk akan menimbulkan arus pada kolektor. Phototransistor memiliki bahan utama yaitu germanium atau silikon yang sama dengan bahan pembuat transistor. Tipe phototransistor juga sama dengan transistor pada umumnya yaitu PNP dan NPN. Perbedaan transistor dengan phototransistor hanya terletak pada rumahnya yang memungkinkan cahaya infra merah mengaktifkan daerah basis, sedangkan transistor biasa ditempatkan pada rumah logam yang tertutup. Simbol optocoupler seperti terlihat pada Gambar berikut : (Namikaze Minato, 2012)



Gambar 2.8 rangkaian optocoupler

2.9. Faktor – Faktor yang Berpengaruh terhadap Kinerja Motor

2.9.1 Kecepatan Motor

Kecepatan yang dihasilkan oleh motor tanpa sikat arus searah diukur dari putaran yang dihasilkan oleh rotor yang berputar pada motor tersebut. Kecepatan putaran yang dihasilkan atau yang biasa disebut dengan RPM dengan frekuensi yang telah diketahui dapat dihitung nilainya dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$N_s = \frac{120f}{P} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan :

N_s = Kecepatan sinkron motor (RPM)

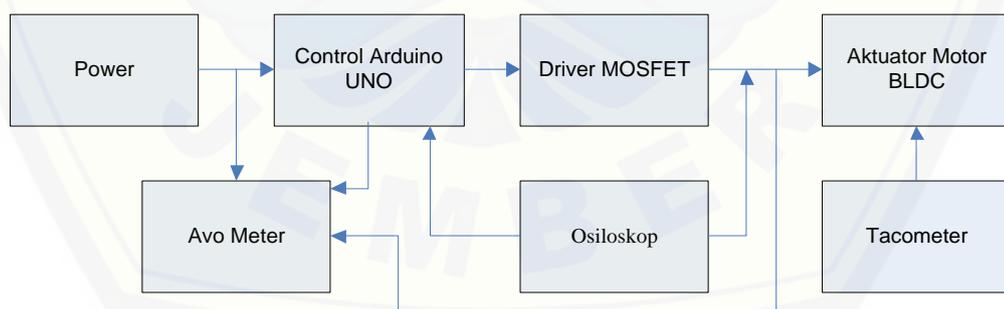
F = Frekuensi (HZ)

P = Jumlah kutub motor

BAB 3. METODELOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian dengan *driver H-bridge*. *Driver* jenis ini menggunakan Arduino UNO. Dengan rangkaian *driver* jenis *H-bridge* diharapkan kekurangan-kekurangan yang ada pada *driver-driver* yang telah digunakan sebelumnya dapat diminimalisir. Dengan menggunakan Arduino UNO diharapkan *driver H-bridge* dapat menahan arus dan tegangan yang lebih besar sehingga kecepatan yang dihasilkan dapat lebih tinggi. Dengan begitu dapat meningkatkan performa atau kinerja dari motor BLDC yang di uji. Pada rangkaian *Driver* menggunakan Arduino UNO ini komponen yang digunakan yaitu Arduino UNO sebanyak satu pasang. Menggunakan Mosfet IRF 540 sebanyak satu pasang, Mosfet IRF 9540 sebanyak satu pasang. Dan IC PC817. Dibedakan dari banyaknya fasa, motor BLDC dapat dibagi menjadi tiga yakni BLDC satu fasa, dua fasa dan tiga fasa. Pada penelitian ini saya akan menggunakan motor BLDC satu fasa dengan enam buah magnet permanen pada rotornya, pada stator menggunakan enam buah kumparan, dengan posisi tiga buah kumparan diatas rotor dan tiga buah kumparan dibawah rotor. Dengan konstruksi tersebut motor BLDC yang di buat memiliki celah ganda.

