

**PERANCANGAN DAN ANALISIS SISTEM KENDALI MOTOR
TANPA SIKAT ARUS SEARAH ATAU *BRUSHLESS DIRECT
CURRENT (BLDC) MOTOR* TIGA FASA DENGAN ISOLATED
GATE DRIVER**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik



Oleh :

ADRIAN SETA EKANANDA

NIM. I0716002

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SEBELAS MARET SURAKARTA
2020**

ABSTRAK

Adrian Seta Ekananda

PERANCANGAN DAN ANALISIS SISTEM KENDALI MOTOR TANPA SIKAT ARUS SEARAH ATAU *BRUSHLESS DIRECT CURRENT* (BLDC) MOTOR TIGA FASA DENGAN ISOLATED GATE DRIVER

Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) atau motor tanpa sikat arus searah merupakan salah satu jenis motor DC yang biasa digunakan untuk sepeda listrik, motor listrik, maupun mobil listrik. Penggunaan motor BLDC lebih banyak digunakan untuk kendaraan dibandingkan dengan jenis motor DC yang lain dikarenakan banyak keunggulan yang dimiliki motor BLDC terutama dalam melakukan kontrol yang lebih akurat. Supaya motor BLDC dapat dikendalikan secara akurat, maka dibutuhkan suatu alat untuk menggerakkan dan mengendalikan putaran motor BLDC yang biasa disebut dengan penggerak daya atau *driver* motor BLDC. *Driver* motor BLDC merupakan suatu kesatuan rangkaian elektronika daya dan untuk melakukan pengendalian kecepatannya dibutuhkan rangkaian kontrol. Pada penelitian ini *driver* motor BLDC akan membuat sistem kontrol yang optimal pada motor BLDC. Penelitian dilakukan dengan merancang sistem kendali supaya kecepatan motor tetap stabil pada tingkatan tertentu dan melakukan kalibrasi sensor tegangan dan sensor arus yang terpasang pada *driver* motor. Kecepatan motor akan dikendalikan dengan memasukkan nilai PWM (*Pulse Width Modulation*), dimana setiap nilai PWM menghasilkan kecepatan yang berbeda-beda. *Driver* yang akan dirancang menggunakan jenis *Isolated Gate Driver* menggunakan IC optocoupler PC817 yang berfungsi mengisolasi antara rangkaian daya dan rangkaian kontrol, dan sebagai driver MOSFET supaya dapat melakukan *switching*. Pengujian sistem dilakukan dengan memberikan variasi beban berupa anak timbangan ke motor, sehingga kecepatan motor akan menurun ketika sudah mencapai set poin dan dapat kembali ke titik *steady state*. Hasil dari pengujian ini menunjukkan bahwa motor memiliki rata-rata efisiensi sebesar 35.74% pada pengukuran dengan multimeter dan 19,93% pada pengukuran dengan sensor dan rangkaian driver mengkonsumsi daya dengan rata-rata sebesar 1680 mW pada pengukuran dengan multimeter dan 1032 mW pada pengukuran dengan sensor.

Kata Kunci : *Motor BLDC, driver motor BLDC, Isolated Gate Driver, PWM*

ABSTRACT

Adrian Seta Ekananda

DESIGN AND ANALYSIS OF THREE-PHASE BRUSHLESS DIRECT CURRENT (BLDC) MOTOR CONTROL SYSTEM WITH ISOLATED GATE DRIVER

Brushless Direct Current (BLDC) motor or direct current brushless motor is one type of DC motor that is commonly used for electric bicycles, electric motors, and electric cars. The use of BLDC motors is more widely used for vehicles compared to other types of DC motors because there are many advantages of a BLDC motor, especially in carrying out a more accurate control. BLDC motor. In order to be able to control it accurately, a device is needed to drive and control the rotation of the BLDC motor which is commonly referred to as a power driver or BLDC motor driver. The BLDC motor driver is an integrated power electronic circuit and to control it, a control circuit is needed. In the research of BLDC motor drivers, it will make an optimal control system for the BLDC motor. The research was conducted by designing a control system so that the motor speed remains stable at a certain level and calibrating the voltage sensor and current sensor attached to the motor driver. The motor speed will be controlled by entering the PWM (Pulse Width Modulation) value, where each PWM value produces a different speed. The driver to be designed uses the Isolated Gate Driver type using the PC817 optocoupler IC which functions to isolate between the power circuit and the control circuit, and as a MOSFET driver so that it can perform switching. System testing is carried out by providing load variations in the form of weights to the motor, so that the motor speed will decrease when it reaches the set point and can return to the steady state point. The results of this test show that the motor has an average efficiency of 35.74% in measurements with a multimeter and 19.93% in measurements with sensors and driver circuits consuming an average of 1680 mW in measurements with a multimeter and 1032 mW in measurements with sensor.

Keywords :BLDC motor, BLDC motor driver , Isolated Gate Driver, PWM

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	ix
KATA PENGANTAR	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan.....	5
1.4 Manfaat.....	5
1.5 Sistematika Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Penelitian Terdahulu.....	7
2.2 Motor BLDC	10
2.3 Rangkaian Kontrol Motor BLDC.....	14
2.4 Sensor Hall	15
2.5 Arduino Uno R3	16
2.2.1 Spesifikasi Arduino Uno R3	17
2.2.2 Spesifikasi Pin Arduino Uno R3	18
2.2.3 Fungsi Pin Khusus.....	18
2.6 MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)	19
2.7 Optocoupler PC817	21
2.8 Pull Resistor.....	23
2.9 Isolated Gate Driver	25
2.10 Inverter Full Bridge Tiga Fasa.....	27
2.11 Pulse Width Modulation (PWM).....	27
2.12 Sensor Tegangan DC (Pembagi Tegangan).....	28
2.13 Sensor Arus ACS712	29
2.14 Parameter Performa	30
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	31

3.1	Alur Penelitian.....	31
3.2	Alat dan Bahan	33
3.3	Perancangan Sistem.....	35
3.4	Perancangan dan Pembuatan Perangkat Keras (<i>Hardware</i>).....	36
3.4.1	Perancangan Driver MOSFET 3 Fasa.....	37
3.4.2	Perancangan Sensor Tegangan.....	38
3.4.3	Perancangan Sensor Arus.....	39
3.5	Perancangan Perangkat Lunak (<i>Software</i>).....	40
3.5.1	Perancangan Algoritma Pembacaan Sensor Hall	42
3.5.2	Perancangan Algoritma Kendali Motor BLDC.....	46
3.5.3	Perancangan Algoritma Pembacaan Tegangan, Arus, dan Kecepatan Motor BLDC	47
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		49
4.1	Hasil Simulasi.....	49
4.1.1	Gelombang Keluaran Sensor Hall.....	49
4.1.2	Gelombang Keluaran PWM.....	50
4.1.3	Gelombang Keluaran Output Motor BLDC.....	51
4.2	Pembuatan Alat	53
4.3	Pengujian Gelombang Keluaran Driver	56
4.3.1	Gelombang Keluaran Ketiga Fasa	56
4.3.2	Gelombang Keluaran PWM.....	57
4.3.3	Gelombang Keluaran Sensor Hall.....	58
4.4	Pengujian Kalibrasi Sensor Tegangan.....	59
4.4.1	Hasil Pembacaan Tegangan	60
4.4.2	Hubungan Perubahan PWM dan Tegangan	61
4.5	Pengujian Kalibrasi Sensor Arus.....	61
4.5.1	Hasil Pembacaan Sensor Arus	61
4.5.2	Hubungan Perubahan PWM dan Arus	62
4.6	Pengujian Pembacaan Kecepatan Motor BLDC	63
4.6.1	Hasil Pembacaan Kecepatan Motor BLDC pada Variasi Nilai PWM	63
4.6.2	Grafik Regresi Perubahan PWM dan Nilai Kecepatan Motor	64
4.7	Perbandingan Kecepatan Motor BLDC dengan Coding dan dengan Tachometer.....	65

4.7.1	Hasil Pembacaan Kecepatan	66
4.7.2	Perbandingan Nilai Kecepatan dengan Coding Arduino dan dengan Tachometer.....	66
4.8	Pengujian Kecepatan Motor BLDC pada Setpoin 60% dari Kecepatan Maksimum.....	67
4.8.1	Penetapan Nilai PWM Berdasarkan Nilai Regresi.....	67
4.8.2	Pengujian Respon Motor BLDC pada Setpoin Kecepatan.....	67
4.9	Pengujian Kecepatan Motor BLDC pada Variasi Pembebanan	68
4.9.1	Hasil Pembacaan Driver Dengan Beban 100 gram.....	69
4.9.2	Hasil Pembacaan Driver Dengan Beban 200 gram.....	70
4.9.3	Hasil Pembacaan Driver Dengan Beban 300 gram.....	71
4.10	Analisis Perbandingan Efisiensi Motor BLDC.....	73
4.10.1	Pengukuran Efisiensi Motor BLDC dengan Multimeter	74
4.10.2	Pengukuran Efisiensi Motor BLDC dengan Sensor.....	74
4.10.3	Perbandingan Perhitungan Efisiensi Motor BLDC.....	75
BAB V KESIMPULAN.....		76
5.1	Kesimpulan.....	76
5.2	Saran	77
DAFTAR PUSTAKA		78
LAMPIRAN.....		81

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Motor Brushless DC.....	12
Gambar 2. 2 Rangkaian Ekvivalen Motor BLDC.....	13
Gambar 2. 3 Blok Diagram Rangkaian Kontrol Motor BLDC.....	14
Gambar 2. 4 Sensor Hall	15
Gambar 2. 5 Konstruksi Penempatan Sensor Hall pada Motor BLDC.....	16
Gambar 2. 6 Arduino Uno R3.....	17
Gambar 2. 7 MOSFET	20
Gambar 2. 8 MOSFET IRF540N	21
Gambar 2. 9 MOSFET IRF4905	21
Gambar 2. 10 Optocoupler PC817	23
Gambar 2. 11 Pull Up Resistor	24
Gambar 2. 12 Pull Down Resistor.....	25
Gambar 2. 13 Isolated Driver PC817	26
Gambar 2. 14 Pulse Width Modulation.....	28
Gambar 2. 15 Rangkaian Pembagi Tegangan	29
Gambar 2. 16 Sensor Arus ACS712	30
Gambar 3. 1 Alur Penelitian.....	32
Gambar 3. 2 Blok Diagram Sistem Kontrol Motor BLDC	36
Gambar 3. 3 Diagram Alir Pembuatan Hardware Driver Motor BLDC.....	37
Gambar 3. 4 Rangkaian Driver MOSFET 3 Fasa	38
Gambar 3. 5 Sensor Tegangan Input.....	39
Gambar 3. 6 Sensor Tegangan Output	39
Gambar 3. 7 Sensor Arus Input.....	40
Gambar 3. 8 Sensor Arus Output	40
Gambar 3. 9 Perancangan Software	41
Gambar 3. 10 Perubahan komutasi motor step 1 dan step 2	42
Gambar 3. 11 Perubahan komutasi motor step 3 dan step 4	43
Gambar 3. 12 Perubahan komutasi motor step 5 dan step 6	44
Gambar 3. 13 Algoritma Pembacaan Sensor Hall	45
Gambar 3. 14 Algoritma Sistem Kendali Motor BLDC	46
Gambar 3. 15 Algoritma Sistem Monitoring	48
Gambar 4. 1 Simulasi Gelombang Keluaran Sensor Hall.....	49
Gambar 4. 2 Simulasi Gelombang PWM Ketiga Fasa.....	51
Gambar 4. 3 Simulasi Gelombang Keluaran Fasa UVW	52
Gambar 4. 4 Desain Alat pada Eagle	54
Gambar 4. 5 Layout PCB	55
Gambar 4. 6 Hardware Driver.....	55
Gambar 4. 7 Gelombang Keluaran Fasa UVW	57
Gambar 4. 8 Gelombang PWM Fasa UVW	58
Gambar 4. 9 Gelombang Keluaran Sensor Hall.....	59
Gambar 4. 10 Grafik Perbandingan Nilai Tegangan pada Pengukuran dengan Multimeter dan dengan Sensor beserta Hubungan Tegangan dengan PWM.....	61

Gambar 4. 11 Grafik Perbandingan Nilai Arus pada Pengukuran dengan Multimeter dan dengan Sensor beserta Hubungan Arus dengan PWM.....	63
Gambar 4. 12 Grafik Perbandingan Nilai PWM dan Kecepatan Motor	65
Gambar 4. 13 Penghitungan Kecepatan Motor BLDC dengan Tachometer.....	65
Gambar 4. 14 Grafik Perbandingan Nilai Kecepatan pada Pengukuran dengan Coding Arduino dan dengan Tachometer beserta Hubungan Kecepatan dengan PWM	67
Gambar 4. 15 Grafik Respon Transien Motor BLDC.....	68
Gambar 4. 16 Kondisi Motor BLDC pada Pembebanan 100 gram	69
Gambar 4. 17 Grafik Pembebanan 100 gram.....	70
Gambar 4. 18 Kondisi Motor BLDC pada Pembebanan 200 gram	71
Gambar 4. 19 Grafik Pembebanan 200 gram.....	71
Gambar 4. 20 Kondisi Motor BLDC pada Pembebanan 300 gram	72
Gambar 4. 21 Grafik Pembebanan 300 gram.....	73
Gambar 4. 22 Grafik Perbandingan Nilai Efisiensi Motor BLDC.....	75

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Rangkuman Penelitian Terdahulu	7
Tabel 2. 2 Perbedaan In-Runner Motor dan Out-Runner Motor.....	13
Tabel 2. 3 Spesifikasi Umum Arduino UNO R3	17
Tabel 2. 4 Spesifikasi Pin Arduino UNO R3	18
Tabel 2. 5 Daftar Special Pin Arduino UNO R3.....	19
Tabel 3. 1 Alat dan Bahan.....	33
Tabel 3. 2 Konfigurasi Sensor Hall pada Motor BLDC.....	42
Tabel 4. 1 Perbandingan Simulasi Kondisi Ketiga Sensor Hall	50
Tabel 4. 2 Perbandingan Simulasi Nilai PWM Ketiga Fasa	51
Tabel 4. 3 Perbandingan Simulasi Kondisi Keluaran Ketiga Fasa	52
Tabel 4. 4 Perbandingan Keluaran Ketiga Fasa	57
Tabel 4. 5 Perbandingan Nilai PWM Ketiga Fasa	58
Tabel 4. 6 Perbandingan Kondisi Ketiga Sensor Hall.....	59
Tabel 4. 7 Perbandingan Pengukuran Nilai Tegangan dengan Multimeter dan dengan Sensor Tegangan dan Hubungan Nilai Tegangan dengan PWM	60
Tabel 4. 8 Perbandingan Pengukuran Nilai Arus dengan Multimeter dan dengan Sensor Arus dan Hubungan Nilai Arus dengan PWM.....	62
Tabel 4. 9 Perbandingan Nilai PWM dengan Kecepatan Motor.....	64
Tabel 4. 10 Perbandingan Pengukuran Kecepatan Motor BLDC dengan Coding dan dengan Tachometer beserta Hubungan Kecepatan dengan PWM	66
Tabel 4. 11 Pengujian Motor dengan Setpoint Kecepatan 60% dari Kecepatan Maksimum.....	68
Tabel 4. 12 Pengujian Motor BLDC dengan Beban 100 gram	69
Tabel 4. 13 Pengujian Motor BLDC dengan Beban 200 gram	71
Tabel 4. 14 Pengujian Motor BLDC dengan Beban 300 gram	72
Tabel 4. 15 Perhitungan Efisiensi dengan Pengukuran Daya Menggunakan Multimeter.....	74
Tabel 4. 16 Perhitungan Efisiensi dengan Pengukuran Daya Menggunakan Sensor	75

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah *Subhanahu Wa Ta'ala* yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Perancangan dan Analisis Sistem Kendali Motor Tanpa Sikat atau *Brushless Direct Current (BLDC) Motor* Tiga Fasa dengan *Isolated Gate Driver*”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Universitas Sebelas Maret Surakarta.

Penulis tidak akan sampai pada tahap ini dan skripsi ini tidak akan pernah selesai jika penulis tidak mendapat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Penulis hendak menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Feri Adriyanto, Ph.D, selaku Pembimbing I dan Bapak Hari Maghfiroh, S.T., M.Eng selaku Pembimbing II yang selalu memberikan pengarahan, ide, saran, ilmu, bimbingan dan motivasi selama perkuliahan di Teknik Elektro sampai pengerjaan skripsi ini.
2. Bapak Dr. Miftahul Anwar S.Si., M.Eng, selaku Dosen Penguji I dan Bapak Agus Ramelan S.Pd., M.T selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan dukungan, ide, dan motivasi selama pengerjaan skripsi ini.
3. Bapak Dr.Ir.Augustinus Sudjono, M.T.selaku Pembimbing Akademik yang selalu memberikan bimbingan dan pemahaman yang baik mengenai perkuliahan.
4. Seluruh Dosen Program Studi Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat, motivasi, masukan dan inspirasi selama masa perkuliahan penulis.
5. Teman-teman Teknik Elektro 2016 dan Mekatronika 2016 yang telah bersama-sama berjuang dari nol selama masa perkuliahan penulis.
6. Teman-teman Lucy In The Sky yang sudah menjadi pelepas penat dan pemberi motivasi bagi penulis selama mengerjakan tugas skripsi ini
7. Keluarga tercinta, Bapak M. Taufiq Prayudono dan Ibu Dr. Retno Setianing, serta kedua adik saya, Alysha dan Avanto, yang selalu sabar memberikan

semangat, motivasi, nasehat serta doa restu sehingga penulis dapat menyelesaikan pengerjaan skripsi ini.

8. dan semua pihak yang telah memberikan bantuan, yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih belum sempurna. Penulis juga memohon maaf apabila terdapat kesalahan dalam penulisan skripsi ini.

Surakarta, 25 November 2020

Penulis

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Mesin listrik merupakan salah satu alat yang sangat penting dalam perkembangan teknologi yang pesat dan adanya berbagai inovasi baru yang mulai bermunculan untuk menunjang kehidupan sehari-hari. Hal itu disebabkan oleh karakteristik mesin listrik yang merupakan mesin ramah lingkungan karena mengeluarkan sedikit gas buangan jika dibandingkan dengan mesin bakar [1].

Motor DC merupakan salah satu alternatif, berupa perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dengan tegangan searah sebagai sumber tenaganya. Motor DC dapat membantu kegiatan manusia dalam menggerakkan suatu sistem, misalnya fungsi motor DC di bidang transportasi, industri, dan peralatan rumah tangga. Hal-hal tersebut menunjukkan bahwa teknologi yang berkembang saat ini dalam rangka memenuhi kebutuhan dan memudahkan kegiatan manusia semakin banyak yang melibatkan motor DC [2].

Motor DC terdiri dari beberapa jenis seperti motor DC konvensional, motor stepper, motor *brushless* DC dan lain-lain. Motor yang biasa digunakan dalam membantu kegiatan manusia adalah motor DC konvensional atau motor DC bersikat (*brushed*). Namun motor DC konvensional memiliki banyak kekurangan dari segi efisiensi dibandingkan dengan motor BLDC (*Brushless Direct Current*) [2]. Selain itu, apabila dibandingkan dengan motor DC konvensional, motor BLDC memiliki kelebihan antara lain, karakteristik kecepatan dengan rentang yang lebar, tahan lama dan rendahnya tingkat *noise* dibanding dengan motor induksi dan motor DC konvensional [3].

Motor BLDC merupakan motor DC yang mempunyai karakteristik berupa torsi yang besar dan daya yang kecil [4]. Jenis motor DC ini tidak memiliki sikat dan komutator, sehingga motor BLDC hanya

membutuhkan sedikit perawatan dan dapat beroperasi lebih tenang dibanding motor DC [5]. Sifat inilah yang membuat motor BLDC menjadi sangat populer digunakan di berbagai bidang. Motor BLDC terbagi menjadi 2 jenis, yaitu *sensored* dan *sensorless*. Perbedaan keduanya terletak pada pemantauan posisi rotor yang digunakan, dimana *sensored* BLDC menggunakan sensor *hall effect* untuk memantau posisi rotor. Sedangkan pada jenis *sensorless* BLDC, tidak menggunakan sensor untuk memantau posisi rotor, namun menggunakan deteksi *Back EMF*.

Terdapat suatu kelemahan pada motor BLDC yaitu sulitnya dalam mengatur kecepatan. Karena pada dasarnya pengaturan kecepatan motor BLDC dilakukan dengan mengubah jumlah kutub motor atau mengubah frekuensi suplai motor. Pengaturan kecepatan motor BLDC dapat dilakukan dengan mengubah frekuensi suplai motor yang lebih mudah dan tidak terbatas, sedangkan dengan mengubah jumlah kutub akan sangat sulit karena dilakukan dengan merubah konstruksi fisik motor tersebut [6]. Oleh sebab itu, peneliti akan merancang sebuah *driver* motor tiga fasa dengan menggunakan rangkaian *inverter* yang dapat merubah masukan listrik DC menjadi listrik AC tiga fasa untuk mengatur kecepatan motor BLDC dengan menggunakan MOSFET dan dikendalikan oleh mikrokontroler untuk digunakan sebagai penyulut MOSFET pada *driver* motor, dimana nilai kecepatan motor akan terbaca oleh salah satu pin sensor-Hall yang dihubungkan ke pin *interrupt* mikrokontroler. Manfaatnya kita dapat mengetahui sistem kerja dan komutasi pada motor BLDC, serta dapat mengendalikan inverter tiga fasa.

Pada penelitian ini, motor BLDC yang digunakan merupakan jenis motor sinkron 3 fasa. Agar dapat beroperasi, Motor BLDC membutuhkan sebuah *driver* untuk menggerakkan motor dan melakukan pengendalian kecepatan. Pada umumnya, *driver* motor terdiri dari kumpulan komponen elektronik seperti IC, resistor, dan transistor. *Driver* motor BLDC ini menggunakan sumber utama *power supply* dengan modifikasi

tegangan DC menggunakan sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) yang menghasilkan tegangan DC dengan sinyal berbentuk kotak/trapesium. Driver motor BLDC kebanyakan menggunakan 6 inverter *switch* untuk pergantian karaktersitik elektronik yang dapat berubah menjadi tegangan AC 3 fasa dan sensor-Hall untuk mendeteksi posisi rotor [7].