3.1. Diagram Blok



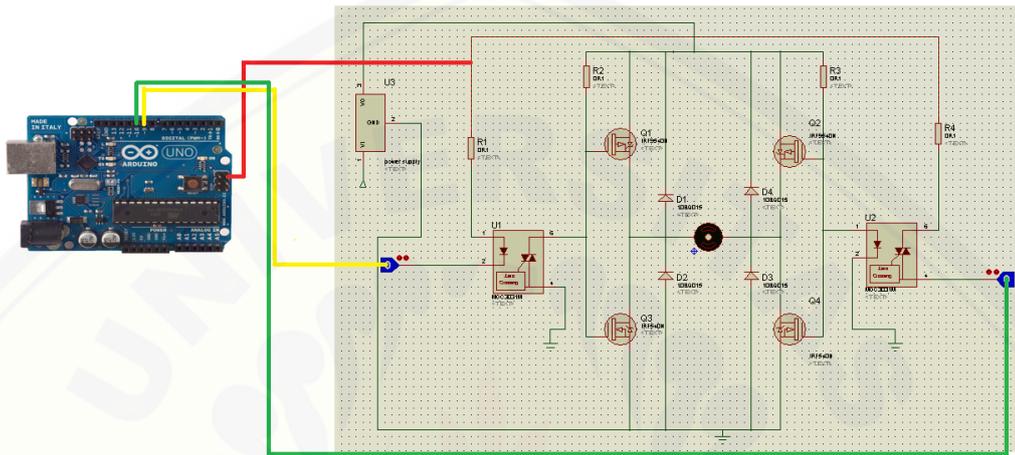
Gambar 3.1 Blok Diagram dan Perancangan Sistem

Dari blok diagram dapat dilihat urutan dari proses pengendaliannya ketika tegangan masuk ke driver Arduino UNO kemudian di dalam Arduino program yang di tentukan mengenai inialisasi frekuensi yang akan di gunakan setelah itu masuk ke motor *BLDC* dan motor bekerja. Selanjutnya mengukur kecepatan motor

menggunakan Tacometer. Mengukur arus yang masuk ke driver Arduino UNO. Dan yang terakhir mengambil data gelombang pada *osiloscop*.