Driver motor yang digunakan kali ini adalah jenis *isolated gate driver*. Metode ini digunakan karena memungkinkan suplai sinyal pengendali tegangan titik G terhadap S diberikan dari IC (*Integrated Circuit*) PC817 sebagai *optocoupler* tanpa perlu mematikan salah satu MOSFET. Tegangan tersebut bernama *voltage gate to source* (V_{GS}). *Optocoupler* digunakan sebagai penghubung antara rangkaian kontrol dengan rangkaian daya dimana keduanya terisolasi. *Optocoupler* dapat melindungi mikrokontroler bertegangan rendah dari beban motor BLDC bertegangan tinggi. Kelebihan lainnya adalah metode ini memungkinkan performa yang lebih cepat dalam pensaklaran karena tidak perlu menunggu kapasitor penuh, selain itu MOSFET bisa dinyalakan lebih lama karena sumber tegangan selalu tersedia selama tidak hilang atau dimatikan. Namun metode ini memiliki kelemahan diantaranya harus menggunakan suplai terpisah sehingga membutuhkan suplai tambahan dari luar yang disebabkan oleh terisolasinya rangkaian kontrol dan rangkaian daya, suplai tersebut dapat diperoleh dari *power supply* atau dari baterai tambahan. Suplai tegangan berupa tegangan DC dengan besar tidak melebihi batas kemampuan V_{GS} dari MOSFET. Karena sumber suplai V_{GS} adalah sumber terpisah maka terminal negatif dari sumber utama tidak boleh bertemu dengan terminal negatif sumber terpisah lainnya. Untuk mengatasi hal itu sinyal kendali juga terpisah referensi *ground* dari rangkaian kemudi sehingga dibutuhkan komponen *optocoupler* yang akan memisahkan referensi *ground* [8].

Sistem kendali yang akan dirancang merupakan sistem kendali *programmable*. Sistem tersebut dapat diprogram ulang sesuai dengan keadaan medan dan pembebanan berupa air. Perancangan sistem ini menggunakan mikrokontroler Arduino Uno sebagai otak dari rangkaian

dan memanfaatkan IC optocoupler PC817 menjadi *isolated gate driver* untuk mengatur *switching* HIGH/LOW pada mosfet. *Driver* menerima input HIGH/LOW dari mikrokontroler Arduino yang kemudian diteruskan ke inverter. Pengendalian melalui mikrokontroler Arduino dilakukan dengan menggunakan prinsip PWM (*Pulse Width Modulation*). Parameter dari kondisi sistem dipantau dengan menggunakan dua buah sensor, yaitu sensor arus dan sensor tegangan pada salah satu input dan output sehingga dapat mengetahui seberapa efisien cara kerja *driver* motor tersebut. Data pembacaan sensor tersebut kemudian diteruskan ke mikrokontroler Arduino sebagai *feedback* untuk diolah dan dapat memberikan respon ke sistem. Kemudian sensor arus dan sensor tegangan akan dikalibrasi dengan pengukuran di multimeter.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah diuraikan sebelumnya, dapat ditentukan rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana sistem kontrol pada motor BLDC ?
2. Bagaimana cara kerja *driver* dalam menggerakkan motor BLDC dan penerapan kalibrasi sensor pada sistem kontrol ?
3. Bagaimana respon motor BLDC ketika diberi variasi pembebanan dan perbandingan pengukuran efisiensi motor dengan multimeter dan dengan sensor daya pada perancangan *isolated gate driver* motor BLDC ?

Ruang lingkup permasalahan yang diangkat pada penelitian ini akan diberi Batasan pada :

1. Menggunakan Motor BLDC 24 V 200 W sebagai alat uji.
2. Kecepatan motor BLDC dikontrol dengan memberikan nilai PWM secara manual.
3. Motor BLDC diberikan suplai sebesar 12 V sehingga kecepatan tertinggi pada PWM tertentu bukan merupakan kecepatan maksimum motor.

4. Motor BLDC mampu berputar dengan torsi maksimum 1.31 N.m dan berat maksimum 52.4 kg.
5. Pembebanan hanya dilakukan dengan tiga variasi, yaitu 100 gram, 200 gram, dan 300 gram.

1.3 Tujuan

Tujuan dari proyek akhir ini adalah :

1. Mendesain sistem kontrol motor BLDC.
2. Mengetahui cara kerja sistem kontrol motor BLDC berdasarkan dari teori yang sudah didapatkan dan menerapkan kalibrasi sensor sehingga pembacaan sensor lebih akurat dan presisi
3. Mengetahui respon kecepatan motor BLDC ketika diberi beban dan membandingkan pengukuran efisiensi motor BLDC dengan multimeter dan dengan sensor daya

1.4 Manfaat

Manfaat dari proyek akhir ini adalah :

1. Merealisasikan perancangan *hardware driver* motor untuk sistem kendali motor BLDC yang efisien.
2. Mengetahui teori dan simulasi pengontrolan sistem kendali motor BLDC.
3. Menghasilkan sebuah karya yang akan dipublikasi dan digunakan untuk pengembangan teknologi dalam dunia industri.

1.5 Sistematika Penelitian

Sistematika penulisan yang digunakan penulis agar proposal skripsi ini mudah dipahami adalah sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Pada bab ini memberikan penjelasan singkat mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat dan sistematika penulisan.

BAB II : KAJIAN PUSTAKA

Pada bab ini berisi uraian sistematis mengenai dasar-dasar teori dari Motor BLDC, Isolated Gate Driver, serta kaitan dengan penelitian sebelumnya, dengan fokus utama pembahasan adalah pada perancangan driver untuk motor BLDC

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini menceritakan metoda dan perancangan kontrol motor BLDC. Untuk metodanya terdiri dari serangkaian tahap seperti, perancangan *hardware*, pembuatan *hardware*, dan perancangan *software*.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisi tentang implementasi, perbandingan dan data pengujian, data ujicoba, grafik perbandingan dan analisis proses penelitian.

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini menjelaskan tentang kesimpulan dan saran dari penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dilakukan, penulis mencoba merancang sebuah sistem kendali dengan menambahkan metode kendali PID untuk merespon beban yang diberikan ke motor BLDC. Pengujian sistem dilakukan dengan menetapkan kecepatan konstan ke motor BLDC dengan nilai PWM, kemudian dilanjutkan dengan menetapkan set point kecepatan ke motor BLDC, yang kemudian diberikan variasi beban, sehingga menurunkan kecepatan dari motor BLDC. Motor BLDC akan diupayakan untuk mengejar set point yang telah diberikan, dengan menambahkan nilai PWM ke sistem kendali pada *driver* motor. Sistem ini juga dilengkapi dengan *switching* yang dipengaruhi oleh logika pada MOSFET dan optocoupler dengan perintah mikrokontroler

Selain itu juga dibandingkan sistem yang sudah ada, adalah pada bagian monitoring, dimana pada sistem ini ditampilkan di serial monitor pada aplikasi Arduino IDE yang berperan menampilkan kondisi sistem berupa kecepatan, pwm, dan arus pada motor berdasarkan metode kendali PID dan kondisi beban pada motor.

Tabel 2. 1 Rangkuman Penelitian Terdahulu

No	Pengarang	Judul	Metoda	Hasil
1	Akbar. D, 2019 [1].	Pengaturan Kecepatan Pada Motor Brushless DC (BLDC) Menggunakan PWM (<i>Pulse</i>	Kontrol kecepatan motor BLDC yang diaplikasikan pada alat transportasi menggunakan inverter 3 fasa serta dijalankan	Pada penelitian ini, dihasilkan PWM yang mengendalikan duty cycle yang berpengaruh pada nilai tegangan dan

		<i>Width Modulation)</i>	menggunakan sinyal PWM	arus motor BLDC.
2	Aspalli, M.S, 2015 [4].	Speed control of BLDC Motor with Four Switch Three Phase Inverter using Digital Signal Controller	Simulasi menggunakan MATLAB/Simulink dan perancangan sistem kendali motor BLDC menggunakan inverter 3 fasa 4 saklar dan kendali sinyal digital dengan biaya minimum.	Hardware yang dirancang dapat beroperasi dengan baik, dimana nilai hasil pengujian mendekati nilai hasil simulasi. Penggunaan 4 saklar pada inverter dapat mengurangi biaya yang dibutuhkan tanpa menurunkan performa sistem secara signifikan
3	Andika, R. J, 2018 [6].	Perancangan dan Implementasi Driver Motor Tiga Fasa untuk Pengendali Kecepatan Motor BLDC berbasis PWM	Perancangan sebuah driver motor tiga fasa dengan menggunakan rangkaian inverter yang dapat merubah masukan listrik DC menjadi listrik AC tiga fasa untuk	Penelitian ini berhasil dan menunjukkan bahwa kecepatan motor BLDC berbanding lurus dengan

		pada Mobil Listrik	mengatur kecepatan motor BLDC dengan menggunakan MOSFET dan dikendalikan oleh mikrokontroller untuk digunakan sebagai penyulutan MOSFET pada driver motor.	nilai frekuensi motor
4	Ebadpour, M, 2017 [5].	Modeling and Synchronized Control of Dual Parallel Brushless Direct Current Motors with Single Inverter	Simulasi sistem kendali 2 motor BLDC dengan satu buah inverter 3 fasa, menggunakan software MATLAB/Simulink.	Sistem yang diusulkan dapat beroperasi dengan baik dan mengurangi berat, volume dan biaya dari sistem kendali motor BLDC pada kendaraan listrik. Sistem ini memiliki respon terhadap perubahan torsi yang baik, stabilitas dan sinkronisasi terhadap kondisi jalan yang

				baik, dan meningkatkan performa terhadap overshoot dan osilasi pada kondisi putaran yang bervariasi.
5	Karnap, S, 2018 [9].	Development of a Motor Controller for Electric Bicycles	Simulasi menggunakan software Proteus dan rancang bangun 2 jenis sistem drive motor BLDC, sensored dan sensorless (optocoupler) menggunakan IC IR2110.	Hardware yang dirancang dapat menghidupkan motor BLDC dan dapat melakukan pengendalian dengan baik. Namun durasi pengoperasian masih terbatas, karena pemilihan spesifikasi MOSFET yang kurang sesuai sehingga mengakibatkan panas berlebih.

2.2 Motor BLDC

Motor BLDC bekerja menggunakan prinsip gaya tarik antara dua magnet yang berlainan kutub atau gaya tolak antara dua magnet dengan kutub yang sama. Rotor pada motor BLDC tersusun dari magnet permanen

sehingga kutubnya tetap sedangkan stator terbuat dari belitan tembaga sehingga kutub magnet tersebut dapat berubah tergantung polaritas arus belitan stator yang diberikan. [1].

Motor BLDC adalah salah satu jenis motor sinkron magnet permanen yang disuplai oleh sumber listrik DC pada kontrolnya, dan membutuhkan sumber listrik AC tiga fasa untuk menggerakkan bagian rotor motornya. Sumber listrik AC tiga fasa dibutuhkan karena motor sinkron magnet permanen ini memiliki 3 buah koil pada stator, kemudian hubungan antara koil dan belitan stator trapezoidal akan memberikan *electro motive back trapezoidal* (gaya gerak listrik balik trapezoidal) yaitu tegangan balik yang dihasilkan oleh belitan motor brushless DC yang akan menggerakkan rotor. Pergerakan pada rotor ini disebabkan oleh medan magnet pada stator yang pada setiap saatnya hanya dua fasa yang tersuplai sementara satu fasa lainnya tak tersuplai. Fenomena ini mengakibatkan motor ini seperti motor DC, karena arus yang mengalir pada kumparan stator mirip dengan motor DC meskipun motor ini sebenarnya dialiri dengan arus tiga fasa [2]. Motor BLDC disebut juga motor sinkron karena medan magnet dihasilkan oleh stator dan rotor berputar pada frekuensi yang sama.

Motor BLDC dengan *trapezoidal back-EMF* dirubah secara elektronik merupakan motor yang sangat handal dan membutuhkan lebih sedikit perawatan karena dihilangkannya suku cadang yang aus seperti komutator mekanik standar dan perakitan sikat. Motor BLDC ini digunakan secara luas dalam bidang medis, penerbangan, kendaraan listrik, industri dan aplikasi kontrol gerak pertahanan. Karena banyak pengaplikasian dan perawatannya yang lebih sedikit membuat motor BLDC menjadi motor yang sering dicari oleh produsen di semua bidang tersebut, sehingga *driver* motor BLDC menjadi lebih populer karena tingginya efisiensi daya, torsi tinggi terhadap berat dan rasio inersia, kepadatan daya tinggi, dinamis tinggi respons, keandalan tinggi, ukuran kompak dan kontrol sederhana [2].

Sesuai namanya, motor BLDC tidak menggunakan sikat pada bagian komutator. Motor BLDC melakukan komutasi secara elektris. Pengubahan arah arus dilakukan dengan pengendalian saklar pada inverter. Kebanyakan

motor BLDC menggunakan belitan 3 fase dengan topologi Y (*star*). Motor dengan topologi ini digerakkan dengan meng-*energize* dua fase pada saat yang bersamaan. Satu putaran motor terdiri dari enam tahap aliran arus. Dengan mengalirkan arus listrik dari terminal U menuju terminal V (urutan 1), motor akan menuju posisi tertentu dan diam pada posisi tersebut. Ketika fase yang dialiri arus diubah dari terminal W ke U maka motor akan berputar sejauh 60° elektrik. Satu putaran elektrik dapat dilakukan dengan mengalirkan arus sesuai dengan urutan komutasinya. Arah putaran motor BLDC dapat dirubah dengan membalik urutan arus tanpa harus menukar kedua fasenya secara fisik. Inti dari komutasi motor BLDC adalah mengetahui posisi rotor lalu meng-*energize* fase sehingga menghasilkan torsi sebagai penggerak motor. Pada penelitian ini posisi rotor diketahui dengan tiga sensor *hall-effect* yang terpasang pada bagian stator. Ketika magnet pada rotor melewati sensor *hall-effect*, sensor akan mengeluarkan sinyal berupa logika *high* atau *low*. Dengan mengetahui ketiga kombinasi sensor *hall-effect* ini dapat ditentukan urutan komutasi yang tepat [3].



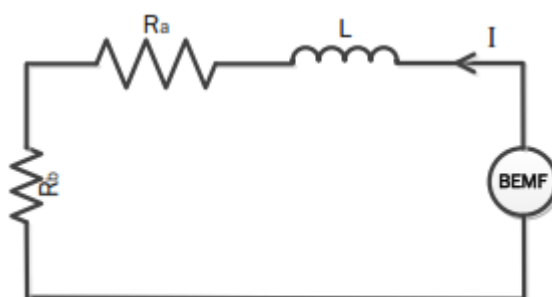
Gambar 2. 1 Motor Brushless DC

Motor BLDC terdiri dari 2 jenis, yaitu *In-Runner Motor* dan *Out-Runner Motor* [9]. Perbedaan keduanya terletak pada lokasi magnet permanen, dimana motor *In-Runner* memiliki magnet permanen yang terletak di dalam terminal elektromagnetik, sedangkan motor *Out-Runner* terletak di bagian luar. Kedua jenis motor BLDC ini memiliki karakteristik masing-masing seperti terlihat pada table berikut ini:

Tabel 2. 2 Perbedaan *In-Runner* Motor dan *Out-Runner* Motor

No	<i>In-Runner</i> Motor	<i>Out-Runner</i> Motor
1	RPM tinggi, torsi rendah	RPM rendah, torsi tinggi
2	Lebih efisien karena kecepatan tinggi	Efisiensi lebih rendah dibandingkan dengan <i>In-Runner</i>
3	Membutuhkan girboks	Tanpa girboks
4	Bersuara berisik	Tak bersuara

Ketika kecepatan motor BLDC menurun, maka motor mengalami pengereman dinamik. Pengereman dinamik merupakan salah satu metode pengereman pada motor listrik yang sangat praktis dan memberikan gaya pengereman yang sangat baik. Dengan alasan itu maka pengereman dinamik sangat baik digunakan pada sistem pengereman untuk waktu yang sangat singkat karena motor dapat berhenti dengan cepat. Pengereman ini dilakukan dengan cara memutuskan suplai tegangan ke sebuah motor yang sedang berputar lalu dihubungkan dengan sebuah beban pada terminal statornya. Intensitas pengereman tergantung dari arus yang diberikan pada terminal stator dan dengan menentukan tahanan [10].



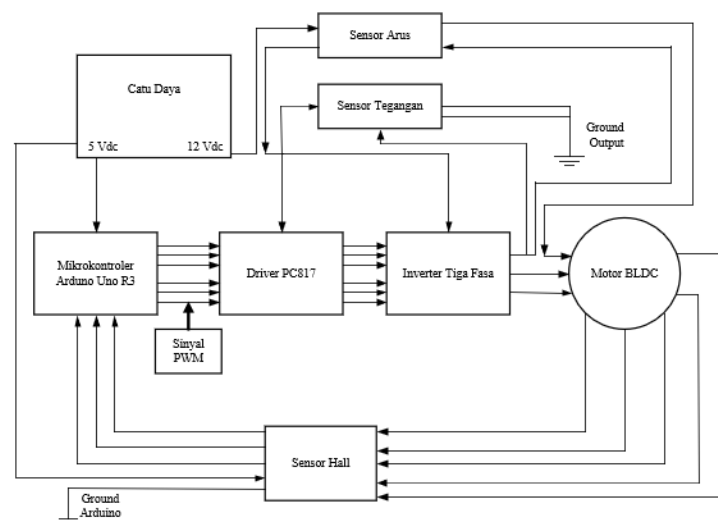
Gambar 2. 2 Rangkaian Ekivalen Motor BLDC

Pada penelitian ini, diujikan motor BLDC jenis Kokusan Denki FH7-1594 TL0I48. Peneliti menggunakan motor BLDC tersebut karena kecepatan motor dapat divariasikan dengan rentang yang lebih luas dan karena torsi yang besar sehingga dapat mengukur beban dengan jumlah

besar. Spesifikasi motor ini adalah 200 W dengan tegangan maksimum sebesar 24 V dengan nilai arus sebesar 8.33 A dan torsi maksimum sebesar 1.31 N.m. Pada nilai torsi tersebut motor BLDC mampu berputar pada beban maksimum dengan berat 52.4 kg.

2.3 Rangkaian Kontrol Motor BLDC

Pada sistem kendali motor BLDC terdapat Kontroler, *Driver* dan *Inverter*. Ketiganya merupakan bagian paling penting pada motor BLDC karena berfungsi sebagai pengendali dan penggerak putaran pada motor tersebut. Kontroler, *Driver* dan *Inverter* adalah komponen-komponen elektronik yang kemudian dirangkai menjadi satu kesatuan sistem dalam mengontrol kecepatan motor BLDC. Pada kontroler komponen utamanya yaitu mikrokontroler, karena proses pengendaliannya berbasis mikrokontroler, digunakanlah mikrokontroler yang telah diprogram untuk mengendalikan kecepatan putar motor dengan mengatur kerja *driver* dan *inverter*. Kemudian pada *driver*, komponen utamanya yaitu gabungan dari beberapa MOSFET yang berguna untuk *switching* pada motor BLDC. Sedangkan *inverter* berperan sebagai pengubah tegangan DC menjadi tegangan AC dan akan diubah lagi ke DC untuk mensuplai driver [2].

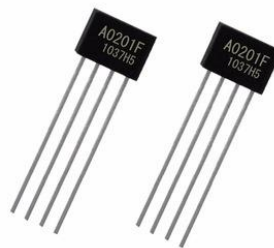


Gambar 2. 3 Blok Diagram Rangkaian Kontrol Motor BLDC

2.4 Sensor Hall

Sensor hall merupakan sensor yang berada pada motor BLDC yang berfungsi untuk memberikan *feedback* (umpan balik) pada rangkaian kontrol yang bersifat elektronik yang akan mengendalikan perubahan komutasi pada motor BLDC. Hal tersebut dikarenakan motor BLDC bagian stator harus diberikan sinyal secara berurutan sesuai perubahan komutasi [2].

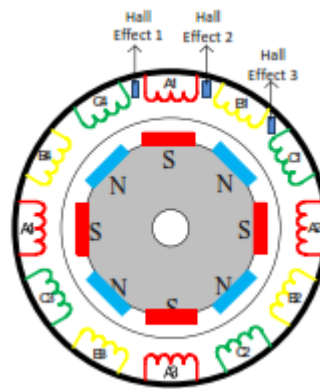
Motor BLDC biasanya menggunakan tiga sensor Hall Effect pada ujung motor yang tidak mengemudi terminal untuk mendeteksi posisi rotor. Motor ini ditenagai oleh inverter tiga fase enam pulsa yang dikendalikan berdasarkan informasi posisi rotor untuk pergantian elektronik. Itu informasi posisi rotor dapatkan dari sensor Hall. Kombinasi output dari sensor-sensor ini menerjemahkan ke dalam enam keadaan unik yang digunakan untuk beralih dari inverter [11]. Sensor hall dipasang menghadap magnet kecil roda dipasang pada rotor dan memiliki jumlah kutub yang sama sebagai rotor dari motor BLDC atau roda magnet tambahan mungkin didistribusikan dengan memperbesar rotor di belakang tumpukan panjang stator dan menggunakan magnet rotor untuk menyediakan detail posisi. Pengaturan semacam itu melacak seluruh posisi magnet rotor dan karenanya bentuk dan titik menginduksi gaya gerak listrik di semua mesin listrik tiga fasa [12].



Gambar 2. 4 Sensor Hall

Sensor hall memberikan keluaran “0” atau tegangan 0 V saat kutub magnet selatan (S) dekat dengan sensor dan akan berlogika “1” atau

tegangan 5 V saat mendeteksi keberadaan kutub magnet utara (N). Hal tersebut terjadi karena garis gaya magnet yang dihasilkan oleh serbuk besi yang tertabur pada medan magnet keluar dari kutub utara menuju ke kutub selatan. Besar medan magnet akan menghasilkan gaya gerak listrik dimana arus mengalir dari tegangan yang lebih tinggi ke tegangan yang lebih rendah, dalam hal ini adalah tegangan dari sensor Hall itu sendiri. Tiga buah hall effect sensor ditempatkan pada posisi sebagai berikut : H1 pada posisi $\theta = 330^\circ$, H2 pada posisi $\theta = 90^\circ$, dan H3 pada posisi $\theta = 210^\circ$ terhadap stator [13].



Gambar 2. 5 Konstruksi Penempatan Sensor Hall pada Motor BLDC

2.5 Arduino Uno R3

Arduino adalah bagian terpenting dari banyak desain proyek elektronik karena kemampuan fungsional dan serbaguna [14]. Arduino Uno adalah mikrokontroler berbasis Atmega328. Memiliki 14 pin input dan output digital, dimana 6 pin diantara pin tersebut berfungsi sebagai output PWM dan 6 pin input analog, 16 MHz osilator kristal, koneksi USB, jack power, ICSP header, dan tombol reset. Untuk mendukung mikrokontroler supaya bisa digunakan, cukup menghubungkan Board Arduino Uno ke komputer dengan menggunakan kabel USB atau dengan adaptor AC-DC untuk menjalankannya.

Bagian Arduino Uno memiliki tipe masing – masing yang berbeda dilihat dari IC dan chip pada bagian boardnya. ATmega328 yang digunakan

dapat dilakukan dengan tes sederhana untuk mengetahui apakah mikrokontroller berfungsi dengan baik, dan pin-pin yang dimiliki dapat di fungsikan sebagai *input* atau *output* [15].



Gambar 2. 6 Arduino Uno R3

2.2.1 Spesifikasi Arduino Uno R3

Secara umum spesifikasi Arduino UNO R3 adalah sebagai berikut.

Tabel 2. 3 Spesifikasi Umum Arduino UNO R3

Mikrokontroler	<u>Microchip ATmega328P</u>
Tegangan Operasi	5v
Tegangan Input	7-20v
Digital I/O Pins	14 (6 diantaranya adalah PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current untuk 3.3v Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Clock Speed	16 MHz
Panjang	68.6 mm
Lebar	53.4 mm
Massa	25 g

2.2.2 Spesifikasi Pin Arduino Uno R3

Seperti yang sudah tertera pada tabel 2.3 bahwa Arduino UNO R3 memiliki 16 Pin Input/Output. Untuk detail spesifikasi pin yang ada, dapat dilihat di tabel dibawah.

Tabel 2. 4 Spesifikasi Pin Arduino UNO R3

LED	Terdapat built in LED pada Arduino yaitu pada digital pin 13. Saat pin bernilai HIGH maka led akan menyala sementara saat LOW maka led akan mati
VIN	Merupakan input voltage saat menggunakan sumber daya eksternal (koneksi USB dengan PC)
5V	Pin untuk tegangan regulasi 5v
3V3	Pin untuk tegangan regulasi 3v3
GND	Pin untuk ground
IOREF	Digunakan sebagai tegangan referensi untuk mikrokontroler
Reset	Untuk mereset program yang ada pada mikrokontroler

2.2.3 Fungsi Pin Khusus

Masing-masing dari 14 pin digital dan 6 pin analog pada Arduino Uno dapat digunakan sebagai input atau output, menggunakan fungsi `pinMode()`, `digitalWrite()`, dan `digitalRead()`. Pin-pin tersebut beroperasi pada tegangan 5 volt. Setiap pin dapat menyediakan atau menerima 20 mA (sebagai kondisi operasi yang disarankan) dan memiliki resistor pull-up internal (terputus secara default) sebesar 20-50k ohm. Arduino Uno memiliki 6 input analog, dengan label A0 hingga A5, yang masing-masing memberikan 10 bit resolusi (yaitu 1024 nilai yang berbeda).

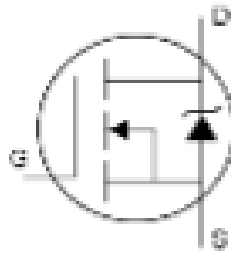
Untuk daftar special pin yang ada pada Arduino Uno R3 ini dapat dilihat pada tabel dibawah.

Tabel 2. 5 Daftar Special Pin Arduino UNO R3

Serial / <u>UART</u>	Pin 0 sebagai receiver (RX) sementara pin 1 sebagai tranmitter (TX)
External Interrupts	Pin 2 dan 3 yang mana kedua pin ini dapat digunakan untuk melakukan interrupt pada saat rising and falling edge
<u>PWM</u> (Pulse Width Modulation)	3, 5, 6, 9, 10 dan 11. Dapat melakukan 8 bit PWM dengan fungsi analogWrite()
<u>SPI</u> (Serial Peripheral Interface)	10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK)
TWI (Two Wire Interface) / <u>I²C</u>	A4 atau pin SDA dan A5 atau pin SCL
AREF (Analog REference)	Digunakan sebagai tegangan referensi untuk analog input

2.6 MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

MOSFET merupakan salah satu jenis FET (*field effect transistor*) atau transistor efek medan. MOSFET memiliki 3 atau 4 buah kaki konduktor, yaitu kaki pertama atau ujung atas dinamakan *drain*, kaki kedua ujung bawah dinamakan *source*, dan kaki ketiga dinamakan *gate*. *Gate* biasanya memiliki 1 atau dua buah kaki. Pada kedua sisi kiri dan kanan terdapat implant semikonduktor yang berbeda tipe bahan. Terminal kedua sisi implant ini terhubung satu dengan yang lainnya secara internal dan dinamakan *gate*. Yang membedakan MOSFET dengan FET-FET lainnya terletak pada *gate*, karena *gate* pada MOSFET diisolasi oleh bahan metal oksida. *Gate* sendiri terbuat dari bahan metal seperti alumunium. Oleh karena itulah, transistor efek medan ini dinamakan *metal oxide semiconductor* [2].



Gambar 2. 7 MOSFET

Di pengendalian ini perlu menggunakan MOSFET, dimana fungsinya adalah untuk menaikkan tegangan atau menurunkan tegangan dan digunakan pada rangkaian driver jenis *switching* untuk menghasilkan tegangan tinggi agar dapat memproses *power supply* sehingga motor BLDC bisa bergerak [16]. Namun sebelum proses *switching* diperlukan rangkaian driver MOSFET yang berfungsi memisahkan antara blok rangkaian daya dengan blok rangkaian kontrol. Pemisahan ini bertujuan ketika terjadi masalah pada blok rangkaian daya tidak sampai merusak blok rangkaian kontrol [17].

Pada rangkaian driver digunakan MOSFET tipe P-MOS sebagai saklar pada sinyal PWM yang dihasilkan oleh mikrokontroler menuju beban di motor BLDC, sehingga MOSFET ini terpasang pada output yang bersifat HIGH. Sedangkan MOSFET tipe N-MOS sebagai saklar aliran listrik dari beban motor menuju ground *driver* melalui mikrokontroler, oleh karena itu MOSFET ini terpasang pada output yang bersifat LOW. Setiap transistor yang tersusun dalam rangkaian driver berfungsi sebagai switch, di mana sistem kerja akan berada dalam kondisi tertutup (MOSFET ON) atau kondisi terbuka (MOSFET OFF). Jika input rangkaian diberi 0, sehingga transistor tipe N dalam kondisi terbuka dan transistor tipe P dalam kondisi tertutup sehingga tegangan input akan melewati jenis transistor P dan nilai output adalah 1. Dalam kondisi lain, jika input rangkaian diberi nilai 1, sehingga transistor tipe P dalam kondisi terbuka dan transistor tipe N dalam kondisi tertutup. Jadi tegangan dari Ground akan melewati transistor tipe N dan nilai output rangkaian adalah 0 [18]. Pada penelitian ini, digunakan masing-masing tiga buah MOSFET tipe P dan tipe N pada

rangkaian *driver* motor BLDC. Keenam MOSFET tersebut terdapat masing-masing satu *driver* tipe optocoupler PC817 untuk memicu keenam MOSFET konfigurasi *full bridge*. MOSFET tipe P yang digunakan adalah IRF4905, sedangkan MOSFET tipe N yang digunakan adalah IRF540N.



Gambar 2. 8 MOSFET IRF540N



Gambar 2. 9 MOSFET IRF4905

2.7 Optocoupler PC817

Optocoupler merupakan gabungan dari LED infra merah dengan fototransistor yang terbungkus menjadi satu chips. Cahaya inframerah termasuk dalam gelombang elektromagnetik yang tidak tampak oleh mata telanjang. Optocoupler juga merupakan salah satu jenis komponen phototransistor yang memanfaatkan sinar sebagai pemicu on/off-nya. Opto berarti optik dan coupler berarti pemicu. Dengan arti lain optocoupler merupakan suatu komponen yang bekerja berdasarkan picuan cahaya optik optocoupler termasuk dalam sensor [2]. LED infra merah tersebut merupakan komponen yang memancarkan cahaya infra merah yang mengonsumsi daya yang sangat kecil. Jika diberi prasiap maju, LED infra

merah akan mengeluarkan Panjang gelombang sekitar 0.9 mikrometer. Phototransistor memiliki sambungan kolektor-basis dengan jumlah besar oleh cahaya infra merah, karena cahaya ini dapat membangkitkan pasangan lubang elektron. Dengan prasikap maju, cahaya yang masuk akan menimbulkan arus pada kaki collector. Tipe phototransistor juga sama dengan umumnya yaitu PNP dan NPN. Perbedaan transistor dengan phototransistor terletak pada rumahnya, sehingga cahaya infra merah mengaktifkan daerah basis, sedangkan transistor biasa terletak pada rumah logam tertutup [19]. Optocoupler berfungsi sebagai penghubung antara rangkaian kontrol dengan rangkaian daya, penghubung disini berarti sebagai pengaman. Jadi, apabila terjadi gangguan atau tegangan tinggi yang masuk pada rangkaian daya atau rangkaian control maka yang akan rusak adalah komponen optocoupler ini, bukan komponen yang berada pada rangkaian daya maupun pada rangkaian kontrol. Sehingga optocoupler disini bisa dikatakan sebagai pengaman rangkaian [2]. *Optocoupler* memiliki dua bagian penting yang membuat komponen ini bekerja sesuai fungsinya, yaitu :

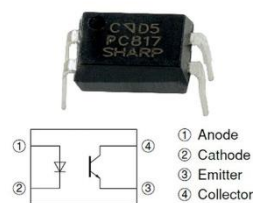
1. Transmitter

Pada *transmitter* dibangun dari sebuah LED (*Light Emitting Diode*) infra merah. Jika dibandingkan dengan menggunakan LED biasa, LED infra merah memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap sinyal tampak. Cahaya yang dipancarkan oleh LED inframerah tidak terlihat oleh mata telanjang [2].

2. Receiver

Pada bagian receiver dibangun dengan dasar komponen *photodiode*. *Photodiode* merupakan suatu transistor yang peka terhadap cahaya. Suatu sumber cahaya menghasilkan energi panas, begitu pula dengan spektrum infra merah, karena spektrum infra mempunyai efek panas yang lebih besar dari cahaya tampak, maka *photodiode* lebih peka untuk menangkap radiasi dari sinar infra merah. Selain *photodiode*, pada *receiver* terdapat *operational amplifier*, resistor dan hubungan transistor [2].

Pada penelitian ini, digunakan optocoupler yang dapat dipakai di rangkaian driver yaitu PC817. Optocoupler ini terdapat sinar infra merah yang disandingkan dengan fototransistor dan memiliki 4 *pin*. Tegangan isolasi input dan outputnya adalah 5kV. Kemudian tegangan kolektor-emitornya 35 V. Sedangkan tegangan emitor-kolektornya 6 V [19].



Gambar 2. 10 Optocoupler PC817

Prinsip kerja dari optocoupler atau optoisolator adalah saat input bernilai LED pada optoisilator akan menyala dan transistor pada optoisolator *ON* sehingga output dihubungkan dengan *GROUND* dan output tidak menyala, hal ini berlaku pada output LOW di driver yang melalui kaki emitor pada optocoupler menuju MOSFET tipe N. Sebaliknya saat input bernilai *LOW*, maka *LED* menyala dan transistor mendeteksi nilai *Vcc*, kasus tersebut terjadi saat output pada driver dalam keadaan HIGH yang melalui kaki kolektor pada optocoupler menuju MOSFET tipe P [20].

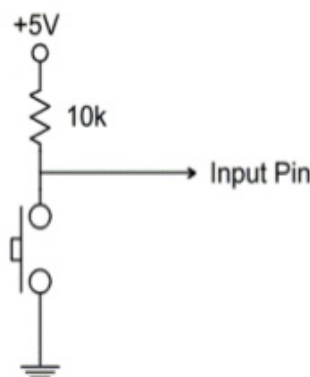
2.8 Pull Resistor

Istilah penggunaan *pull resistor* sangat umum dijumpai ketika menggunakan mikrokontroler atau perangkat logika digital yang lain. Pada rangkaian driver ini *pull resistor* berfungsi mengatasi kondisi “floating” yang terjadi pada suatu rangkaian agar menjadi terdefinisi ke sinyal “1” atau “0”, selain itu juga berfungsi untuk menghindari terjadinya arus berlebih yang mengalir antara tegangan suplai dan ground, sehingga tidak merusak

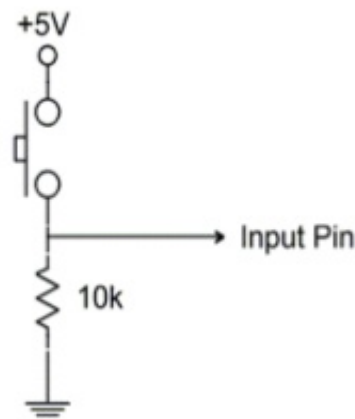
suplai daya dan rangkaian driver itu sendiri. Penambahan resistor ke keluaran “high” inilah yang disebut dengan “pull up resistor” dan penambahan resistor ke keluaran “low” disebut “pull down resistor”. Penemuan ini berkaitan dengan simpul masukan / keluaran dalam perangkat elektronik yang terdiri dari masukan / keluaran pin, sejumlah resistor pull-up yang dapat diprogram dan sejumlah resistor pull-down yang dapat diprogram [21].

Satu keuntungan dari kontrol tersebut atas kekuatan driver adalah kemampuan untuk mengirim atau menerima data di hampir semua lingkungan elektronik. Keuntungan lainnya adalah kemampuan untuk mengurangi tingkat penurunan tegangan, yang mengurangi harmonisasi frekuensi tinggi dan gangguan elektromagnetik [21].

Masing-masing resistor pull-up dapat menyalakan dan mematikan transistor P-MOS, sedangkan resistor pull-down, bisa diaktifkan dengan menyalakan atau mematikan transistor N-MOS. Resistansi pull-up dan pull-down dapat diimplementasikan dengan memasukkan resistor dalam seri atau dengan memanfaatkan resistansi bawaan dari transistor MOSFET itu sendiri. Hambatan bisa kuat, sedang, atau lemah, tergantung pada kebutuhan sirkuit [21].



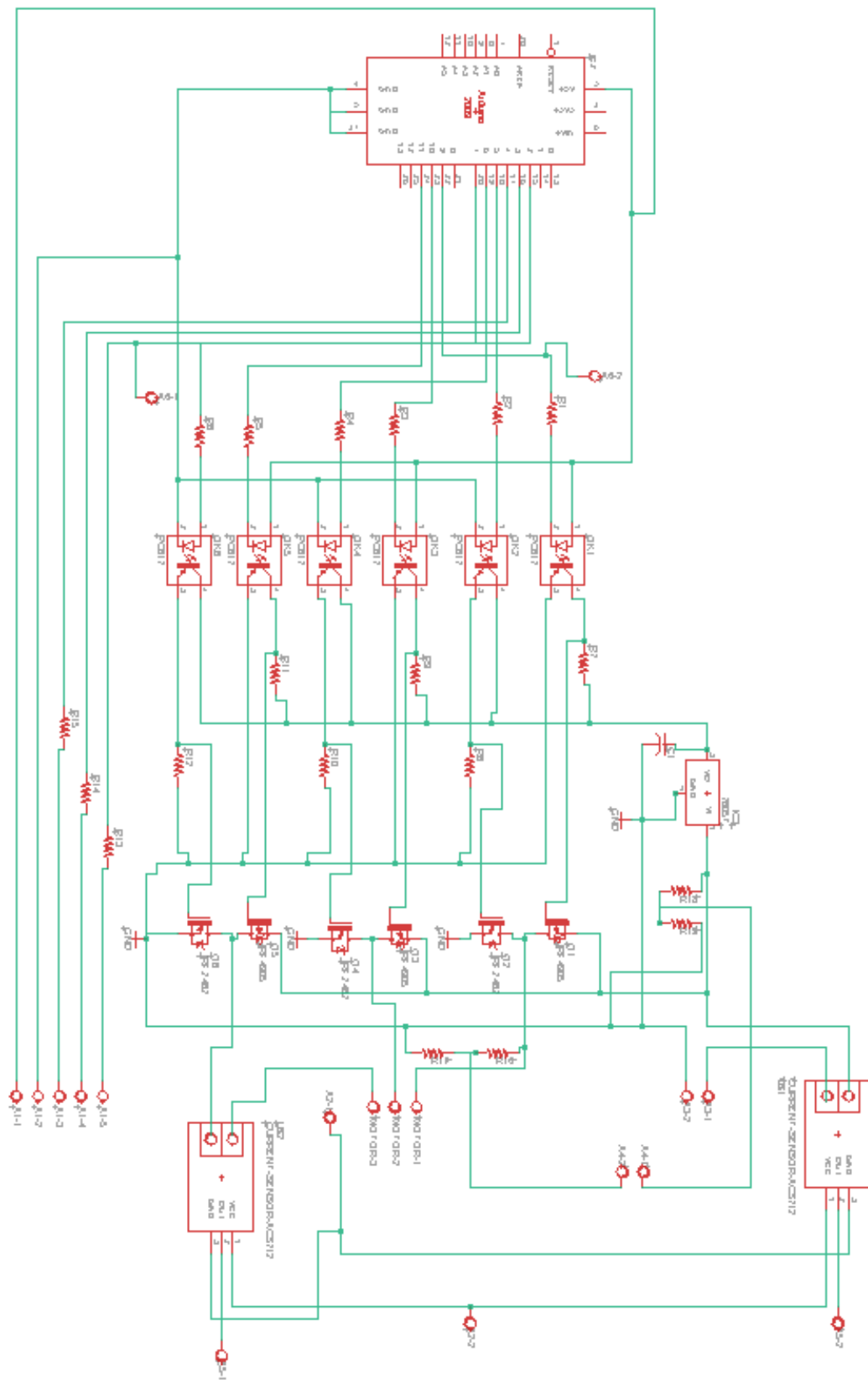
Gambar 2. 11 *Pull Up* Resistor

Gambar 2. 12 *Pull Down Resistor*

2.9 Isolated Gate Driver

Isolated gate driver merupakan metode yang memungkinkan suplai V_{GS} diberikan tanpa mematikan salah satu MOSFET dimana rangkaian daya dan rangkaian kontrol terisolasi oleh optocoupler. Kelebihan lainnya adalah MOSFET bisa menyala lebih lama karena sumber tegangan V_{GS} selalu tersedia selama tidak hilang atau dimatikan, selain itu metode ini bisa memperoleh performa yang lebih cepat dalam pensaklaran karena tidak perlu menunggu kapasitor penuh. Metode *Isolated Gate Driver* memiliki kelemahan diantaranya harus menggunakan suplai terpisah sehingga membutuhkan suplai tambahan dari luar, suplai tersebut dapat diperoleh dari *adaptor* atau dari baterai tambahan [8]. Suplai tambahan tersebut akan digunakan untuk mensuplai mikrokontroler.

Suplai tegangan berupa tegangan DC yang besar tidak melebihi batas kemampuan V_{GS} dari MOSFET. Karena sumber suplai V_{GS} adalah sumber terpisah maka terminal negatif dari sumber utama tidak boleh bertemu dengan terminal negatif sumber terpisah lainnya. Untuk mengatasi hal itu sinyal kendali juga terpisah referensi *ground*nya dari rangkaian kemudi sehingga dibutuhkan komponen *opto isolator* yang akan memisahkan referensi *ground* sinyal kendali dengan *ground* rangkaian kemudi. Kondisi ini berlaku jika terdapat lebih dari satu sumber suplai terpisah menyuplai masing-masing MOSFET [8].



Gambar 2. 13 Isolated Driver PC817

2.10 Inverter Full Bridge Tiga Fasa

Inverter merupakan sebuah metode dimana tegangan searah diubah menjadi tegangan bolak-balik pada keluarannya dan kembali diubah menjadi tegangan searah untuk mensuplai driver. Inverter menggunakan teknik *switching* yang dikendalikan rangkaian kontrol. Sedangkan full bridge adalah metode rangkaian dimana setiap inverter dengan sifat berbeda dapat bekerja secara berkesinambungan. Hal tersebut dilakukan agar arus yang melalui beban saling berkebalikan sehingga beban akan menerima tegangan bolak-balik [22].

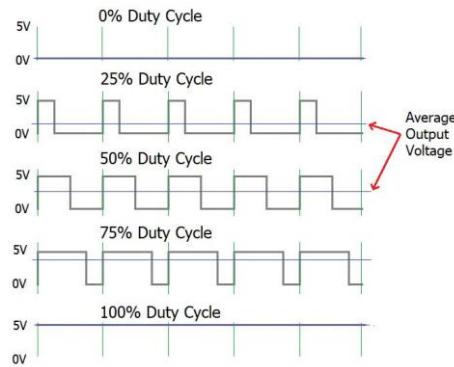
Rangkaian inverter full bridge terdiri dari 6 buah MOSFET. Keenam MOSFET disusun sedemikian rupa sehingga dapat melakukan *switching* secara berkesinambungan dengan diatur oleh mikrokontroler. Di rangkaian ini dua MOSFET dalam satu fasa atau yang bersifat sama tidak boleh menyala secara bersamaan karena dapat menghambat aliran arus dari mikrokontroller ke beban, begitu juga sebaliknya.