3.2. Perancangan Sistem

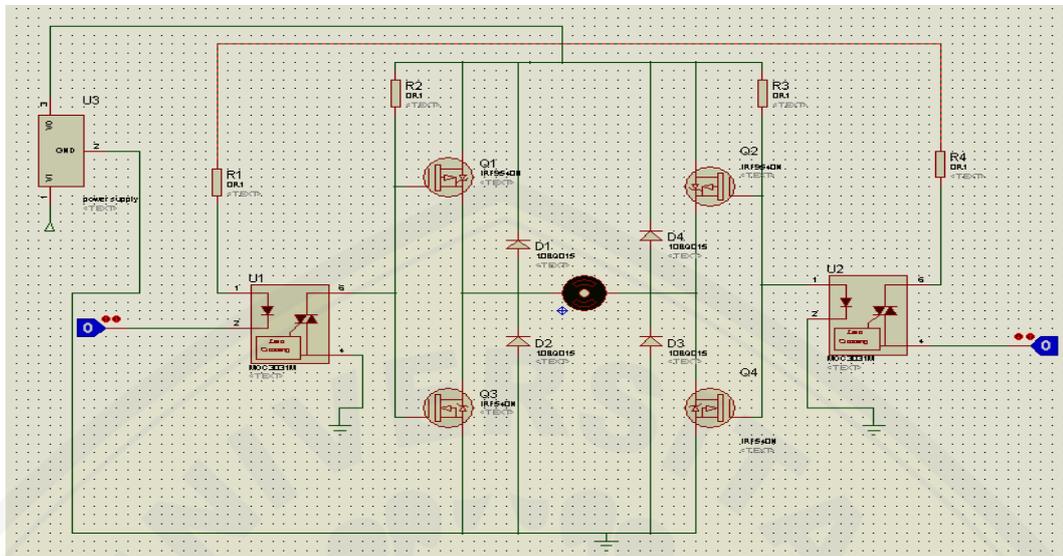
3.4.1 Rangkaian Skema



Gambar 3.2 Skema Rangkaian

Rangkaian ini menggunakan arduino untuk memberikan sinyal frekuensi kepada driver Arduino, dengan menentukan input pada pin 9 dan pin 10. Driver Arduino dengan menggunakan pengutan Mosfet merupakan modifikasi dari rangkaian *H-Bridge*, dengan menggunakan Mosfet sebagai pengganti saklar. [Cara kerja rangkaian](#) mosfet adalah sebagai driver Motor DC dengan arus yang cukup besar (Lebih dari 1 Ampere) dan tegangan kerja yang juga cukup besar. Dapat mengubah arah putaran dan juga kecepatan putar (dengan metode PWM)..

3.4.2 Rangkaian Driver MOSFET



Gambar 3.3 Skema Rangkaian MOSFET

(sumber : <http://forum.arduino.cc/index.php?topic=319858.0>)

Rangkaian ini menggunakan MOS tipe P dan N untuk mengontrol arah motor. Saya bertujuan mengurangi ukuran dan berat papan sebanyak yang saya bisa, jadi saya menerapkan desain ini sehingga sinyal input berasal dari Arduino UNO. Agar desain ini berfungsi, maka input harus tinggi dan yang lainnya harus rendah. Karena saya ingin mengendalikan kecepatan, saya memberikan saluran A sinyal input PWM dari Arduino, sementara memberikan saluran menjadi analog Write (pin, 9 dan 10) dan untuk membalikkan arah semua yang harus saya lakukan adalah membiarkan saluran A memiliki sinyal input PWM nol dan menyediakan saluran lain dengan nilai PWM yang diperlukan.

Masalahnya sekarang adalah bahwa setiap kali saya mencoba untuk mengoperasikan jembatan H dengan arduino memberikan sinyal input PWM, roket suhu Mosfets naik dan bahkan menjadi tidak mungkin untuk menyentuhnya. Namun, ketika di memberikan input digital (hanya TINGGI dan RENDAH, tidak ada PWM), ini beroperasi secara normal dan tidak ada kenaikan suhu yang terjadi.

3.3. Diagram Flowchart



Gambar 3.4 Flowchart

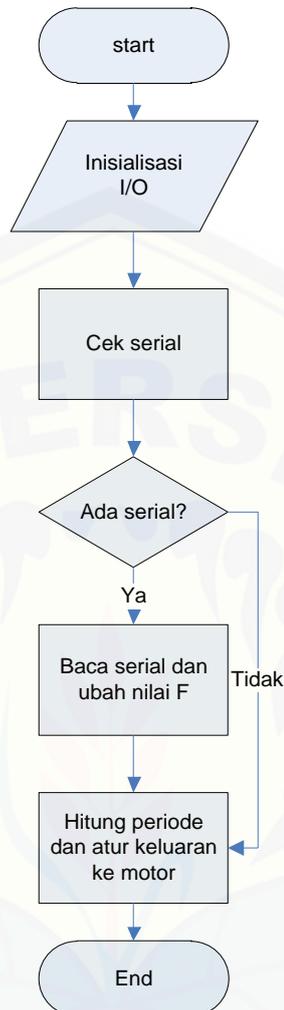
Tahapan yang dilakukan pada perancangan, pembuatan, dan penelitian Analisis Gelombang Frekuensi Pada Motor BLDC menggunakan Arduino UNO Konstruksi *Axial Flux* adalah sebagai berikut :

1. Memulai penelitian dengan studi literatur sehingga mendapatkan rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian tentang topik yang telah ditentukan. Selain itu studi literatur juga berguna untuk mendapatkan

informasi awal tentang penelitian yang akan dilakukan sehingga diharapkan dapat mengurangi tingkat kesalahan.

2. Perumusan masalah. Perumusan masalah perlu untuk dilakukan agar bahasan yang nanti dicapai tidak melebar dan sesuai dengan yang diharapkan. Sebagai hasil dari studi literatur yang telah dilakukan diawal penelitian, rumusan masalah menjadi sangat penting, karena akan menjadi acuan kemana arah yang akan dituju oleh suatu penelitian.
3. Menentukan spesifikasi dari Driver dan Motor yang akan diuji. Pada Driver digunakan Mosfet IRF9540 dan Mosfet IRF 540 sebagai *inverter*. Dengan spesifikasi motor BLDC dengan enam kumparan menggunakan lilita kawat email berdiameter 0,3 mm sebanyak 100, 200,300, dan 400 lilitan dan enam magnet permanen pada rotornya.
4. Mendesain, melakukan perhitungan, perancangan, dan pembuatan Driver Arduino pada motor BLDC .
5. Melakukan pengujian terhadap motor, sekaligus melakukan pengambilan data pada motor yang diuji.
6. Hasil data yang diperoleh pada saat pengujian motor dapat di masukkan ke pembahasan, sekaligus memberikan analisa kesimpulan dari alat tersebut pada pembahasan.
7. Memberikan kritik dan saran pada motor apabila ada kekurangan, sehingga dari kekurangan tersebut dapat diperbaiki atau dikembangkan lagi untuk penelitian selanjutnya.

3.4. Flowchart program



Gambar 3.5 Flowchart Program

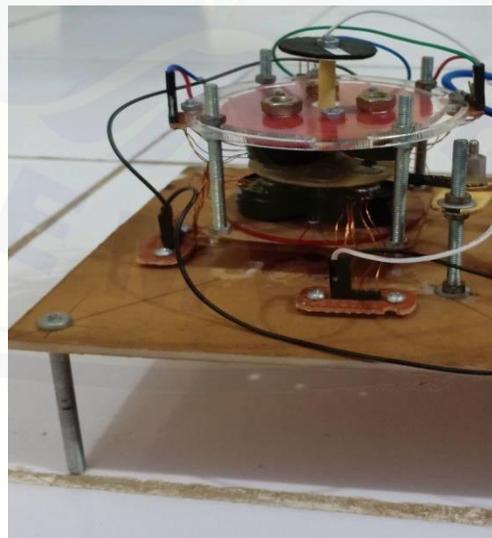
Tahapan dari flowchart alir program dalam penelitian analisis gelombang frekuensi Pada Motor BLDC menggunakan Arduino UNO Konstruksi *Axial Flux* adalah Menentukan inisialisasi I/O nya dalam program yang di tentukan. Mengecek serial program dan jika ada serial langsung pembacaan maka memasukan frekuensi dan *duty cycle* yang di tentukan kemudian menghitung periode dan mengatur keluaran ke motor.

3.5. Desain Motor BLDC Konstruksi *Axial Flux* (Celah Ganda)

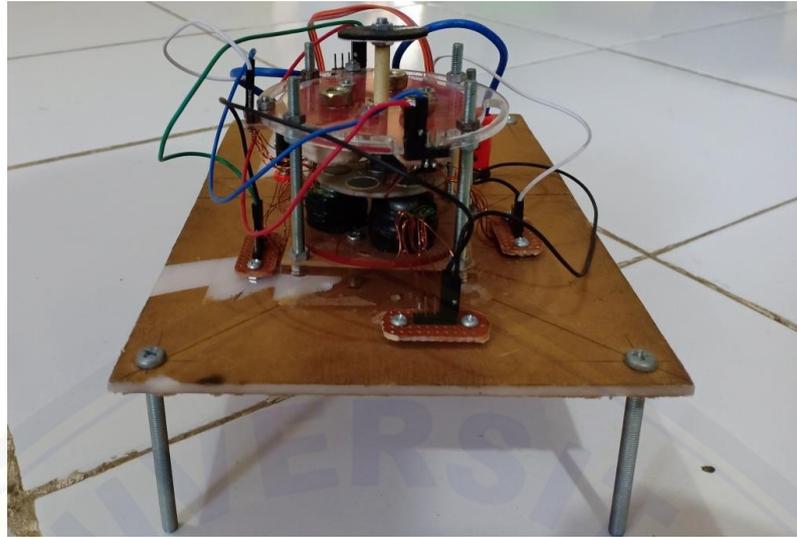
Perancangan motor *brushless direct current* (BLDC) *Axial Flux* (Celah Ganda) ini memiliki stator ganda. Motor ini menggunakan tegangan sebesar 10 volt. Dibawah ini adalah desain motor *brushless direct current* (BLDC) *Axial Flux* (Celah Ganda) tampak atas, tampak belakang dan tampak samping :