2.11 Pulse Width Modulation (PWM)

PWM adalah suatu metode untuk mendapatkan output tegangan bervariasi pada mikrokontroler. PWM dibentuk dengan membuat output gelombang kotak pada frekuensi tinggi. Tegangan output dapat diatur dengan merubah lebar pulsa *high* (duty cycle) [23]. PWM merupakan sebuah mekanisme untuk membangkitkan sinyal keluaran yang periodenya berulang antara *high* dan *low* dimana kita dapat mengontrol durasi sinyal *high* dan *low* sesuai dengan yang kita inginkan. *Duty cycle* merupakan prosentase periode sinyal *high* dan periode sinyal, presentase *duty cycle* akan bebanding lurus dengan tegangan rata-rata yang dihasilkan. Pengaturan lebar pulsa modulasi atau PWM merupakan salah satu Teknik yang ampuh yang digunakan dalam sistem kendali (*control system*) saat ini. Pengaturan lebar modulasi dipergunakan di berbagai bidang yang sangat luas, salah satu diantaranya adalah: *speed control* (kendali kecepatan), *power control* (kendali sistem tenaga), *measurement and communication* (pengukuran atau instrumentasi dan telekomunikasi) [24]. Pada penelitian

ini duty cycle akan meningkat secara konstan tanpa pengaturan dari potensimeter karena kecepatan dari motor konstan.

$$Duty\ cycle = \frac{t_{out}}{t_{in} + t_{out}} \times 100\ (%) \quad (2.1)$$

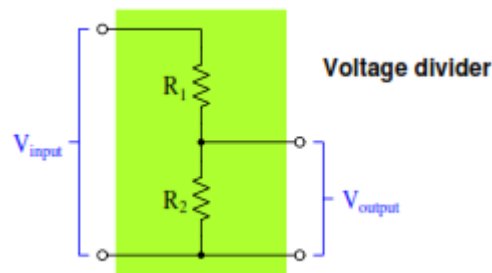


Gambar 2. 14 *Pulse Width Modulation*

2.12 Sensor Tegangan DC (Pembagi Tegangan)

Rangkaian pembagi tegangan dapat digunakan untuk menghasilkan besaran tegangan tertentu yang diatur dari terwujudnya rangkaian kombinasi dua resistor atau lebih. Nilai resistor akan diatur sesuai dengan tegangan keluaran yang diinginkan [25]. Sensor tegangan dapat membaca tegangan AC maupun tegangan DC, yang umumnya kemudian dihubungkan ke mikrokontroler untuk dikonversi dan menghasilkan keluaran pembacaan nilai tegangan. Pada penelitian ini, digunakan sensor tegangan yang terdiri dari 2 buah resistor yang disusun secara paralel yang berfungsi menurunkan tegangan dari input ke tegangan referensi arduino 5V. Sensor tegangan diletakkan pada salah satu input DC fasa di motor BLDC agar dapat diamati nilai tegangan pada fasa tersebut. Dan nilai fasa lainnya dianggap sama dengan fasa yang diketahui oleh sensor. Perhitungan nilai tegangan dapat menggunakan rumus dibawah ini [26].

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{in} \quad (2.2)$$



Gambar 2. 15 Rangkaian Pembagi Tegangan

2.13 Sensor Arus ACS712

Sensor arus ACS712-05A merupakan komponen yang digunakan untuk mendeteksi arus pada suatu kawat/kabel dalam instalasi listrik. Sensor ini dapat digunakan untuk mengukur arus searah (DC) dan arus bolak-balik (AC) menggunakan prinsip *Hall Effect*. Sensor yang memiliki prinsip *Hall Effect* dirancang untuk mendeteksi objek magnetis dengan perubahan posisi. Adanya perubahan medan magnet secara terus menerus menimbulkan adanya pulsa yang kemudian dapat diambil frekuensinya [27].

Sensor ACS712-20A mengeluarkan tegangan 2,5 volt jika tidak ada arus [26]. Sensor arus ACS712-10A ini memiliki fungsi transfer berupa korelasi antara nilai besaran fisis yang terukur oleh sensor terhadap nilai ADC (*Analog to Digital Converter*) yang akan dibaca oleh mikrokontroler. Nilai ADC yang terukur dikonversikan menjadi nilai arus dengan menggunakan rumus perbandingan antara nilai arus sebenarnya dengan ADC yang dikeluarkan oleh sensor [27].

Pemasangan sensor arus ACS712-05A dilakukan secara seri melalui kabel/kawat yang digunakan untuk mengalirkan arus listrik dari sumber ke beban, masukan sensor ini menggunakan dua pasang terminal power dengan arus maksimal 5A arus bolak-balik (AC) maupun arus searah (DC). Tegangan operasional sensor arus ACS 712-05A sebesar 4,5 VDC – 5,5 VDC [27].

ACS712 ini memiliki tipe variasi sesuai dengan arus maksimal yakni 5A, 20A, 30A. Pada rangkaian driver ini menggunakan tipe 20A.

Sensor ACS712 ini menggunakan VCC 5V. ACS712 terpasang pada salah satu input DC dan salah satu output AC pada motor.



Gambar 2. 16 Sensor Arus ACS712

2.14 Parameter Performa

1. Konsumsi Daya

Daya listrik yang digunakan oleh suatu alat dapat digunakan untuk mengetahui efisiensi dan performa dari alat yang digunakan, serta untuk mengetahui seberapa besar sumber listrik yang dibutuhkan untuk dapat mengoperasikan peralatan tersebut. Rumus dari daya listrik dapat dihitung menggunakan rumus:

$$P = V \times I \quad (2.3)$$

2. Efisiensi

Efisiensi suatu alat merupakan perbandingan antara daya keluaran dengan daya input. Nilai efisiensi biasanya dituliskan dalam bentuk persen. Efisiensi yang baik berkisar di atas 80 atau 90 % [28]. Rumus dari efisiensi adalah sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 (\%) \quad (2.4)$$

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini akan dilakukan beberapa tahap, yang dimulai dengan perancangan simulasi rangkaian *driver* pada *software* Proteus 8, perancangan program dan dilanjutkan dengan pembuatan *hardware*. Setelah *hardware* selesai dibuat, dilakukan pemeriksaan apakah rangkaian *driver* tersebut dapat bekerja bagus dan sesuai dengan simulasi. Apabila rangkaian *driver* telah selesai dan memberikan kinerja yang baik, dapat dilanjutkan ke tahap pengujian dan pengambilan data yang selanjutnya akan dilakukan analisa terhadap performa rangkaian *driver*.

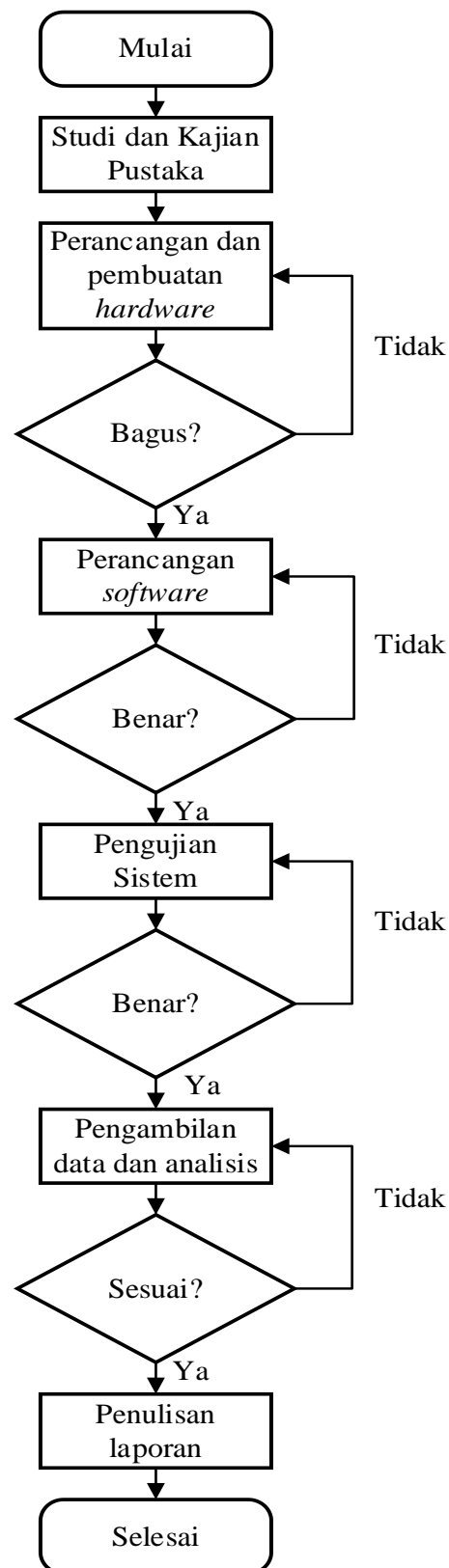
3.1 Alur Penelitian

Penelitian diawali dengan melakukan studi pustaka dari beberapa referensi seperti jurnal, laporan penelitian, skripsi, *website*, modul praktikum, *datasheet* alat, dan buku hasil percobaan yang sesuai dengan topik yang diusulkan. Setelah diperoleh beberapa referensi dan pembuatan alur kerja alat, selanjutnya dilakukan perancangan sistem dan pembuatan *hardware*. Kemudian bisa masuk tahap pengecekan kinerja *hardware* pada masing-masing komponen untuk memastikan rangkaian dapat berjalan dengan baik. Selain perancangan *hardware*, juga dilakukan pembuatan *software* sehingga membentuk satu kesatuan dari sistem.

Pembuatan *hardware* diawali dari simulasi perancangan desain rangkaian melalui menggunakan *software* Proteus 8, yang kemudian dilakukan pemeriksaan rangkaian di simulasi supaya berjalan dengan baik. Apabila sudah sesuai, kemudian desain rangkaian dicetak pada papan PCB dan penyatuan komponen-komponen seperti IC driver, mikrokontroler, sensor, *driver*, dan suplai daya untuk rangkaian. Sedangkan untuk pembuatan *software*, dilakukan perancangan melalui *software* Arduino IDE dengan melakukan pemeriksaan pada simulasi di Proteus 8. Sedangkan desain rangkaian *hardware* dirancang menggunakan *software* Eagle.

Setelah rangkaian *hardware* dan perancangan *software* selesai dibuat, kemudian dilanjutkan dengan pengujian rangkaian *driver* untuk memastikan apakah ada permasalahan pada rangkaian. Apabila *hardware* dapat bekerja bagus, maka dilanjutkan dengan pengambilan data pada sistem yang telah dirancang dan kemudian dilakukan analisa keandalan sistem yang telah dibuat. Hasil dari analisa kemudian ditulis pada laporan sesuai dengan data yang diperoleh.

Tugas Akhir ini dilaksanakan pada Maret 2020 – November 2020. di Lab Teknik Elektro Universitas Sebelas Maret, dan diselingi oleh pelaksanaan di rumah peneliti dikarenakan sedang terjadi Covid-19 sehingga peneliti harus mengkarantina diri.



Gambar 3. 1 Alur Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

Tabel 3. 1 Alat dan Bahan

No	Nama Alat / Spesifikasi	Kuantitas	Keterangan
1	Motor BLDC Kokusan Denki FH7-1594 TL0I48	1 buah	Motor BLDC yang digunakan untuk prototipe
2	Arduino UNO R3	1 buah	Sebagai <i>Microcontroller</i> untuk mengimplemen- tasikan code program kedalam sistem
3	Proteus 8 Professional	1 buah	Sebagai piranti pembangunan simulasi sistem dan pengujian coding
4	Eagle	1 buah	Sebagai piranti pembuatan desain sistem yang akan dicetak
5	Resistor 680k Ω	2 buah	Sebagai rangkaian pembagi tegangan
6	Resistor 100k Ω	2 buah	Sebagai rangkaian pembagi tegangan
7	Sensor ACS712	2 buah	Sebagai sensor arus pada input dan output motor
8	MOSFET IRF4905	3 buah	Sebagai pengganti saklar mekanik pada output HIGH rangkaian driver
9	MOSFET IRF540N	3 buah	Sebagai pengganti saklar mekanik pada output LOW rangkaian driver

10	Optocoupler PC817	6 buah	Sebagai penghubung antara mikrokontroller dengan inverter motor BLDC, dan juga sebagai driver MOSFET
11	Protoboard	1 buah	Peletakan rangkaian driver yang masih dalam tahap pengujian pada tegangan rendah
12	Kabel Jumper male-male dan male-female serta tembaga	20 buah	Penghubung antar komponen agar terintegrasi menjadi sebuah sistem
13	Solder	1 buah	Penyolder
14	Tenol	1 buah	Timah untuk menghubungkan komponen atau kabel
15	Multimeter	1 buah	Menguji arus dan tegangan pada sistem
16	Power Supply	1 buah	Penyuplai tegangan 12v untuk motor BLDC
17	PC	1 buah	PC yang sudah terinstall Arduino, Proteus, dan Eagle
18	Terminal Block	12 buah	Menghubungkan antara kabel motor BLDC dan power supply dengan rangkaian driver
19	Resistor	12 buah	10k Ω yang dihubungkan ke kaki gate MOSFET IRF4905 dari suplai IC sebagai pull up resistor dan dihubungkan ke kaki

			gate MOSFET IRF540N dari ground sebagai pull down resistor dan 180 Ω yang akan digunakan sebagai penyetabil tegangan output PWM
20	Connector	1 buah	Menghungkan antara kabel motor BLDC dan kabel jumper supaya dapat dimasukkan ke port yang ada pada <i>hardware</i>
21	Bor Listrik	1 buah	Melubangi board supaya dapat dipasang komponen
22	Toolset	1 buah	Obeng berbagai ukuran
23	Mur dan baut	4 buah	Penyangga <i>hardware</i>
24	PCB Polos Fiber 10.5x20cm	1 buah	Meletakkan rangkaian driver yang sudah jadi
25	Pin Header Male dan Pin Header Female	2 buah	Penyambung kabel jumper agar terpasang dengan baik

3.3 Perancangan Sistem

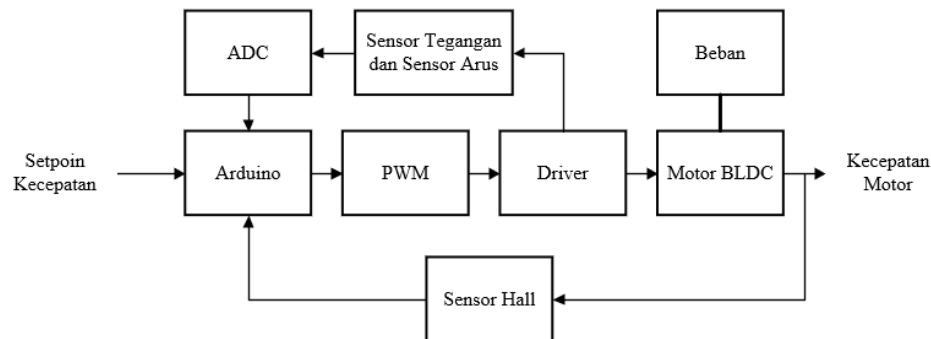
1. Studi Literatur

Mengumpulkan data tentang permasalahan yang terkait dengan Arduino, perancangan *driver*, perancangan algoritma, dan sistem kontrol untuk mengetahui efisiensi daya khususnya motor BLDC untuk mendukung peneliti dalam melakukan penelitian.

2. Perancangan Sistem

Merupakan proses perancangan sistem yang digunakan dalam tugas akhir ini. Untuk tahapan perancangan sistem terdiri perancangan desain *hardware* sederhana pada Proteus 8. Kemudian untuk inisiasi motor, yang semuanya dilisting

pada microcontroller Atmega 328P Arduino. Kemudian dari rangkaian yang telah dibuat pada *software* proteus tadi diaplikasikan pada model uji nyata dengan memasukkan program uji yang sebelumnya telah disimulasikan pada proteus. Setelah perancangan sistem kendali pada *hardware* selesai, selanjutnya dibuat sistem *monitoring* pada motor BLDC untuk mengetahui nilai tegangan, arus, dan kecepatan motor dalam satuan rpm.



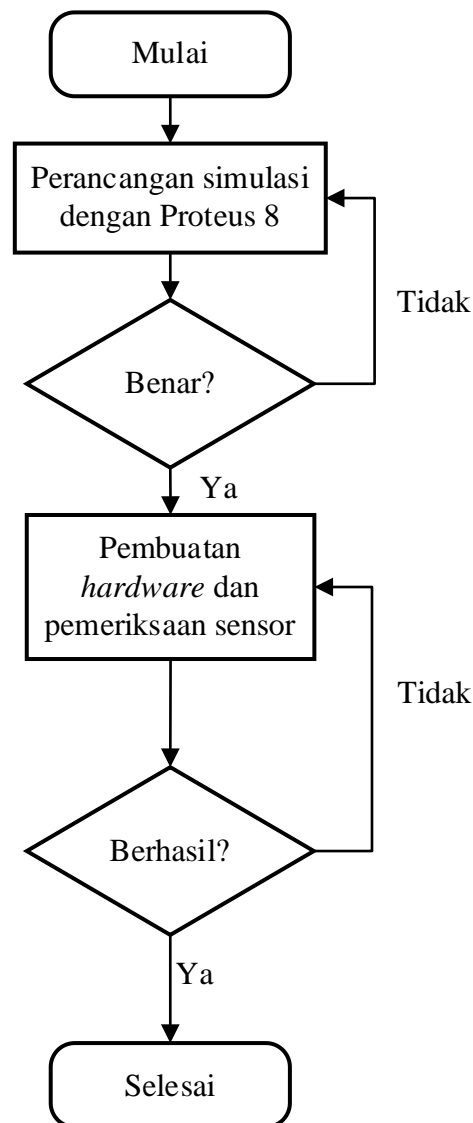
Gambar 3. 2 Blok Diagram Sistem Kontrol Motor BLDC

Kemudian akan dilakukan perhitungan efisiensi *driver* pada pengukuran dengan multimeter dan dilanjutkan perhitungan efisiensi pada pengukuran dengan sensor untuk dikalibrasi dengan pengukuran di multimeter. Perhitungan efisiensi dilakukan dengan rumus dibawah ini

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 (\%) \quad (3.1)$$

3.4 Perancangan dan Pembuatan Perangkat Keras (*Hardware*)

Perancangan perangkat keras dimulai dengan membuat desain pada *software* Proteus, yang terdiri dari pembuatan rangkaian kontrol PWM, rangkaian *driver* 3 fasa yang dihubungkan dengan sensor-sensor untuk sistem *monitoring* nya. Kemudian di desain ulang pada aplikasi Eagle yang kemudian dicetak pada PCB.

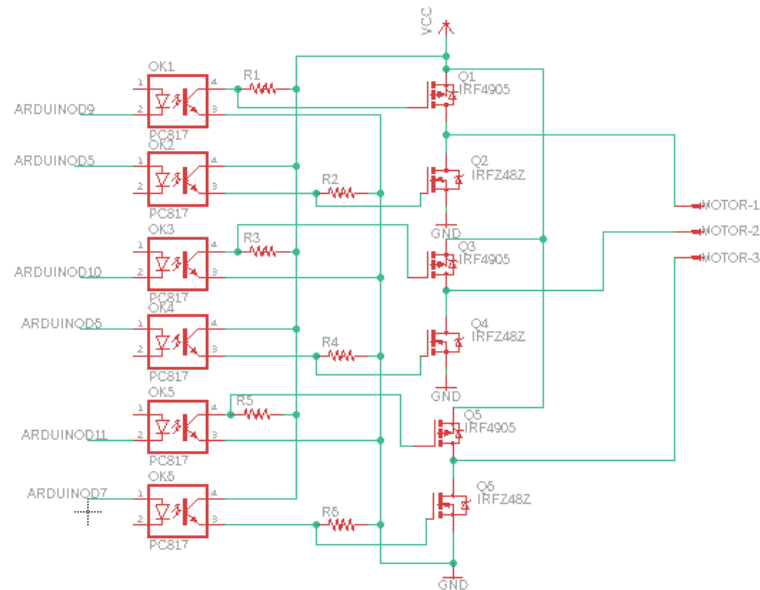


Gambar 3. 3 Diagram Alir Pembuatan *Hardware Driver* Motor BLDC

3.4.1 Perancangan Driver MOSFET 3 Fasa

Rangkaian driver MOSFET merupakan rangkaian utama pada penelitian ini, yang cara kerjanya menyesuaikan rangkaian kendali motor BLDC. Driver MOSFET disusun dengan 3 fasa, yang terdiri dari 6 buah IC Optocoupler PC817 yang masing-masing terhubung dengan MOSFET pada masing-masing jalur keluaran *High* dan *Low*. Keluaran rangkaian ini adalah 3 jalur fasa U V W yang terhubung ke motor BLDC. Masing-masing fasa terdiri dari 1 keluaran *High* dan 1 keluaran *Low*. IC Optocoupler PC817 mendapat masukan logika dari pin digital Arduino Uno, sehingga menghasilkan PWM.,

Kemudian *hardware* dapat melakukan *switching* pada MOSFET sehingga motor BLDC dapat berputar.



Gambar 3. 4 Rangkaian Driver MOSFET 3 Fasa

MOSFET IRF4905 yang digunakan sebagai saklar output HIGH bersifat *active low*, sehingga nilai PWM akan berbanding terbalik dengan nilai tegangan, nilai arus, dan kecepatan motor. Oleh karena itu, perlu ditambahkan logika invers PWM pada perancangan *software* agar tampilannya mudah dipahami.

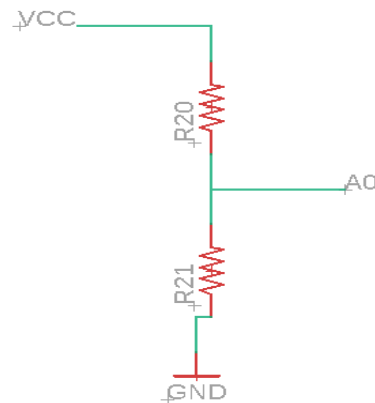
3.4.2 Perancangan Sensor Tegangan

Pada penelitian ini, sensor tegangan menggunakan rangkaian Pembagi Tegangan dengan menggunakan nilai R1 sebesar 680K Ohm dan R2 sebesar 100K Ohm. Pemilihan nilai resistor tersebut berdasarkan hasil perhitungan untuk rangkaian pembagi tegangan:

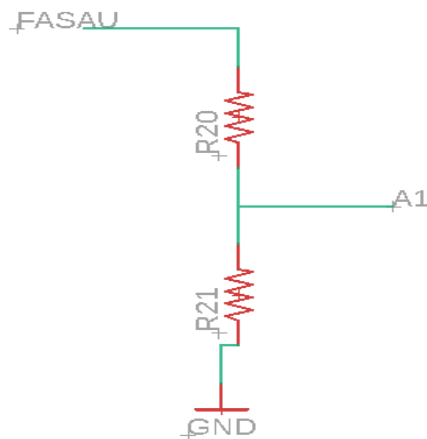
$$V_{out} = V_{in} \frac{R_1}{R_1 + R_{21}} \quad (3.2)$$

Sehingga dari perhitungan tersebut diperoleh nilai R2 sebesar 100k Ohm. Kemudian penghitungan akan dibuat lewat pemrograman arduino dan dibenahi agar diperoleh hasil pembacaan yang akurat. Rangkaian pembagi tegangan ini digunakan karena cukup sederhana dan ketelitian pembacaan yang tinggi. Rangkaian dan hasil pembacaan sensor dihubungkan ke mikrokontroler

port Analog 0 dan Analog 1 pada Arduino *Slaver* untuk diolah hasil pembacaannya.



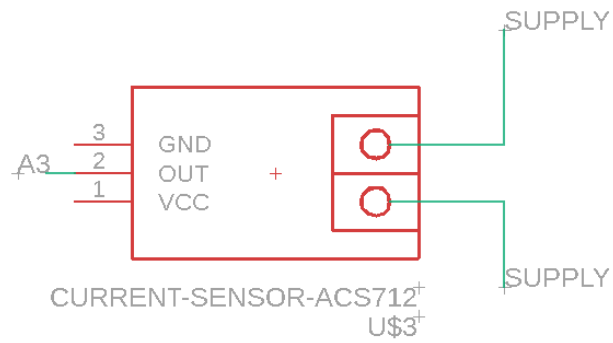
Gambar 3. 5 Sensor Tegangan Input



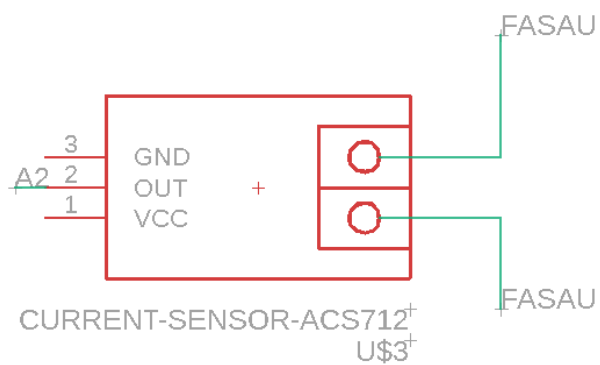
Gambar 3. 6 Sensor Tegangan Output

3.4.3 Perancangan Sensor Arus

Pembacaan nilai arus dengan modul sensor ACS712 yang dapat membaca nilai arus hingga 20 Ampere. Modul sensor ini diletakkan di titik suplai dan di salah satu titik keluaran *driver*. Rangkaian dan hasil pembacaan sensor dihubungkan ke mikrokontroler port Analog 2 dan Analog 3 pada Arduino *Slaver* untuk diolah hasil pembacaannya. ACS712 dipilih karena hasil pembacaan yang cukup stabil dan rangkaiannya sederhana.



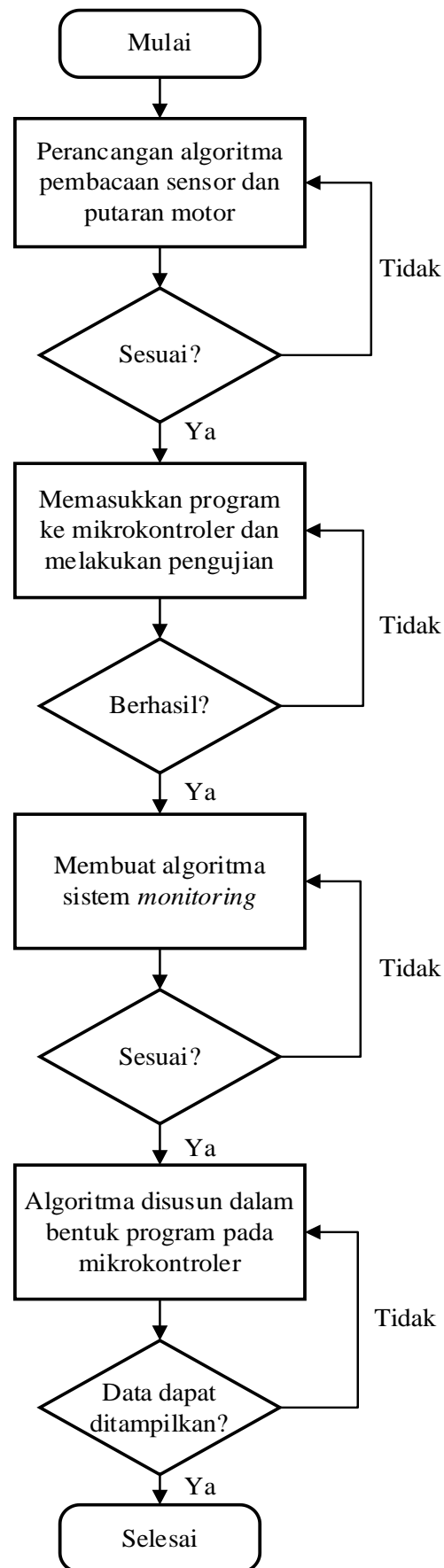
Gambar 3. 7 Sensor Arus Input



Gambar 3. 8 Sensor Arus Output

3.5 Perancangan Perangkat Lunak (*Software*)

Tahap perancangan *software* terdiri dari semua algoritma pemrosesan yang terjadi pada mikrokontroler Arduino. Perancangan *software* ini berfungsi untuk menjalankan proses pengendalian kecepatan dan pembacaan nilai sensor.

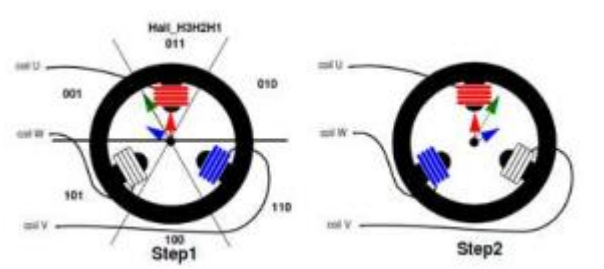
Gambar 3. 9 Perancangan *Software*

3.5.1 Perancangan Algoritma Pembacaan Sensor Hall

Pembacaan nilai keluaran sensor hall pada motor BLDC mengeluarkan nilai 5V ketika hidup dan 0V ketika mati. Informasi ini diubah ke dalam bentuk digital dan menghasilkan nilai HIGH untuk 5V dan LOW untuk 0V. Konfigurasi pembacaan dari 3 sensor hall ini berfungsi sebagai *feedback* yang kemudian diproses oleh mikrokontroler Arduino untuk menghasilkan keputusan terkait pengendalian *switching* pada rangkaian *driver* sehingga motor BLDC bisa berputar.

Tabel 3. 2 Konfigurasi Sensor Hall pada Motor BLDC

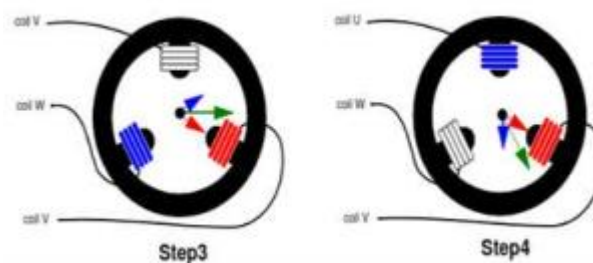
<i>Step</i> (Langkah)	Nilai Sensor Hall (H3 H2 H1)	Posisi Komutasi	Fasa	<i>Switching</i> (Pensaklaran)
1	101	5	U-V	Q1:Q4
2	001	1	U-W	Q1:Q6
3	011	3	V-W	Q3:Q6
4	010	2	V-U	Q3:Q2
5	110	6	W-U	Q5:Q2
6	100	4	W-V	Q5:Q4



Gambar 3. 10 Perubahan komutasi motor *step* 1 dan *step* 2

Simak gambar 2.4, komutasi motor mengalami perubahan berdasarkan nilai sensor hall. Pada kolom nilai sensor hall, nilai tersebut berasal dari konstanta *step* pada komutasi motor BLDC. Komutasi tersebut menghasilkan medan putar, berputarnya motor harus dilakukan secara bertahap sesuai dengan nilai sensor hall. Diawali dari *step* 1, fasa U disambungkan ke kutub positif *power supply* pada *driver* motor BLDC melalui (Q1), lalu fasa V dihubungkan

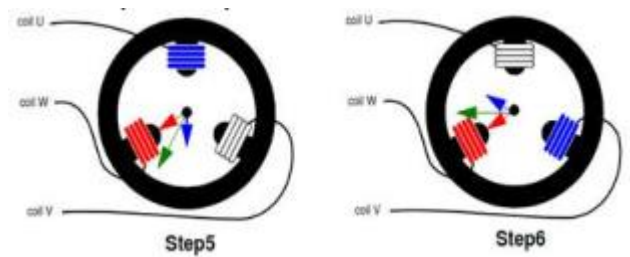
ke netral *ground* melalui (Q4), untuk fasa W tidak diberikan sinyal supaya *switching* berjalan lancar, kemudian 2 buah vektor fluks dihasilkan oleh fasa U (panah merah) dan fasa V (panah biru). Penjumlahan dari kedua vektor tersebut menghasilkan vektor fluks pada stator (panah hijau) dimana rotor akan mengikuti arah fluks stator tersebut sesuai dengan programnya. Pada kondisi ini motor sedang *standby* untuk menunggu putaran berikutnya, Ketika posisi rotor mencapai posisi tertentu yang diberikan oleh program, maka nilai pernyataan logika pada sensor hall berganti dari “101” ke “001”, sehingga pola tegangan baru tercipta pada motor BLDC dengan keadaan fasa V tidak diberikan sinyal tetapi fasa W yang sekarang terhubung ke netral *ground* (Q6), dan fasa U tetap di posisi tersambung ke positif melalui (Q1) dimana posisi vektor fluks stator (panah hijau) sekarang berada di posisi yang ditunjukkan gambar *step 2* [2]. Kejadian tersebut menunjukkan bahwa di setiap pergantian *step* harus ada satu MOSFET (Q) yang jalurnya tetap ada sinyal baik itu dari *power supply* maupun ke *ground* [2].



Gambar 3. 11 Perubahan komutasi motor *step 3* dan *step 4*

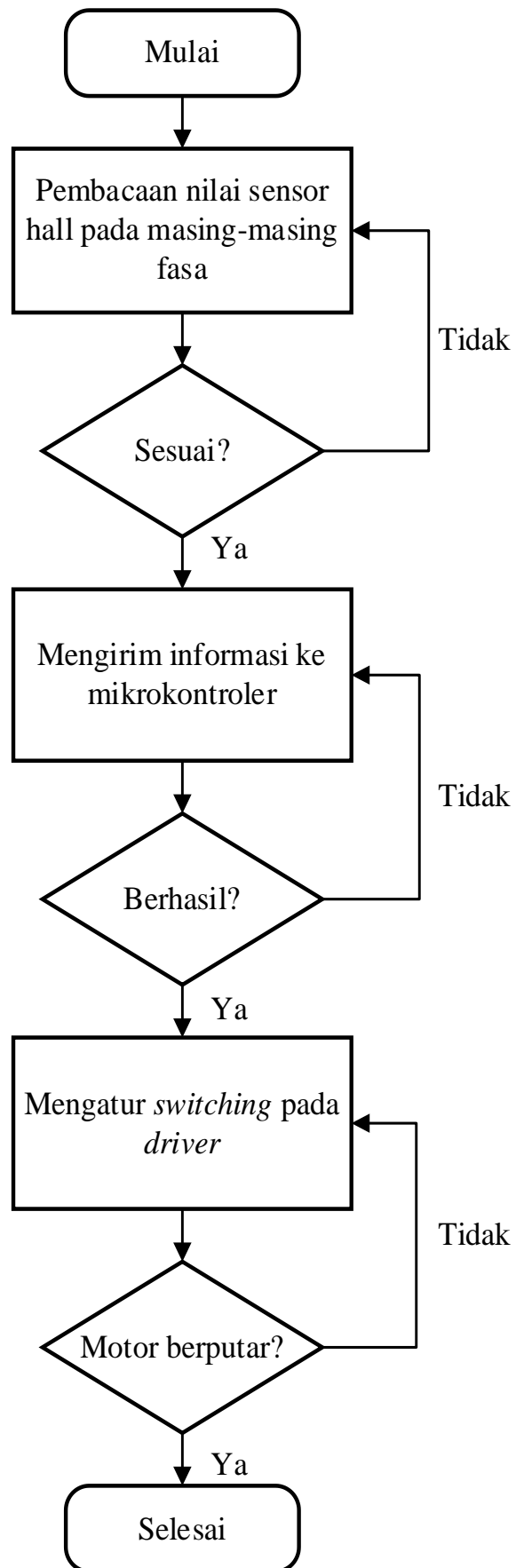
Mengacu pada gambar 2.3 dan Tabel 1, kita dapat menentukan *switch* (Q) yang sekarang aktif ketika fasa tertentu akan diberikan sinyal sehingga arah putaran rotor bisa terlihat. Pada *step 3* fasa yang aktif adalah V-W yang artinya fasa V terhubung ke kutub positif melalui (Q3) dan fasa W tetap terhubung ke netral *ground* melalui (Q6) melanjutkan *step* sebelumnya (*step 2*). Sedangkan fasa U tidak diberikan sinyal sehingga posisi vektor fluks stator berada pada posisi tersebut [2]. Hal itu berarti jika pada *step* sebelumnya (Q) yang tetap tersambung adalah (Q) yang sama dengan ciri-ciri diberikan sinyal oleh *power supply*, maka *step* selanjutnya (Q) terhubung pada netral *ground* adalah (Q) yang sama. Lanjut ke *step 4* fasa yang aktif adalah V-U yang artinya fasa V

tetap terhubung ke kutub positif melalui (Q3) dan fasa U terhubung ke netral *ground* melalui (Q2) sedangkan fasa W tidak diberikan sinyal sehingga rotor terus berputar ke arah fluks stator pada *step* 4 [2].



Gambar 3. 12 Perubahan komutasi motor *step* 5 dan *step* 6

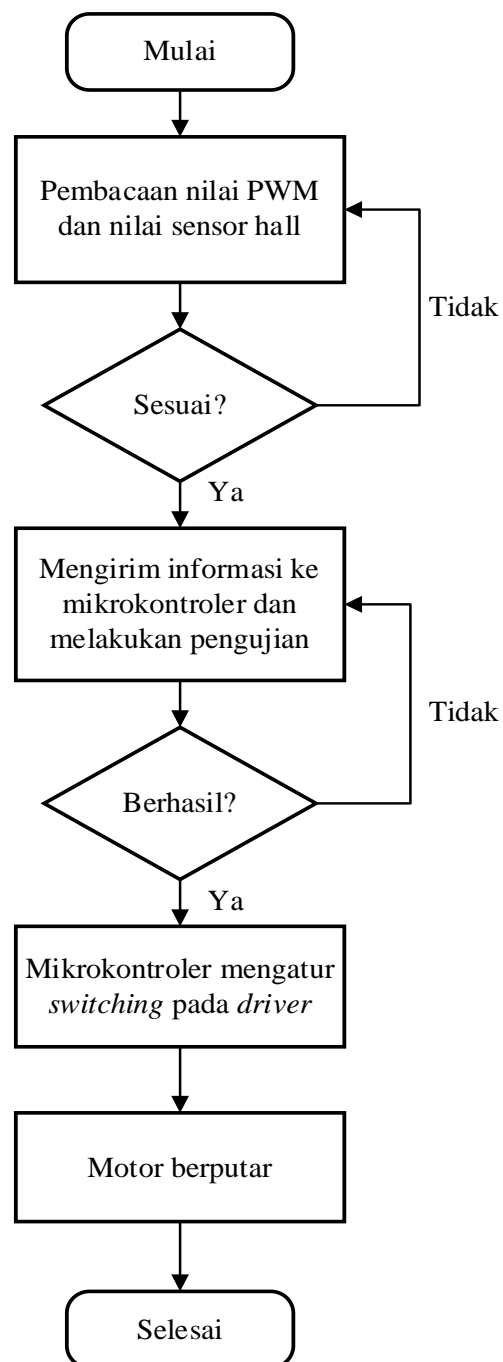
Perhatikan gambar 2.4 dan tabel 1, pada *step* 5 dan *step* 6 terlihat beda fasa lagi yang diberikan sinyal. Pada *step* 5 fasa yang aktif adalah fasa W-U yang artinya fasa W tersambung ke kutub positif melalui (Q5) dan fasa U tersambung ke netral *ground* melalui (Q2) sedangkan fasa V tidak diberikan sinyal sehingga arah rotor berputar mengikuti arah vektor fluks stator yang telah dihasilkan. Pada *step* 6, terjadi proses yang setara dengan *step-step* terdahulu, fasa yang diaktifkan adalah W-V yang artinya fasa W terhubung ke kutub positif melalui (Q5) dan fasa V terhubung ke netral *ground* melalui (Q4) sedangkan fasa U tidak diberikan sinyal dan selanjutnya proses putaran motor kembali ke *step* 1. Jadi, terdapat 6 langkah (*step*) putaran elektris motor BLDC secara berurutan untuk melakukan 1 putaran penuh mekanis motor BLDC [2].



Gambar 3. 13 Algoritma Pembacaan Sensor Hall

3.5.2 Perancangan Algoritma Kendali Motor BLDC

Algoritma pengendalian motor BLDC tersusun dari pembacaan nilai PWM yang terhubung ke Arduino, yang dihasilkan melalui *feedback* dari pembacaan nilai sensor hall. Apabila kedua syarat tersebut telah terpenuhi, maka mikrokontroler akan membuat keputusan untuk pensaklaran IC PC817 yang akan mengatur putaran motor BLDC sesuai dengan tabel konfigurasi. Diagram alir pada proses ini adalah sebagai berikut:



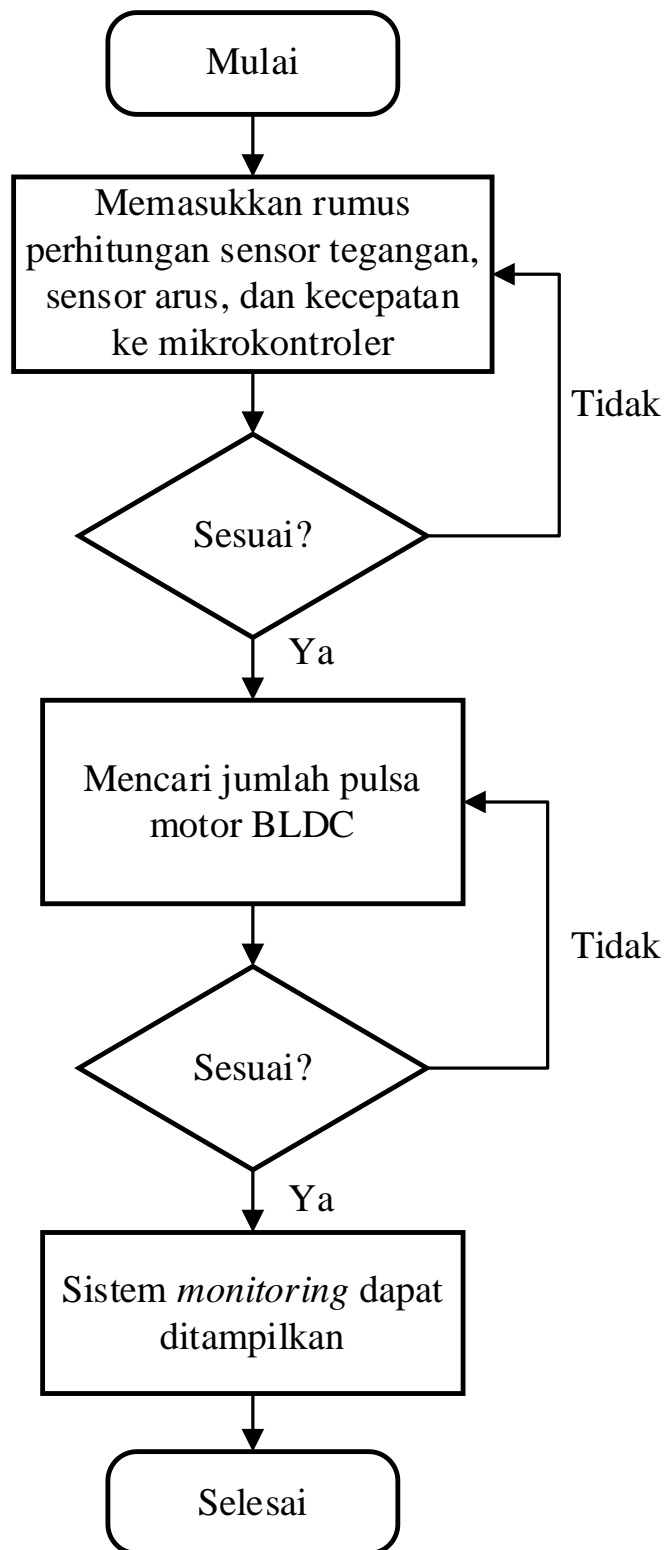
Gambar 3. 14 Algoritma Sistem Kendali Motor BLDC

3.5.3 Perancangan Algoritma Pembacaan Tegangan, Arus, dan Kecepatan Motor BLDC

Tahap pembuatan algoritma ini baru dapat dilakukan setelah motor dapat berputar. Penghitungan nilai tegangan dan arus dapat dilakukan pada masing-masing sensor yang telah terpasang. Sensor tegangan terpasang masing-masing satu di jalur suplai dan satu jalur output fasa U, begitu juga dengan sensor arus. Namun dengan catatan nilai tegangan dan arus output di fasa lain dianggap sama dengan fasa U. Sedangkan penghitungan kecepatan dalam bentuk rpm (*radiant per minute*) dapat diketahui dengan perhitungan :

$$rpm = \frac{\text{Jumlah siklus putar per detik} \times 60}{\text{Pulsa motor}} \quad (3.3)$$

Pulsa motor adalah keadaan dimana motor BLDC melakukan satu siklus yang terdiri dari 6 logika sensor hall. Pulsa motor dapat diketahui dengan berbagai cara, yaitu menggunakan Serial Plotter pada aplikasi Arduino IDE ketika motor diputar secara manual, melakukan pemeriksaan gelombang keluaran pada osiloskop saat motor berputar otomatis, dan mengkalibrasi kecepatan di program Arduino terhadap pengukuran kecepatan dengan tachometer. Pengukuran kecepatan dengan coding pada Arduino adalah menghubungkan salah satu pin sensor Hall dengan pin *Interrupt* Arduino.