Gambar 3.6 Perancangan Motor *Brushless Direct Current Axial Flux* Tampak Atas



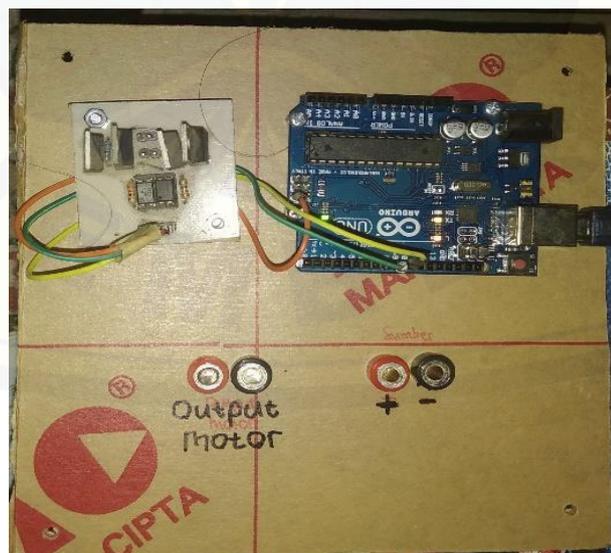
Gambar 3.7 Perancangan Motor *Brushless Direct Current Axial Flux* Tampak Samping



Gambar 3.8 Perancangan Motor *Brushless Direct Current Axial Flux* Tampak Belakang

3.6. Desain *Driver* Menggunakan Arduino UNO

Perancangan *driver* menggunakan Arduino UNO ini memiliki berbagai macam komponen seperti Mosfet IRF9540 dan IRF540, IC PC817, resistor, dan Arduino UNO. *Driver* ini hanya mampu menahan tegangan sampai 10 volt. Dibawah ini adalah desain *driver* menggunakan Arduino UNO tampak atas:



Gambar 3.9 Perancangan *Driver* Menggunakan Arduino UNO Tampak Atas

BAB 5 PENUTUP

5.1. KESIMPULAN

Dari pengujian yang sudah dilakukan pada *driver* menggunakan Arduino UNO pada motor BLDC konstruksi *axial flux* dapat disimpulkan bahwa :

1. Pada frekuensi 80Hz pengaruh kecepatan semakin bertambah semakin cepat yaitu sebesar 1607 rpm. Hal ini di sebab kan motor tidak memiliki beban.
2. Tegangan input 10V dan tegangan output lebih dari 10V, hal ini di karenakan adanya di pengaruhi besar frekuensi.
3. Pada frekuensi 30Hz error persent paling besar di peroleh sebesar 2,68%, hal ini di karenakan kecepatan motor percobaan lebih besar dari kecepatan teori.

5.2. SARAN

Pada *driver* menggunakan Arduino UNO pada motor BLDC konstruksi *axial flux* ini terdapat saran untuk dilanjutkan penelitian selanjutnya yaitu sebagai berikut :

1. Perlu penambahan nilai input tegangan lebih dari 10 V
2. Perlu perbaikan lebih lanjut pada driver yang saya gunakan.
3. Perlu adanya beban pada output motor.
4. Perlu Penambahan Perhitungan Torsi