Gambar 3. 15 Algoritma Sistem *Monitoring*

BAB IV

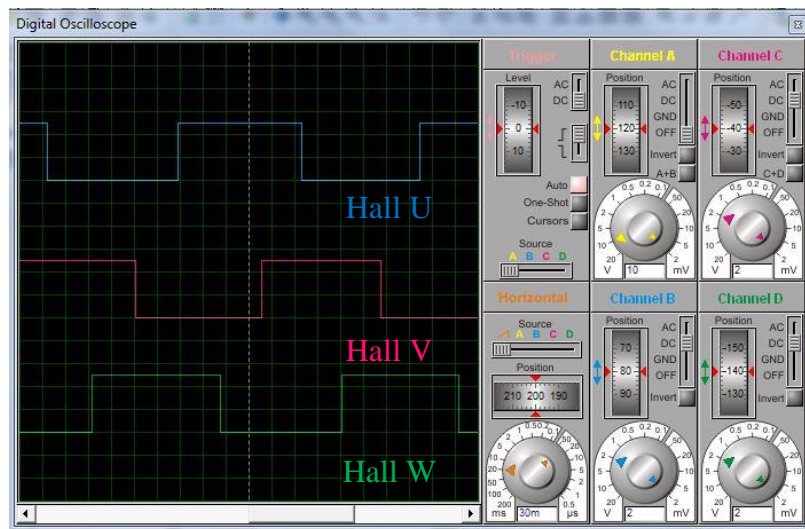
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Simulasi

Pengujian simulasi dilakukan menggunakan *software* Proteus 8. Pengujian yang dilakukan hanya terbatas pada pengujian pembacaan gelombang keluaran sensor hall, gelombang PWM dan gelombang keluaran dari rangkaian *driver*, dilanjutkan dengan pengujian tegangan pada fasa dan arus rangkaian. Pengamatan gelombang keluaran dilakukan untuk mengetahui bentuk gelombang pada masing-masing fasa dan kemudian dibandingkan dengan gelombang keluaran dari *hardware*.

4.1.1 Gelombang Keluaran Sensor Hall

Hasil simulasi menunjukkan keluaran sinyal dari sensor hall berasal dari respon yang dihasilkan oleh putaran motor BLDC. Sinyal yang dihasilkan sesuai dengan referensi, dimana terdapat perbedaan sudut fasa sebesar 120° antar fasa. Level tegangan yang dihasilkan adalah HIGH untuk 5V dan LOW untuk 0V. Hasil menunjukkan bahwa terdapat perbedaan 120° antar masing-masing fasa dan waktu setiap kondisi sebuah *step* bertahan dengan konfigurasi yang sama adalah 50 ms. Hasil simulasi ini sesuai dengan referensi, dan tidak dijumpai noise pada gelombang hasil pengujian.



Gambar 4. 1 Simulasi Gelombang Keluaran Sensor Hall

Pada gambar diatas menunjukkan bahwa sumbu x adalah periode dimana setiap kotak bernilai 30 ms sedangkan sumbu y adalah tegangan dimana setiap kotak bernilai 2 V. Pada tabel dibawah ini menunjukkan bahwa *step* pada

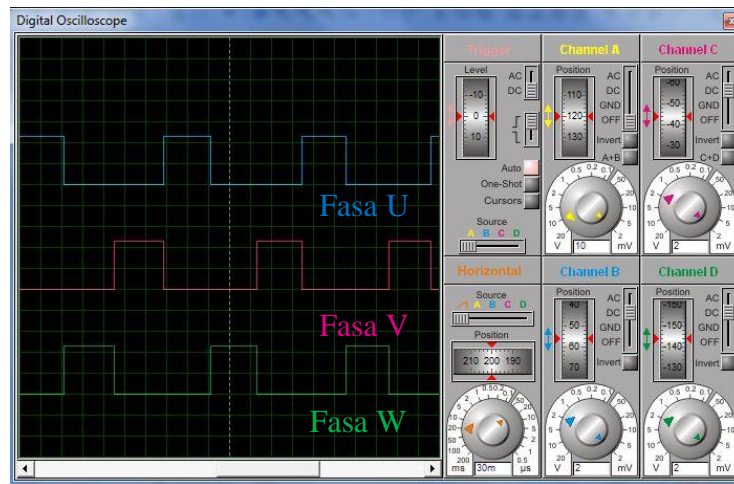
ketiga sensor hall dapat berfungsi karena dapat menampilkan semua konfigurasi *step* pada putaran motor BLDC.

Tabel 4. 1 Perbandingan Simulasi Kondisi Ketiga Sensor Hall

Periode (setiap 30 ms)	Tegangan Hall U (V)	Tegangan Hall V (V)	Tegangan Hall W (V)
1	5	5	0
2	0	5	0
3	0	5	0
4	0	5	5
5	0	5	5
6	0	0	5
7	0	0	5
8	5	0	5
9	5	0	5
10	5	0	0
11	5	0	0
12	5	5	0
13	0	5	0
14	0	5	0
15	0	5	5
16	0	5	5
17	0	0	5
18	5	0	5
19	5	0	5
20	5	0	0

4.1.2 Gelombang Keluaran PWM

Hasil simulasi menunjukkan bentuk sinyal keluaran PWM pada pin yang dipicu oleh output *high* pada mikrokontroler Arduino, yaitu pin 9, 10, 11. Dimana pin 9 tersambung pada fasa U, pin 10 tersambung pada fasa V, dan pin 11 tersambung pada fasa W. Hasil menunjukkan bahwa terdapat perbedaan 120° antar masing-masing fasa. Waktu setiap kondisi sebuah *step* bertahan dengan konfigurasi yang sama adalah 75 ms. Pada setiap fasa sinyal PWM pada keadaan ON bertahan selama 75 ms, sedangkan pada keadaan OFF bertahan selama 135 ms sehingga menghasilkan *duty cycle* sebesar 35,7%. Hasil simulasi ini sesuai dengan referensi, dan tidak dijumpai noise pada gelombang hasil pengujian. Hasil simulasi ini sesuai dengan referensi, dan tidak dijumpai noise pada gelombang hasil pengujian.



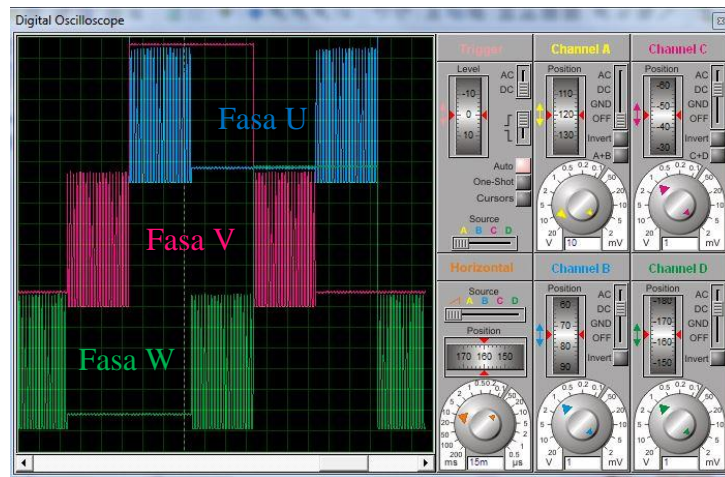
Gambar 4. 2 Simulasi Gelombang PWM Ketiga Fasa

Tabel 4. 2 Perbandingan Simulasi Nilai PWM Ketiga Fasa

Periode (setiap 30 ms)	Tegangan Hall U (V)	Tegangan Hall V (V)	Tegangan Hall W (V)
1	5	0	0
2	5	0	0
3	0	0	5
4	0	0	5
5	0	5	0
6	0	5	0
7	0	5	0
8	5	0	0
9	5	0	0
10	0	0	5
11	0	0	5
12	0	5	0
13	0	5	0
14	5	0	0
15	5	0	0
16	5	0	0
17	0	0	5
18	0	0	5
19	0	5	0
20	0	5	0

4.1.3 Gelombang Keluaran Output Motor BLDC

Pada pengujian ini dilakukan pengamatan gelombang keluaran pada *driver* motor, yaitu hasil keluaran ketiga fasa yang terhung ke motor BLDC. Ketiga fasa berhasil melakukan *switching* dengan perbedaan fasa sebesar 120° . Bentuk gelombang yang dihasilkan cukup sempurna, tanpa ada noise. Waktu sebuah fasa bertahan dengan kondisi yang sama adalah 45 ms.



Gambar 4. 3 Simulasi Gelombang Keluaran Fasa UVW

Pada gambar diatas menunjukkan bahwa sumbu x adalah periode dimana setiap kotak bernilai 15 ms sedangkan sumbu y adalah tegangan dimana setiap kotak bernilai 1 V. Pada tabel dibawah menunjukkan bahwa *switching* berfungsi karena dapat menampilkan semua kondisi fasa dan setiap fasa menampilkan kondisi yang berbeda pada setiap periode.

Tabel 4. 3 Perbandingan Simulasi Kondisi Keluaran Ketiga Fasa

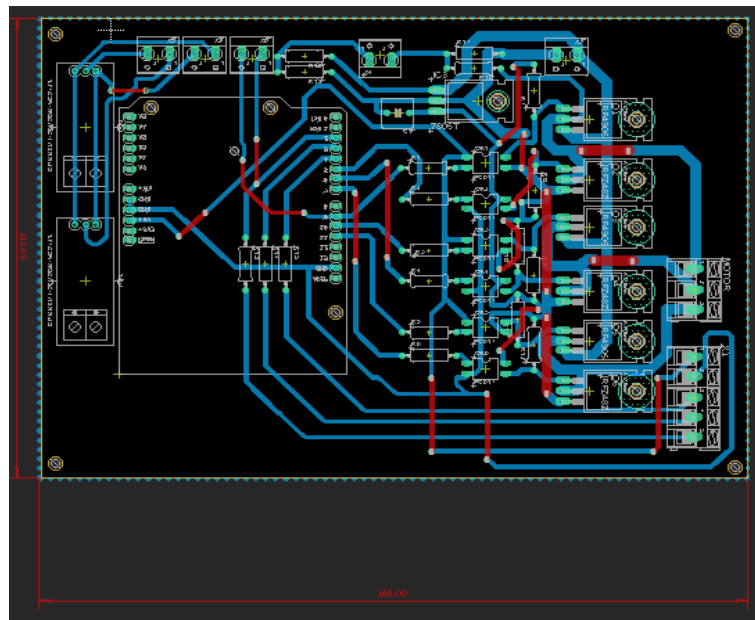
Periode (setiap 15 ms)	Tegangan Fasa U (V)	Tegangan Fasa V (V)	Tegangan Fasa W (V)
1	13	0	6.5
2	13	0	6.5
3	13	0	6.5
4	13	6.5	0
5	13	6.5	0
6	13	6.5	0
7	6.5	13	0
8	6.5	13	0
9	6.5	13	0
10	0	13	6.5
11	0	13	6.5
12	0	13	6.5
13	0	6.5	13
14	0	6.5	13
15	0	6.5	13
16	6.5	0	13
17	6.5	0	13
18	6.5	0	13
19	13	0	6.5
20	13	0	6.5

4.2 Pembuatan Alat

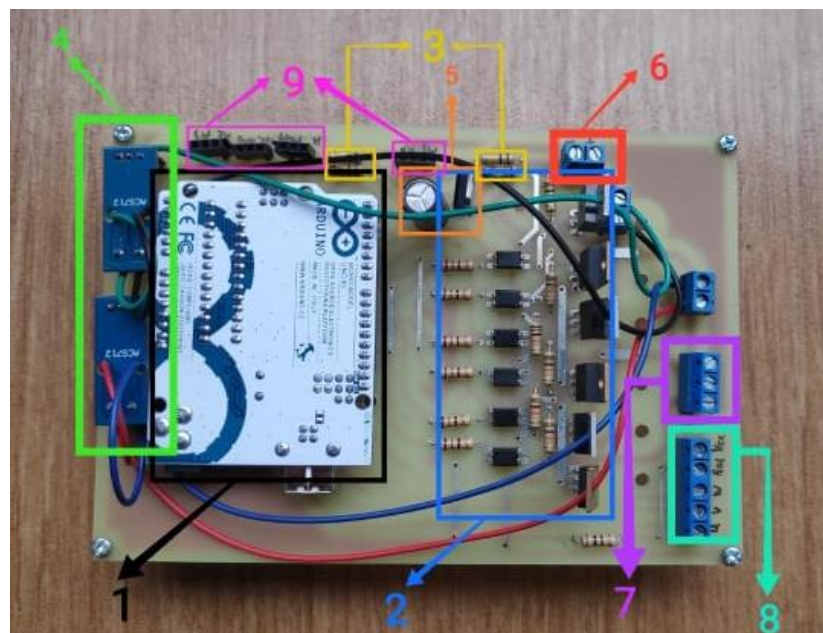
Pembuatan alat dilakukan setelah pengujian simulasi berhasil dilakukan dan diperoleh hasil sesuai yang diinginkan. Tahap ini dimulasi dengan membuat *layout* PCB berdasarkan rangkaian yang telah dibuat di simulasi Proteus. Setelah *layout* selesai dibuat, dilakukan pengecekan jalur dan kemudian dicetak di papan PCB. Kemudian dilakukan pemasangan komponen menggunakan solder. Hasil pembuatan alat dapat diamati pada gambar berikut:

Gambar 4. 4 Desain Alat pada Eagle

Karena komponen Arduino Uno *layout library* nya tidak ada di Proteus, maka *layout* dibuat di aplikasi Eagle. Penyusunan komponen dibuat serapi mungkin dengan jalur yang sesuai. Desain papan PCB menggunakan *double sided layer* dengan ukuran 11,36 x 16,6 Cm.. Desain layout PCB yang telah selesai dibuat dapat diamati pada gambar berikut ini:



Gambar 4. 5 Layout PCB



Gambar 4. 6 Hardware Driver

Pada gambar diatas terdapat *hardware* yang tersusun dari beberapa komponen Sesuai dengan desain yang dibuat. Berikut ini adalah keterangan dari rangkaian hardware yang telah dibuat:

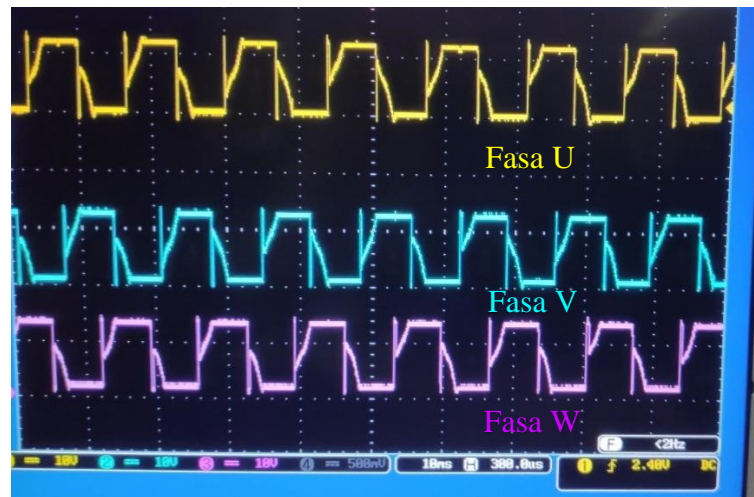
1. Arduino Uno R3
2. Rangkaian Driver Tiga Fasa
3. Sensor Tegangan
4. Sensor Arus
5. Regulator 7812
6. Port *power supply*
7. Port motor
8. Port sensor hall
9. Pin *Monitoring*

4.3 Pengujian Gelombang Keluaran Driver

Pada tahap ini, dilakukan pengamatan bentuk gelombang dari rangkaian *driver* yang telah dibuat. Pengujian dilakukan dengan mengamati bentuk gelombang keluaran dari fasa UVW, bentuk gelombang PWM ketiga fasa, dan bentuk gelombang sensor Hall.

4.3.1 Gelombang Keluaran Ketiga Fasa

Pengujian dilakukan untuk mengetahui bentuk gelombang yang dihasilkan oleh rangkaian driver motor yang telah dibuat. Hasil pengujian menunjukkan gelombang keluaran memiliki perbedaan sudut sebesar 120° antar fasa nya. Pada pengamatan ini masih ditemukan *noise* pada keluaran sinyal, hal ini disebabkan oleh kualitas komponen yang dipakai, jenis motor yang diujikan dan pembacaan osiloskop yang kurang sempurna. Nilai tegangan keluaran bernilai 13,4 V pada ketinggian maksimum dan 0,4 V pada nilai minimum. Gambar sampel hasil pengujian adalah sebagai berikut:



Gambar 4. 7 Gelombang Keluaran Fasa UVW

Pada gambar diatas menunjukkan bahwa sumbu x adalah periode dimana setiap kotak bernilai 10 ms sedangkan sumbu y adalah tegangan dimana setiap kotak bernilai 10 V. Pada tabel dibawah ini menunjukkan bahwa *switching* pada ketiga fasa dapat berfungsi karena dapat menampilkan semua konfigurasi pada putaran motor BLDC dan setiap fasa menampilkan kondisi yang berbeda pada setiap periode.

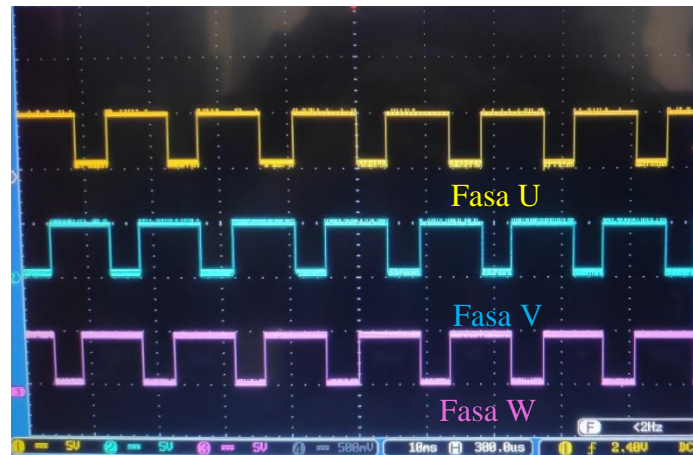
Tabel 4. 4 Perbandingan Keluaran Ketiga Fasa

Periode (setiap 10 ms)	Tegangan Fasa U (V)	Tegangan Fasa V (V)	Tegangan Fasa W (V)
1	13.4	0.4	0
2	0.4	0	13.4
3	0	13.4	0.4
4	13.4	0	0.4
5	0	0.4	13.4
6	0.4	0	13.4
7	0	13.4	0.4
8	13.4	0	0.4
9	0	0.4	13.4
10	0.4	13.4	0

4.3.2 Gelombang Keluaran PWM

Hasil simulasi menunjukkan bentuk sinyal keluaran PWM pada pin yang dipicu oleh output *high* pada mikrokontroler Arduino, yaitu pin 9, 10, 11. Dimana pin 9 tersambung pada fasa U, pin 10 tersambung pada fasa V, dan pin 11 tersambung pada fasa W. Sinyal PWM yang dikeluarkan merupakan sinyal pada ketiga fasa. Hasil menunjukkan bahwa terdapat perbedaan 120° antar

masing-masing fasa. Waktu setiap kondisi sebuah *step* bertahan dengan konfigurasi yang sama adalah 4 ms. Pada setiap fasa sinyal PWM pada keadaan ON bertahan selama 9 ms, sedangkan pada keadaan OFF bertahan selama 4 ms sehingga menghasilkan *duty cycle* sebesar 69,2%. Hasil simulasi ini sesuai dengan referensi, dan tidak dijumpai noise pada gelombang hasil pengujian.



Gambar 4. 8 Gelombang PWM Fasa UVW

Tabel 4. 5 Perbandingan Nilai PWM Ketiga Fasa

Periode (setiap 10 ms)	Tegangan Fasa U (V)	Tegangan Fasa V (V)	Tegangan Fasa W (V)
1	5	5	0
2	5	0	5
3	0	5	5
4	0	5	5
5	5	5	0
6	5	0	5
7	0	5	5
8	5	5	0
9	5	0	5
10	0	5	5

4.3.3 Gelombang Keluaran Sensor Hall

Pengujian dilakukan untuk mengetahui sinyal yang dihasilkan pada ketiga sensor hall. Keluaran sinyal dari sensor hall berasal dari respon yang dihasilkan oleh putaran motor BLDC. Sinyal yang dihasilkan sesuai dengan referensi, dimana terdapat perbedaan sudut fasa sebesar 120° antar fasa. Level tegangan yang dihasilkan adalah HIGH untuk 5V dan LOW untuk 0V. Gambar sampel sinyal hall yang dihasilkan adalah sebagai berikut:



Gambar 4. 9 Gelombang Keluaran Sensor Hall

Pada gambar diatas menunjukkan bahwa sumbu x adalah periode dimana setiap kotak bernilai 10 ms sedangkan sumbu y adalah tegangan dimana setiap kotak bernilai 5 V. Pada tabel dibawah ini menunjukkan bahwa *step* pada ketiga sensor hall dapat berfungsi karena dapat menampilkan semua konfigurasi *step* pada putaran motor BLDC.

Tabel 4. 6 Perbandingan Kondisi Ketiga Sensor Hall

Periode (setiap 10 ms)	Tegangan Hall U (V)	Tegangan Hall V (V)	Tegangan Hall W (V)
1	0	0	5
2	5	0	5
3	5	5	0
4	0	5	0
5	0	0	5
6	5	0	5
7	5	5	0
8	0	5	0
9	0	0	5
10	5	0	5

4.4 Pengujian Kalibrasi Sensor Tegangan

Pengujian sensor ini dilakukan dengan membaca nilai keluaran dari sensor tegangan dan sensor arus pada rangkaian. Sensor yang terhubung pada port analog 0 pada tegangan input dan port analog 1 pada tegangan output akan menghasilkan tegangan sebesar 0-5V yang kemudian dikonversi oleh arduino menjadi 0-36 VDC.

4.4.1 Hasil Pembacaan Tegangan

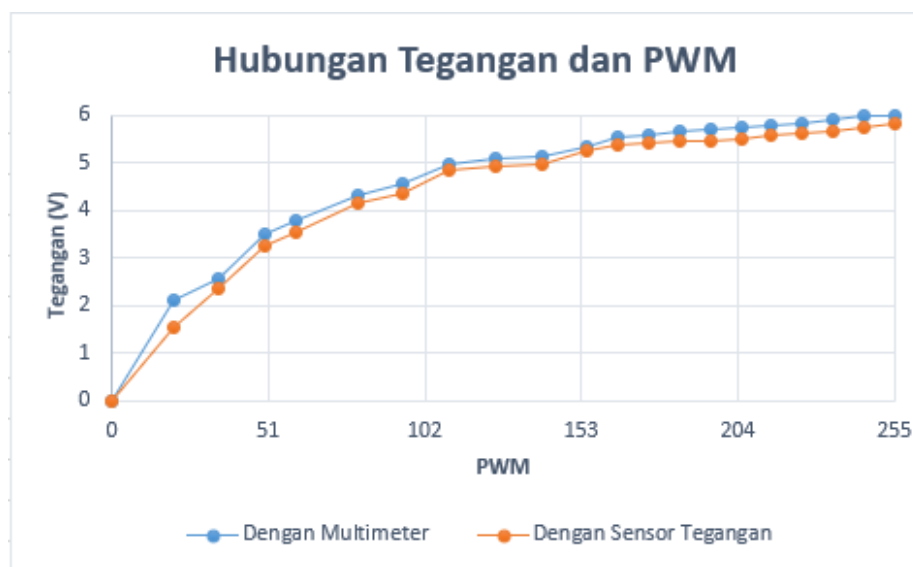
Nilai tegangan input sudah sesuai dengan tegangan *power supply* sebesar 12 VDC. Nilai maksimum tegangan output tanpa beban yang digunakan oleh motor adalah sebesar 6 VDC dan 0 VDC ketika motor berhenti berputar ketika diukur dengan multimeter. Sedangkan ketika diukur dengan sensor tegangan nilai maksimum mencapai rata-rata 5.84 V hasil lima kali pengukuran. Nilai tegangan ketika diukur dengan multimeter dan sensor tidak berbeda jauh. Akan tetapi nilai tegangan output ketika diukur dengan sensor tegangan sering terjadi fluktuasi karena pembacaan nilai hanya mencakup pada salah satu output saja. Selain itu juga terdapat sedikit eror pada pembacaan nilai karena kualitas dan spesifikasi komponen yang digunakan serta kecepatan baca Arduino terhadap *switching* motor BLDC. Nilai pembacaan sensor dapat diamati pada tabel berikut ini:

Tabel 4. 7 Perbandingan Pengukuran Nilai Tegangan dengan Multimeter dan dengan Sensor Tegangan dan Hubungan Nilai Tegangan dengan PWM

PWM	Nilai Tegangan Dengan Multimeter (V)	Nilai Tegangan Dengan Sensor (V)
0	0	0
20	2.13	1.56
35	2.57	2.36
50	3.51	3.26
60	3.78	3.54
80	4.33	4.17
95	4.58	4.37
110	4.96	4.83
125	5.08	4.94
140	5.14	4.97
155	5.33	5.26
165	5.55	5.39
175	5.59	5.43
185	5.66	5.45
195	5.7	5.46
205	5.73	5.5
215	5.79	5.58
225	5.81	5.63
235	5.91	5.67
245	5.97	5.73
255	6	5.84

4.4.2 Hubungan Perubahan PWM dan Tegangan

Pada grafik dibawah menunjukkan hubungan perubahan nilai tegangan output pada salah satu fasa terhadap perubahan nilai PWM. Grafik dibawah menunjukkan bahwa nilai PWM berbanding lurus dengan nilai tegangan karena diberikan nilai PWM invers pada coding, baik pengukuran dengan multimeter maupun sensor tegangan. Hal tersebut terjadi karena nilai PWM yang dimasukkan di coding pada bagian pengaturan *switching* tegangan berbanding terbalik dengan nilai tegangan output motor karena MOSFET IRF4905 yang digunakan sebagai saklar output HIGH bersifat *active low*.



Gambar 4. 10 Grafik Perbandingan Nilai Tegangan pada Pengukuran dengan Multimeter dan dengan Sensor beserta Hubungan Tegangan dengan PWM

4.5 Pengujian Kalibrasi Sensor Arus

Nilai pembacaan dari sensor arus ACS712 akan diteruskan ke arduino melalui port analog 2 pada arus output dan port analog 3 pada arus input. Nilai keluaran dari sensor arus ini adalah sebesar 0-5A yang diolah menjadi 0-20A oleh mikrokontroler.

4.5.1 Hasil Pembacaan Sensor Arus

Nilai maksimum arus output tanpa beban yang digunakan oleh motor adalah sebesar 100 mA dan 0 A ketika motor berhenti berputar ketika diukur dengan multimeter. Sedangkan ketika diukur dengan sensor tegangan nilai maksimum mencapai rata-rata 30 mA hasil lima kali pengukuran. Nilai arus ketika diukur dengan sensor sering terjadi nilai yang sama pada beberapa nilai PWM karena pembacaan

arus hanya mencakup pada salah satu output saja dan dibarengi dengan kecepatan baca Arduino terhadap switching motor BLDC.

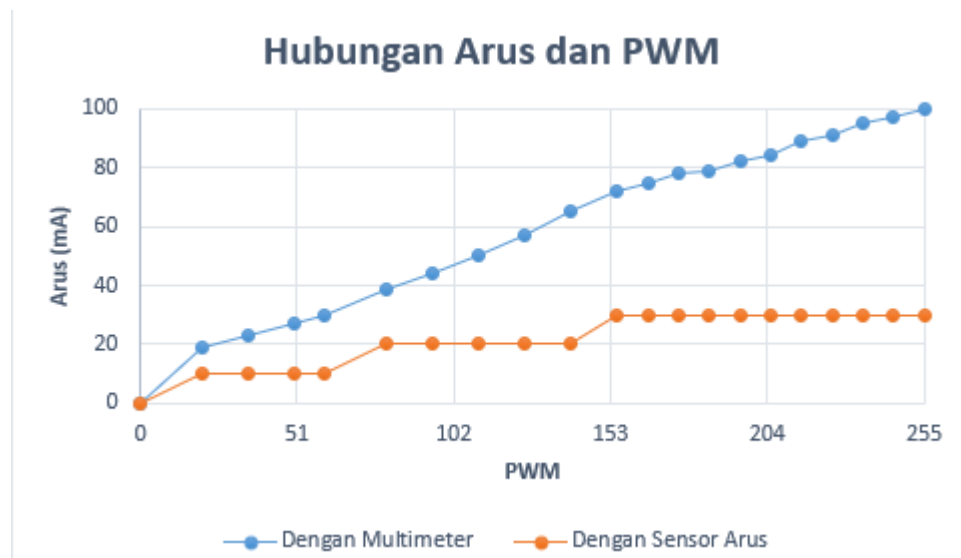
Tabel 4. 8 Perbandingan Pengukuran Nilai Arus dengan Multimeter dan dengan Sensor Arus dan Hubungan Nilai Arus dengan PWM

PWM	Dengan Multimeter (mA)	Dengan Sensor Arus (mA)
0	0	0
20	19	10
35	23	10
50	27	10
60	30	10
80	39	20
95	44	20
110	50	20
125	57	20
140	65	20
155	72	30
165	75	30
175	78	30
185	79	30
195	82	30
205	84	30
215	89	30
225	91	30
235	95	30
245	97	30
255	100	30

4.5.2 Hubungan Perubahan PWM dan Arus

Pada grafik dibawah, dapat diamati mengenai hubungan perubahan nilai PWM terhadap nilai arus output yang masuk ke rangkaian. Grafik dibawah menunjukkan bahwa perubahan arus mengikuti perubahan nilai PWM yang diberikan oleh mikrokontroler pada pengukuran arus dengan multimeter, dimana nilai PWM berbanding lurus dengan nilai arus karena diberikan nilai PWM invers pada coding. Hal tersebut terjadi karena nilai PWM yang dimasukkan di coding pada bagian pengaturan *switching* tegangan berbanding terbalik dengan nilai tegangan output motor karena MOSFET IRF4905 yang digunakan sebagai saklar output HIGH bersifat *active low*. Sedangkan pada pengukuran arus dengan sensor menunjukkan

bahwa nilai arus juga berbanding lurus dengan nilai PWM, namun sering terjadi nilai yang sama pada beberapa nilai PWM.



Gambar 4. 11 Grafik Perbandingan Nilai Arus pada Pengukuran dengan Multimeter dan dengan Sensor beserta Hubungan Arus dengan PWM

4.6 Pengujian Pembacaan Kecepatan Motor BLDC

Pembacaan nilai kecepatan motor dilakukan dengan pembacaan kondisi salah satu sensor hall yang terhubung pada pin *interrupt* Arduino Uno *Slaver* dan kemudian diolah tiap satu detik menjadi nilai kecepatan putar dalam RPM. Pada rangkaian yang dibuat, pembacaan nilai hall sensor dikeluarkan dari port digital 3 yang terhubung dengan keluaran salah satu sensor hall. Pembacaan tersebut kemudian diolah oleh mikrokontroler untuk ditampilkan menjadi nilai RPM pada serial monitor Arduino.

Pada penelitian ini, motor yang diujikan adalah motor BLDC bekas dari pabrik. Spesifikasi dari motor ini adalah 200 W dengan tegangan maksimal sebesar 24V dan arus nominal sebesar 8,33 A..

4.6.1 Hasil Pembacaan Kecepatan Motor BLDC pada Variasi Nilai PWM

Hasil pembacaan nilai kecepatan motor BLDC oleh mikrokontroler arduino *master* menunjukkan bahwa kecepatan putar motor dipengaruhi oleh nilai PWM yang masuk ke motor BLDC. Nilai kecepatan maksimal dari motor BLDC ini adalah 551 rpm pada nilai PWM 255 dan motor akan berhenti ketika nilai PWM mencapai 0 atau nilai minimum. Nilai PWM berbanding lurus dengan kecepatan karena diberikan nilai PWM invers pada coding. Hal tersebut terjadi karena nilai PWM yang dimasukkan di coding pada bagian pengaturan

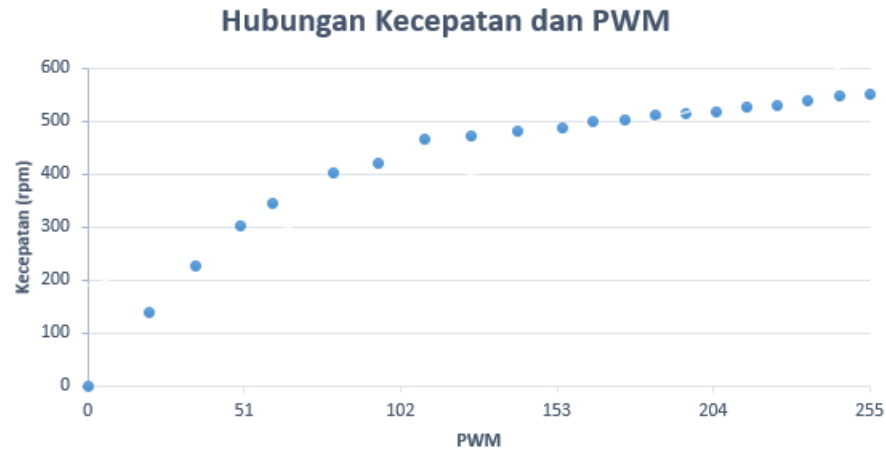
switching tegangan berbanding terbalik dengan nilai tegangan output motor karena MOSFET IRF4905 yang digunakan sebagai saklar output HIGH bersifat *active low*. Nilai kecepatan masih jauh dari maksimum yang dihasilkan oleh motor BLDC ini yaitu 1400 rpm karena hanya menggunakan *power supply* 12 V. Pengujian ini dilakukan pada kondisi tanpa beban, untuk mengetahui performa maksimal dari motor BLDC yang diujikan.

Tabel 4. 9 Perbandingan Nilai PWM dengan Kecepatan Motor

PWM	Kecepatan (rpm)
0	0
20	138
35	228
50	303
60	345
80	401
95	420
110	465
125	472
140	480
155	487
165	498
175	502
185	510
195	513
205	517
215	525
225	528
235	540
245	547
255	551

4.6.2 Grafik Regresi Perubahan PWM dan Nilai Kecepatan Motor

Hasil pengujian kecepatan putaran motor BLDC diatas kemudian diolah menjadi grafik regresi untuk mengetahui persamaan dari alat yang dibuat. Grafik tersebut dapat adalah sebagai berikut:



Gambar 4. 12 Grafik Perbandingan Nilai PWM dan Kecepatan Motor

Dari grafik tersebut dapat diamati bahwa kenaikan kecepatan putaran motor berlangsung cukup stabil. Kecepatan maksimal dapat dicapai dengan memberikan nilai PWM sebesar 255 ke rangkaian driver. Dari grafik tersebut dapat diketahui persamaan regresi sebagai berikut:

$$y = 1.6675x + 191.32$$

Persamaan regresi diatas merupakan persamaan yang menunjukkan hubungan antar nilai pwm dan nilai kecepatan putar motor. Y menunjukkan nilai kecepatan putar dan X merupakan nilai PWM. Dari persamaan tersebut dapat digunakan untuk mencari nilai kecepatan motor pada PWM tertentu.

4.7 Perbandingan Kecepatan Motor BLDC dengan Coding dan dengan Tachometer

Setelah melakukan pengujian kecepatan tanpa beban dengan coding Arduino, kemudian dilakukan pengujian kecepatan motor dengan alat ukur tachometer.



Gambar 4. 13 Penghitungan Kecepatan Motor BLDC dengan Tachometer

4.7.1 Hasil Pembacaan Kecepatan

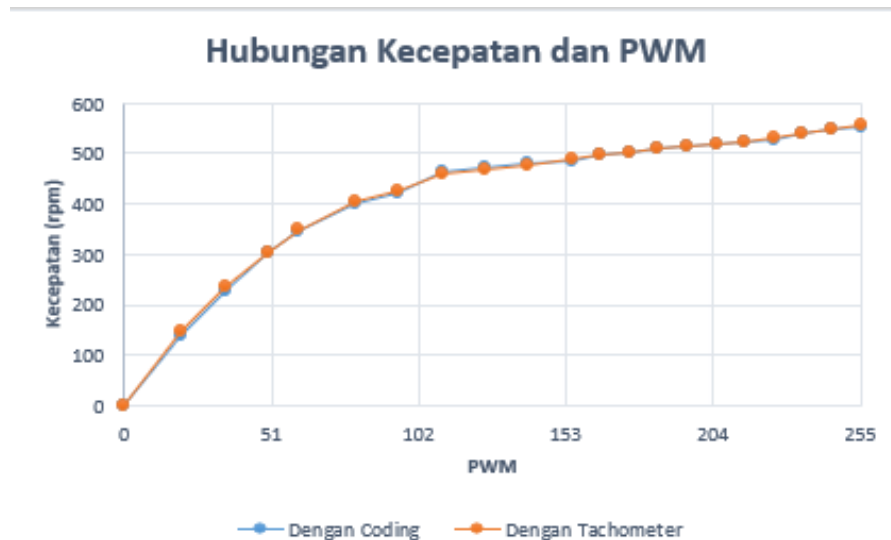
Nilai kecepatan maksimal dari motor BLDC pada pengukuran dengan coding adalah 551 rpm pada nilai PWM 255 dan motor akan berhenti ketika nilai PWM mencapai 0 atau nilai minimum. Sedangkan pada pengukuran dengan tachometer, nilai PWM 255 akan menghasilkan kecepatan rata-rata sebesar 555 rpm hasil dari lima kali pengukuran.

Tabel 4. 10 Perbandingan Pengukuran Kecepatan Motor BLDC dengan Coding dan dengan Tachometer beserta Hubungan Kecepatan dengan PWM

PWM	Dengan Coding (rpm)	Dengan Tachometer (rpm)
0	0	0
20	138	147
35	228	238
50	303	305
60	345	348
80	401	403
95	420	425
110	465	458
125	472	469
140	480	478
155	487	490
165	498	496
175	502	501
185	510	509
195	513	516
205	517	519
215	525	525
225	528	531
235	540	539
245	547	549
255	551	555

4.7.2 Perbandingan Nilai Kecepatan dengan Coding Arduino dan dengan Tachometer

Grafik dibawah menunjukkan bahwa nilai PWM berbanding lurus dengan nilai kecepatan, baik pengukuran dengan coding maupun dengan tachometer. Hasil pengukuran dengan coding yang sudah dibuat sudah hampir sama dengan pengukuran kecepatan dengan tachometer.



Gambar 4. 14 Grafik Perbandingan Nilai Kecepatan pada Pengukuran dengan Coding Arduino dan dengan Tachometer beserta Hubungan Kecepatan dengan PWM

4.8 Pengujian Kecepatan Motor BLDC pada Setpoint 60% dari Kecepatan Maksimum

Pada pengujian ini, peneliti menginginkan pengujian pada setpoint 60% dari kecepatan maksimum motor BLDC yang dihasilkan oleh *driver* motor. Oleh karena itu dihasilkan kecepatan 345 rpm yang nantinya akan diuji dengan memberikan beban.

4.8.1 Penetapan Nilai PWM Berdasarkan Nilai Regresi

Berdasarkan nilai regresi pada grafik 4.10, maka dihasilkan nilai invers PWM sebesar 60. Nilai tersebut akan dimasukkan pada program Arduino *master* yang dilanjutkan dengan pengujian setpoint kecepatan.

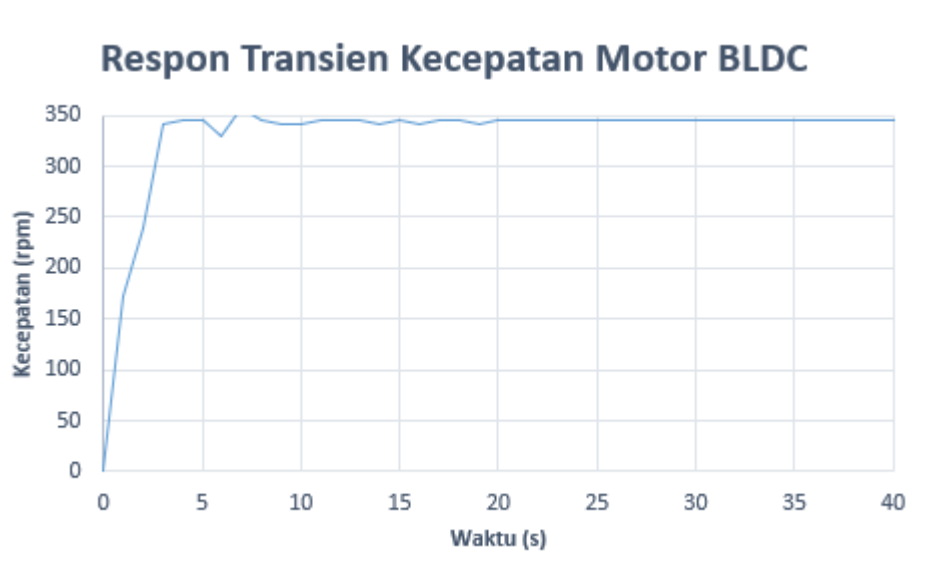
4.8.2 Pengujian Respon Motor BLDC pada Setpoint Kecepatan

Pada pengujian ini, dilakukan penyetelan nilai setpoint kecepatan untuk motor BLDC, dengan tujuan mengamati respon dari motor BLDC untuk mencapai kecepatan *steadily state*. Pada penelitian ini nilai setpoint diatur sebesar 345 rpm. Pengujian ini mengamati respon kecepatan dari motor BLDC, serta waktu dimana kecepatan motor dapat mencapai *steady state*. Hasil pengujian menunjukkan kecepatan motor mengalami fluktuasi dari detik ke 1 dan mencapai kecepatan *steady state* pada 345 rpm pada detik ke 20. Nilai *overshoot* kecepatan sangat kecil, yaitu sekitar 13 rpm. Nilai *overshoot* terjadi

pada detik ke 7 atau saat terjadinya fluktuasi kecepatan. Hal itu terjadi karena motor BLDC belum bisa mendapatkan kecepatan *steady state* saat mengalami fluktuasi.

Tabel 4. 11 Pengujian Motor dengan Setpoin Kecepatan 60% dari Kecepatan Maksimum

Setpoin (rpm)	Tegangan Fasa U (V)	Arus driver (mA)	Arus motor (mA)
345	3,78	160	30



Gambar 4. 15 Grafik Respon Transien Motor BLDC

4.9 Pengujian Kecepatan Motor BLDC pada Variasi Pembebanan

Pada pengujian ini, dilakukan penambahan variasi beban ke motor BLDC untuk melihat performa dari sistem yang dibuat. Pengujian dilakukan dengan menambahkan variasi beban berupa bandul dengan berat 100 gram. Variasi pembebanan antara lain:

- 1 bandul (100 gram)
- 2 bandul (200 gram)
- 3 bandul (300 gram)

Pengujian dilakukan dengan menentukan satu setpoin kecepatan dan kemudian diberikan variasi beban, untuk melihat respon sistem. Pengujian ini dilakukan dengan kecepatan motor sebesar 345 rpm, lalu diamati perubahan kecepatan motor BLDC. Hasil menunjukkan bahwa ketika diberi beban, kecepatan motor akan menurun, kemudian setelah beberapa detik, kecepatan motor akan meningkat sedikit demi sedikit

untuk mengejar nilai setpoint yang diberikan. Pada hasil pengujian, terdapat beberapa ketidakstabilan kecepatan pada saat awal motor berputar karena pemberian beban pada motor BLDC. Semakin besar nilai pembebanan, kecepatan jatuh motor akan semakin besar, dan waktu untuk mencapai setpoint akan semakin tinggi.

4.9.1 Hasil Pembacaan Driver Dengan Beban 100 gram

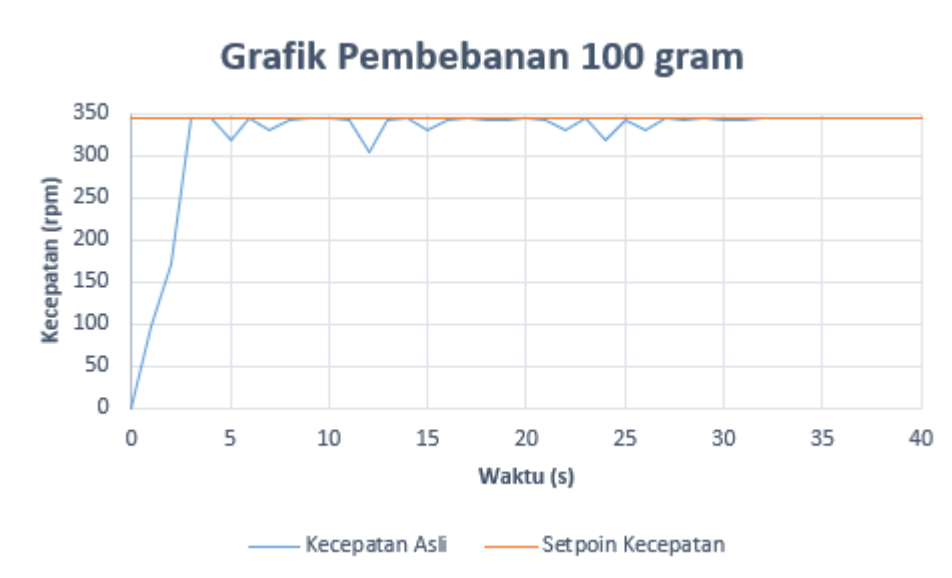
Pada pengujian ini, dilakukan penambahan beban sebesar 100 gram ke motor untuk mengetahui respon yang diberikan motor. Pada penambahan beban ini, nilai kecepatan motor jatuh sampai 97 rpm pada detik ke 1. Kecepatan perlahan naik hingga motor dapat dengan stabil mencapai nilai setpoint kembali pada detik ke 27. Nilai tegangan pada kondisi ini sebesar 3,8 V pada tiap fasa. Arus yang digunakan oleh driver ini naik menjadi 161,2 mA. Sedangkan arus yang ditarik oleh motor BLDC sebesar 31,7 mA. Hal ini dikarenakan pada pembebanan ini, motor berupaya mempertahankan nilai setpoint yang diberikan dengan menarik arus yang besar dari sumber, untuk meningkatkan torsi motor.