DAFTAR PUSTAKA

- Wengi , Hudha Rencana Panjaitan Sakti, dkk. 2014. Perancangan dan Uji Performa Axial Flux Permanent Magnet Coreless *Brushless* Direct Curent (DC) Moto. Jurusan Teknik Mesin. Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya.
- Sutrisno, Hermawan Tri; Borian, Pinto. 2012. Kursi Roda Elektrik. Skripsi S1. Fakultas Ilmu Komputer. Universitas Bina Nusantara, Jakarta.
- Kurniawan, A. R. 2016. Rancang Bangun Motor Searah Tanpa Sikat Satu Fasa (Design Of Motor Single-Phase *Brushless* Direct Current). Berkala Sainstek.
- zekavat, r. (2013). *Electrical Engineering Concepts and Applications*. ISBN.
- Gottlieb, Irving.1997. *Practical Electric Motor Handbook*.Great Britain: Biddles Ltd.
- Halliday, David, dkk. 2001. *Fundamental of Physics*. Sixth Edition. New York : John Wiley and Sons.
- Prayitno, Dian Agus. 2018. Analisa Driver Motor BLDC Konstruksi Axial Flux. Skripsi .
- Indradewa, E. 2013. *Brushless* Motor DC. Jurnal Elektromagnetika .
- Hasan Ali, 2015. <http://forum.arduino.cc/index.php?topic=319858.0>
- Djuandi, Ferri. 2011. Pengenalan Arduino.
- Azzi Taufik, 2014. Arduino UNO
- khoiri insan, 2012. Pengenalan MOSFET.
- [Namikaze Minato](#) , 2012. Pengetahuan Tentang Ilmu Teknik Elektro dan Listrik yang menarik
- Mohammad Nurudin, 2016. Saklar manual menggunakan Android berbasis arduino UNO



LAMPIRAN

Lampiran

1. Listing Program Arduino

```
double tH = 5,tL = 5,T = 10; // tH= time high, tL= time low, T= periode.
double dC = 50, F = 100; // dC= duty cycle, F= frekuensi.
String terima;
//inisialisasi variable

void setup() {
  Serial.begin(9600); // menginisialisasi komunikasi serial
  pinMode(9,OUTPUT); //menginisialisasi input dan output
  pinMode(10,OUTPUT);
}
//inisialisasi I/O

void loop() {
  if(Serial.available()){//Cek Serial
    terima=Serial.readStringUntil('F'); //Baca Serial 'F'
    F = terima.toInt(); //Ubah data string Frekuensi
  }
  motor(dC,F);
}

void motor(double dc, double freq){
  T = 1000 / freq; //konversi frekuensi ke periode H2 (ms)
  tH = dc * T / 100; // menghitung tH dari duty cycle
  tL = T - tH; //menghitung tL
  //hitung periode
  //Serial.println(String(dc) + " % " + String(freq) + " Hz " + String(T) + " ms "
+ String(tH) + " ms " + String(tL) + " ms");
  Serial.println(freq); // menampilkan nilai frekuensi
```

```
digitalWrite(9,LOW); digitalWrite(10,HIGH); delay(tH);  
digitalWrite(9,HIGH);digitalWrite(10,LOW); delay(tL);  
//atur keluaran motor  
}
```

2. Pengujian driver

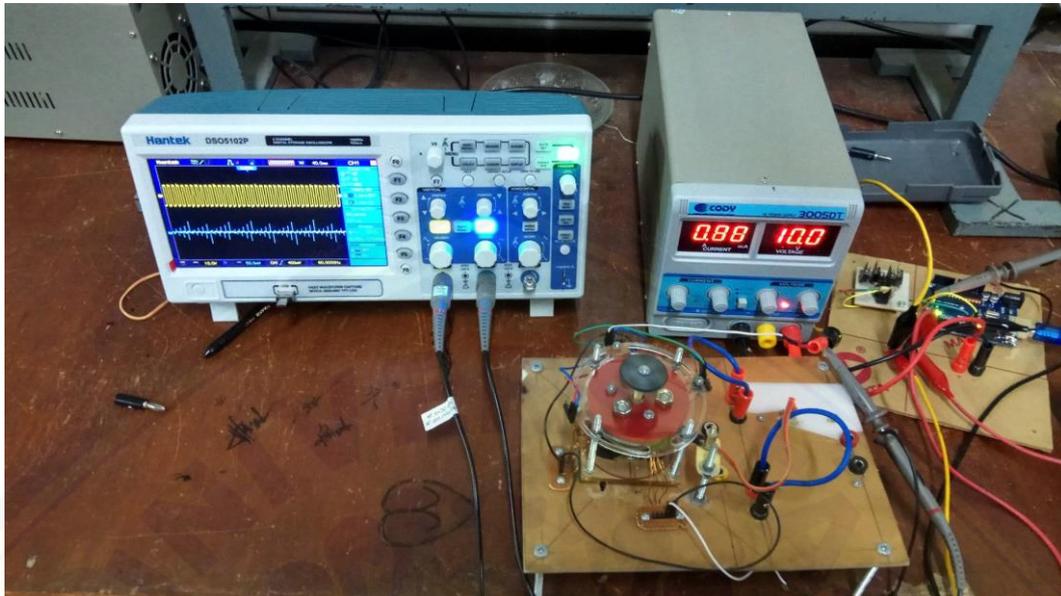
Pada gambar di bawah adalah waktu pengujian pada driver dan motor:



Gambar 1. Pengujian Tegangan, Arus Kecepatan dan Hasil Gelombang



Gambar 2. Pengujian Tegangan, Arus Kecepatan dan Hasil Gelombang



Gambar 3. Pengujian Tegangan, Arus Kecepatan dan Hasil Gelombang

3. Perhitungan Kecepatan

Dengan rumus kecepatan

$$N_s = \frac{120 \times f}{P}$$

- Pada Lilitan 100

Frekuensi 20-80

$$F(20) = N_s = \frac{120 \times 20}{6} = 400 \text{ rpm}$$

$$F(30) = N_s = \frac{120 \times 30}{6} = 600 \text{ rpm}$$

$$F(40) = N_s = \frac{120 \times 40}{6} = 800 \text{ rpm}$$

$$F(50) = N_s = \frac{120 \times 50}{6} = 1000 \text{ rpm}$$

$$F(60) = N_s = \frac{120 \times 60}{6} = 1200 \text{ rpm}$$

$$F(70) = N_s = \frac{120 \times 70}{6} = 1400 \text{ rpm}$$

$$F(80) = N_s = \frac{120 \times 80}{6} = 1600 \text{ rpm}$$

- Pada Lilitan 200

Frekuensi 20-80

$$F(20) = N_s = \frac{120 \times 20}{6} = 400 \text{ rpm}$$

$$F(30) = N_s = \frac{120 \times 30}{6} = 600 \text{ rpm}$$

$$F(40) = N_s = \frac{120 \times 40}{6} = 800 \text{ rpm}$$

$$F(50) = N_s = \frac{120 \times 50}{6} = 1000 \text{ rpm}$$

$$F(60) = N_s = \frac{120 \times 60}{6} = 1200 \text{ rpm}$$

$$F(70) = N_s = \frac{120 \times 70}{6} = 1400 \text{ rpm}$$

$$F(80) = N_s = \frac{120 \times 80}{6} = 1600 \text{ rpm}$$

- Pada Lilitan 300

Frekuensi 20-80

$$F(20) = N_s = \frac{120 \times 20}{6} = 400 \text{ rpm}$$

$$F(30) = N_s = \frac{120 \times 30}{6} = 600 \text{ rpm}$$

$$F(40) = N_s = \frac{120 \times 40}{6} = 800 \text{ rpm}$$

$$F(50) = N_s = \frac{120 \times 50}{6} = 1000 \text{ rpm}$$

$$F(60) = N_s = \frac{120 \times 60}{6} = 1200 \text{ rpm}$$

$$F(70) = N_s = \frac{120 \times 70}{6} = 1400 \text{ rpm}$$

$$F(80) = N_s = \frac{120 \times 80}{6} = 1600 \text{ rpm}$$

- Pada Lilitan 400

Frekuensi 20-80

$$F(20) = N_s = \frac{120 \times 20}{6} = 400 \text{ rpm}$$

$$F(30) = N_s = \frac{120 \times 30}{6} = 600 \text{ rpm}$$

$$F(40) = N_s = \frac{120 \times 40}{6} = 800 \text{ rpm}$$

$$F(50) = N_s = \frac{120 \times 50}{6} = 1000 \text{ rpm}$$

$$F(60) = N_s = \frac{120 \times 60}{6} = 1200 \text{ rpm}$$

$$F(70) = N_s = \frac{120 \times 70}{6} = 1400 \text{ rpm}$$

$$F(80) = N_s = \frac{120 \times 80}{6} = 1600 \text{ rpm}$$

4. Perhitungan error%

Dengan rumus Error Persent

$$\text{Error percent} = \left| \frac{\text{Data Perhitungan} - \text{Data Pengukuran}}{\text{Data Perhitungan}} \right| \times 100$$

- Pada lilitan 100

$$F(20) = E\% = \frac{400 - 395,6}{400} \times 100\% = 1,1\%$$

$$F(30) = E\% = \frac{600 - 616,5}{600} \times 100\% = 2,68\%$$

$$F(50) = E\% = \frac{800 - 818,5}{800} \times 100\% = 2,3\%$$

$$F(50) = E\% = \frac{1000 - 978,5}{1000} \times 100\% = 2,15\%$$

$$F(60) = E\% = \frac{1200 - 1214}{1200} \times 100\% = 1,16\%$$

$$F(70) = E\% = \frac{1400 - 1384}{1400} \times 100\% = 1,14\%$$

$$F(80) = E\% = \frac{1600 - 1607}{1600} \times 100\% = 0,43\%$$

- Pada lilitan 200

$$F(20) = E\% = \frac{400 - 395,6}{400} \times 100\% = 1,1\%$$

$$F(30) = E\% = \frac{600 - 616,5}{600} \times 100\% = 2,68\%$$

$$F(50) = E\% = \frac{800 - 818,5}{800} \times 100\% = 2,3\%$$

$$F(50) = E\% = \frac{1000-978,5}{1000} \times 100\% = 2,15\%$$

$$F(60) = E\% = \frac{1200-1214}{1200} \times 100\% = 1,16\%$$

$$F(70) = E\% = \frac{1400-1384}{1400} \times 100\% = 1,14\%$$

$$F(80) = E\% = \frac{1600-1607}{1600} \times 100\% = 0,43\%$$

- Pada lilitan 300

$$F(20) = E\% = \frac{400-395,6}{400} \times 100\% = 1,1\%$$

$$F(30) = E\% = \frac{600-616,5}{600} \times 100\% = 2,68\%$$

$$F(50) = E\% = \frac{800-818,5}{800} \times 100\% = 2,3\%$$

$$F(50) = E\% = \frac{1000-978,5}{1000} \times 100\% = 2,15\%$$

$$F(60) = E\% = \frac{1200-1214}{1200} \times 100\% = 1,16\%$$

$$F(70) = E\% = \frac{1400-1384}{1400} \times 100\% = 1,14\%$$

$$F(80) = E\% = \frac{1600-1607}{1600} \times 100\% = 0,43\%$$

- Pada lilitan 400

$$F(20) = E\% = \frac{400-395,6}{400} \times 100\% = 1,1\%$$

$$F(30) = E\% = \frac{600-616,5}{600} \times 100\% = 2,68\%$$

$$F(50) = E\% = \frac{800-818,5}{800} \times 100\% = 2,3\%$$

$$F(50) = E\% = \frac{1000-978,5}{1000} \times 100\% = 2,15\%$$

$$F(60) = E\% = \frac{1200-1214}{1200} \times 100\% = 1,16\%$$

$$F(70) = E\% = \frac{1400-1384}{1400} \times 100\% = 1,14\%$$

$$F(80) = E\% = \frac{1600-1607}{1600} \times 100\% = 0,43\%$$