Gambar 4. 16 Kondisi Motor BLDC pada Pembebanan 100 gram

Tabel 4. 12 Pengujian Motor BLDC dengan Beban 100 gram

Setpoint (rpm)	Tegangan Fasa U (V)	Arus driver (mA)	Arus motor (mA)
345	3,8	161,2	31,7



Gambar 4. 17 Grafik Pembebanan 100 gram

4.9.2 Hasil Pembacaan Driver Dengan Beban 200 gram

Pada pengujian ini, dilakukan penambahan beban sebesar 200 gram ke motor untuk mengetahui respon yang diberikan motor. Pada penambahan beban ini, nilai kecepatan motor jatuh sampai 33 rpm pada detik ke 1. Kecepatan perlahan naik hingga motor dapat dengan stabil mencapai nilai setpoin kembali pada detik ke 31. Nilai tegangan pada kondisi ini sebesar 3,84 V pada tiap fasa.. Arus yang digunakan oleh driver ini naik menjadi 163,1 mA. Sedangkan arus yang ditarik oleh motor BLDC sebesar 33,2 mA. Hal ini dikarenakan pada pembebanan ini, motor berupaya mempertahankan nilai set poin yang diberikan dengan menarik arus lebih besar dari saat pembebanan sebelumnya dari sumber, agar nilai torsi motor lebih tinggi.



Gambar 4. 18 Kondisi Motor BLDC pada Pembebanan 200 gram

Tabel 4. 13 Pengujian Motor BLDC dengan Beban 200 gram

Setpoint (rpm)	Tegangan Fasa U (V)	Arus driver (mA)	Arus motor (mA)
345	3,84	163,1	33,2



Gambar 4. 19 Grafik Pembebanan 200 gram

4.9.3 Hasil Pembacaan Driver Dengan Beban 300 gram

Pada pengujian ini, dilakukan penambahan beban sebesar 300 gram ke motor untuk mengetahui respon yang diberikan motor. Pada penambahan beban

ini, nilai kecepatan motor turun jauh menjadi 11 rpm pada detik ke 1. Kecepatan perlahan naik hingga motor dapat dengan stabil mencapai nilai setpoint kembali pada detik ke 35. Nilai tegangan pada kondisi ini sebesar 3,91 V pada tiap fasa. Arus yang digunakan oleh driver ini naik menjadi 165,6 mA. Sedangkan arus yang ditarik oleh motor BLDC sebesar 35,5 mA. Hal ini dikarenakan pada pembebanan ini, motor berupaya sangat keras mempertahankan nilai set point yang diberikan dengan menarik arus yang sangat besar dari sumber, supaya nilai torsi motor meningkat pesat



Gambar 4. 20 Kondisi Motor BLDC pada Pembebanan 300 gram

Tabel 4. 14 Pengujian Motor BLDC dengan Beban 300 gram

Setpoint (rpm)	Tegangan Fasa U (V)	Arus driver (mA)	Arus motor (mA)
345	3,91	165,6	35,5



Gambar 4. 21 Grafik Pembebanan 300 gram

4.10 Analisis Perbandingan Efisiensi Motor BLDC

Berdasarkan hasil pengujian yang telah diperoleh, dapat dilakukan analisa mengenai efisiensi dari sistem yang dirancang. Analisa ini dilakukan untuk mengetahui performa dari drive motor BLDC yang dibuat dengan menggunakan IC PC817, MOSFET IRF4905, dan MOSFET IRF540N. Perhitungan efisiensi dibandingkan dengan dua variable, yaitu penghitungan dengan pengukuran daya pada multimeter dan penghitungan dengan pengukuran daya pada sensor. Masing-masing penghitungan dilakukan sejumlah 10 kali kemudian hasilnya di rata-rata.

Hasil perhitungan efisiensi *driver* motor BLDC yang diujikan adalah sebesar 35.74%. pada pengukuran dengan multimeter, dan 19.93% pada pengukuran dengan sensor. Nilai ini sangat kecil, karena terdapat banyak eror pengujian, baik dari kualitas komponen yang digunakan maupun pembacaan dari sensor yang kurang akurat karena *switching* motor yang sangat cepat, dan juga spesifikasi motor BLDC yang digunakan berbeda dengan suplai yang digunakan pada *driver*.

Sedangkan untuk rangkaian *driver* motor BLDC dapat dilakukan perhitungan mengenai daya yang digunakan. Dimana pada kecepatan motor maksimum tanpa beban pada pengukuran dengan mulimeter, daya *driver* yang terukur adalah 1680 mW dan daya yang dikonsumsi motor adalah 590.649 mW. Sedangkan pada pengukuran dengan sensor, daya *driver* yang terukur adalah 1032 mW dan daya yang dikonsumsi motor adalah 205 mW.

4.10.1 Pengukuran Efisiensi Motor BLDC dengan Multimeter

Hasil perhitungan rata-rata efisiensi motor BLDC dengan pengukuran daya menggunakan multimeter yang diujikan adalah sebesar 35,74%. Nilai ini termasuk kecil untuk ukuran efisiensi, karena terdapat banyak eror pengujian, baik dari kualitas komponen yang digunakan maupun *switching* motor yang sangat cepat, dan juga motor BLDC yang digunakan adalah motor bekas dari pabrik. Rangkaian driver mengkonsumsi daya dengan rata-rata sebesar 1680 mW, sedangkan motor BLDC mengkonsumsi daya dengan rata-rata sebesar 590,649 mW.

Tabel 4. 15 Perhitungan Efisiensi dengan Pengukuran Daya Menggunakan Multimeter

Pengukuran	Vin (V)	Vout (V)	Iin (mA)	Iout (mA)	Efisiensi
1	12	6	160	100	31.25%
2	12	6.01	160	100	31.30%
3	12	5.99	155	100	32.20%
4	12	5.96	115	97	41.89%
5	12	5.97	125	97	38.61%
6	12	5.98	140	99	35.24%
7	12	5.95	110	96	43.27%
8	12	5.97	125	98	39.00%
9	12	6.02	160	100	31.35%
10	12	5.99	150	100	33.28%
Rata-Rata Efisiensi					35.74%
Rata-Rata Konsumsi Daya Driver (mW)					1680
Rata-Rata Konsumsi Daya Motor (mW)					590.649

4.10.2 Pengukuran Efisiensi Motor BLDC dengan Sensor

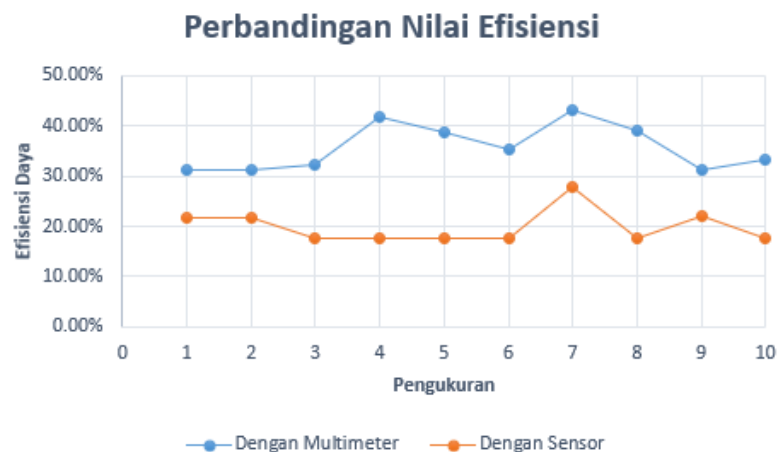
Hasil perhitungan rata-rata efisiensi motor BLDC dengan pengukuran daya menggunakan sensor yang diujikan adalah sebesar 19,93%. Nilai ini sangat buruk, karena terdapat banyak eror pengujian, baik dari kualitas komponen yang digunakan maupun pembacaan dari sensor yang kurang akurat karena *switching* motor yang sangat cepat, dan juga motor BLDC yang digunakan adalah motor bekas dari pabrik. Rangkaian driver mengkonsumsi daya dengan rata-rata sebesar 1032 mW, sedangkan motor BLDC mengkonsumsi daya dengan rata-rata sebesar 205 mW.

Tabel 4. 16 Perhitungan Efisiensi dengan Pengukuran Daya Menggunakan Sensor

Pengukuran	Vin (V)	Vout (V)	Iin (mA)	Iout (mA)	Efisiensi
1	12	5.75	110	50	21.78%
2	12	5.75	110	50	21.78%
3	12	5.67	80	30	17.72%
4	12	5.59	80	30	17.47%
5	12	5.63	80	30	17.59%
6	12	5.69	80	30	17.78%
7	12	5.55	50	30	27.75%
8	12	5.63	80	30	17.59%
9	12	5.83	110	50	22.08%
10	12	5.69	80	30	17.78%
Rata-Rata Efisiensi					19.93%
Rata-Rata Konsumsi Daya Driver (mW)					1032
Rata-Rata Konsumsi Daya Motor (mW)					205

4.10.3 Perbandingan Perhitungan Efisiensi Motor BLDC

Hasil perhitungan efisiensi dengan pengukuran menggunakan multimeter dan sensor menunjukkan nilai yang kecil. karena terdapat banyak eror pengujian, baik dari kualitas komponen yang digunakan maupun *switching* motor yang sangat cepat, dan juga motor BLDC yang digunakan adalah motor bekas dari pabrik. Nilai efisiensi pada pengukuran dengan multimeter lebih besar dengan rata-rata sebesar 35.74% dibandingkan dengan pengukuran dengan sensor sebesar 19,93% . Hal tersebut terjadi karena *switching* motor BLDC yang sangat cepat sehingga pembacaan sensor kurang akurat.



Gambar 4. 22 Grafik Perbandingan Nilai Efisiensi Motor BLDC

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini telah dilakukan pembuatan drive motor BLDC dengan menggunakan IC Optocoupler PC817, dengan menggunakan 3 MOSFET IRF4905 untuk *output* HIGH dan 3 MOSFET IRF540N untuk *output* LOW untuk melakukan *switching*. Pengujian dilakukan pada motor BLDC dengan kondisi tanpa beban dan terdapat 3 variasi pembebanan. Setelah dilakukan pengujian, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *driver* motor BLDC dengan menggunakan IC Optocoupler PC817 dapat bekerja pada pengendalian kecepatan motor BLDC karena motor dapat berputar. Nilai kecepatan motor BLDC cukup stabil pada semua variasi PWM yang diberikan. Begitu juga dengan gelombang keluarannya, dimana terdapat beda 120° pada tiap fasa.
2. Penggunaan MOSFET IRF4905 yang bersifat *active low* pada saklar output HIGH pada *driver* menyebabkan semakin rendah nilai PWM, maka semakin tinggi kecepatan motor dan daya motor. Oleh karena itu, perlu ditambahkan logika invers PWM supaya nilainya bisa berbanding lurus. Pemberian *pull* resistor pada masing-masing output IC menyebabkan kecilnya arus yang dihasilkan pada *driver* sehingga MOSFET tidak pernah panas ketika motor berputar.
3. Pada kalibrasi sensor terjadi perbedaan hasil dengan pengukuran di multimeter. Pengukuran tegangan dengan sensor menghasilkan nilai yang mendekati nilai pengukuran di multimeter dan nilai tegangan berbanding lurus dengan nilai PWM. Sedangkan pada pengukuran arus dengan sensor juga menghasilkan nilai arus yang berbanding lurus dengan nilai PWM, namun terjadi beberapa nilai arus yang sama pada beberapa nilai PWM. Hal itu terjadi karena *library* pada coding kesulitan menemukan nilai yang tetap karena kecepatan *switching* pada motor BLDC
4. Saat sistem diberi 3 variasi beban yang dilakukan pada set poin 345 rpm, sistem kendali dapat merespon dengan baik untuk mengendalikan kecepatan motor menuju titik setpoint yang dituju. Semakin besar nilai pembebanan, kecepatan

jatuh motor akan semakin besar, dan waktu untuk mencapai setpoint akan semakin lama.

5. Berdasarkan hasil perhitungan, pada kondisi tanpa beban, *driver* motor BLDC memiliki efisiensi sebesar 35.74% pada pengukuran dengan multimeter dan 19,93% pada pengukuran dengan sensor. Kedua nilai efisiensi tersebut sangat kecil, karena terdapat eror pengujian, baik dari kualitas komponen yang digunakan maupun pembacaan dari sensor yang kurang akurat karena *switching* motor yang sangat cepat, dan juga spesifikasi motor BLDC yang digunakan berbeda dengan suplai yang digunakan pada *driver*.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat diambil, yaitu:

1. Kelayakan kualitas dan *datasheet* komponen harus diperhatikan, agar hasil keluaran *driver* motor lebih stabil.
2. Untuk membuat rangkaian *driver* motor BLDC, sebelum *layout* dicetak pada papan PCB perlu mencoba beberapa variasi rangkaian pada *project board* supaya tidak terjadi kerusakan pada komponen dan menghemat waktu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] AKBAR, D. *PENGATURAN KECEPATAN PADA MOTOR BRUSHLESS DC (BLDC) MENGGUNAKAN PULSE WIDTH MODULATION (PWM)* (Doctoral dissertation, UNIKA SOEGIJAPRANATA SEMARANG), 2019.
- [2] Ridhwan, M. T. RANCANG BANGUN PENGGERAK DAYA MOTOR BRUSHLESS DC 350W/48V DESIGN AND IMPLEMENTATION OF POWER DRIVER BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR 350W/48V, 2012.
- [3] Putra, R. A. W., Firmansyah, E., & Wijaya, F. D. Metode six step comutation pada perancangan rangkian kendali sensored motor brushless direct current. *Jurnal Penelitian Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, 1(1), 2014.
- [4] Aspalli, M. S., Munshi, F. M., & Medegar, S. L. Speed control of BLDC motor with four switch three phase inverter using digital signal controller. In *2015 International Conference on Power and Advanced Control Engineering (ICPACE)* (pp. 371-376). IEEE, 2015.
- [5] Ebadpour, M., Sharifian, M. B. B., & Babaei, E. Modeling and control of dual parallel BLDC motor drive system with single inverter. In *2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON)* (pp. 1-4). IEEE, 2017.
- [6] Andika, R. J., Rusdinar, A., & Wibowo, A. S. Perancangan dan Implementasi Driver Motor Tiga Fasa untuk Pengendali Kecepatan Motor BLDC berbasis PWM pada Mobil Listrik. *eProceedings of Engineering*, 5(1), 2018.
- [7] Rashid, M.H. *Power Electronics Circuit, Devices, And Applications 3rd Edition*, Pearson Education Inc, University of West Florida, 2004.
- [8] Pramono, W. B., & Fanriadho, M. RANCANG BANGUN ELECTROMAGNETIC BOOTSTRAP SEBAGAI GATE DRIVER PADA MOSFET. In *PROSIDING SEMINAR NASIONAL ENERGI & TEKNOLOGI (SINERGI)* (pp. 50-59), 2018.
- [9] Karnap, S. Development of a Motor Controller for Electric Bicycles. *Project Advisor*. Instituto Superior de Engharia de Coimbra. Portugal, 2018.
- [10] RAKASIWI, G. *ANALISA PENGGEREMAN DINAMIK PADA MOTOR BRUSHLESS DC (BLDC)* (Doctoral dissertation, UNIKA SOEGIJAPRANATA SEMARANG), 2019.

- [11] Ali, A., Abo Zaid, S., & Kotb, A. S. A SIMPLE ELECTRONIC COMMUTATOR FOR A DC MOTOR. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, 12(45), 1409-1316, 2017.
- [12] Sakunthala, S., Kiranmayi, R., & Mandadi, P. N. A study on industrial motor drives: Comparison and applications of PMSM and BLDC motor drives. In *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)* (pp. 537-540). IEEE, 2017.
- [13] WIBOWO, Y. C. *ANALISA PEMBEBANAN PADA MOTOR BRUSHLESS DC (BLDC)* (Doctoral dissertation, UNIKA SOEGIJAPRANATA SEMARANG), 2019.
- [14] Rahman, K. M., Subashini, M. M., Nasor, M., & Tawfik, A. (2018). Development of bio-shields for Arduino Uno. In *2018 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)* (pp. 1-5). IEEE, 2018.
- [15] Nurmansyah, W. *Desain Kontrol Fitur Elektronik Hunian Rumah dengan Memanfaatkan Arduino dan Perangkat Handphone*, 2013.
- [16] Birdayansyah, R., Soedjarwanto, N., & Zebua, O. (2015). Pengendalian Kecepatan Motor DC Menggunakan Perintah Suara Berbasis Mikrokontroler Arduino. *Electrician*, 9(2), 97-108, 2015.
- [17] Akbar, A. A., Facta, M., & Nugroho, A. PERANCANGAN INVERTER FULLBRIDGE SEBAGAI PENGENDALI KECEPATAN PUTAR MOTOR PENGGERAK ROTARY SPARK GAP. *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 4(4), 895-901, 2016.
- [18] Ch, E. T. Perancangan Inverter Sebagai Switch Mos Pada Ic Dac. In *Seminar Nasional Informatika (SEMNASIF)* (Vol. 1, No. 1)., 2015.
- [19] Hakim, M. L. Perancangan Kecepatan Pisau Potong Ikan Sardin Berbasis PID (Proportional Integral Derivative Controller), 2015.
- [20] Rumagit, F. D. Perancangan Sistem Switching 16 Lampu Secara Nirkabel Menggunakan Remote Control. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 1(2), 2012.
- [21] Snyder, W. *U.S. Microcontroller Input/Output Nodes With Both Programmable Pull Up and Pull Down Resistive Loads and Programmable Drive Strength*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2003.
- [22] Akbar, A. A., Facta, M., & Nugroho, A. PERANCANGAN INVERTER FULLBRIDGE SEBAGAI PENGENDALI KECEPATAN PUTAR MOTOR PENGGERAK ROTARY SPARK GAP. *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 4(4), 895-901, 2016.

- [23] Arif, D. T., & Aswardi, A. Kendali Kecepatan Motor DC Penguat Terpisah Berbeban Berbasis Arduino. *JTEV (Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional)*, 6(2), 33-43, 2020.
- [24] Hutabalian, R., & Hamzah, A. *Desain dan Analisa Inverter Tiga Fasa Dengan Metode SVPWM Sebagai Penggerak Motor Induksi Tiga Fasa Pada Aplikasi Sepeda Listrik* (Doctoral dissertation, Riau University), 2016.
- [25] Sudana, I. M. Alat ukur kadar air dalam tanah (soil tester) berbasis mikrokontroler AT89C51. *Jurnal Teknik Elektro*, 2(1), 9, 2010.
- [26] Kuphaldt, T.R. Series Circuit and Voltage Divider, Modular Electronics Learning (MODEL) Project, 2020.
- [27] Anugrah, I. Pengukur Daya Listrik Menggunakan Sensor Arus ACS712-05A dan Sensor Tegangan ZMPT101B, Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Yogyakarta, 2017.
- [28] Sola E. B. "Design And Simulation Of A Single-Phase Inverter With Digital PWM". *Bachelor Final Thesis*. Hochschule Niederrhein University of Applied Science. Germany, 2016.

LAMPIRAN

1. Program Arduino Kontrol Motor (Arduino *Master*)

```
//-----KENDALI  KECEPATAN  MOTOR
BLDC-----
//
//                               Skripsi
//                               Adrian Seta Ekananada / I0716002
//-----
-----

//Kendali Kecepatan Motor BLDC dengan PWM dan PID
//PIN 2,3,4 terhung ke sensor hall
//PIN 9,10,11 terhubung ke kaki katoda Optocoupler PC817 menghasilkan output
HIGH
//PIN 5,6,7 terhubung ke kaki anoda Optocoupler PC817 menghasilkan output LOW

//BACA                                     PIN
OUTPUT=====
int UL=5;
int UH=9;
int VL=6;
int VH=10;
int WH=11;
int WL=7;
//BACA                                     PIN          SENSOR
HALL=====
int H1=2;
int H2=3;
int H3=4;
//
int HU,HV,HW;
int n=0;
//
int PWM=255;
int PWMinvers=0;
void setup() {
  //PENDEFINISIAN
  PIN=====
  PWMinvers=255;
  PWM=map(PWMinvers,0,255,255,0);

  pinMode(UH,OUTPUT);
  pinMode(UL,OUTPUT);
  pinMode(VH,OUTPUT);
  pinMode(VL,OUTPUT);
  pinMode(WH,OUTPUT);
```

```

pinMode(WL,OUTPUT);
pinMode(H1,INPUT);
pinMode(H2,INPUT);
pinMode(H3,INPUT);
analogWrite(UH,255);
analogWrite(UL,0);
analogWrite(VH,255);
analogWrite(VL,0);
analogWrite(WH,255);
analogWrite(WL,0);

```

```

}

```

```

void loop() {
  //PROGRAM
  BERJALAN=====
  hall_read();
  hall_logic();
  motor_run();
}

```

```

//PENDEFINISIAN                                PIN                                SENSOR
HALL=====
void hall_read(){
  HU=digitalRead(H1);
  HV=digitalRead(H2);
  HW=digitalRead(H3);
}

```

```

//BACA                                LOGIKA                                SENSOR
HALL=====
void hall_logic(){
  if(HU==1&&HV==0&&HW==0){
    n=1;
  }
  else if(HU==0&&HV==1&&HW==0){
    n=2;
  }
  else if(HU==1&&HV==1&&HW==0){
    n=3;
  }
  else if(HU==0&&HV==0&&HW==1){
    n=4;
  }
  else if(HU==1&&HV==0&&HW==1){
    n=5;
  }
}

```

```

    }
    else if(HU==0&&HV==1&&HW==1){
        n=6;
    };

}

```

//PENGATURAN

SWITCHING

STEP=====

```

void motor_run(){
    if (PWM==255&&PWMinvers==0){
        analogWrite(UH,255);
        analogWrite(UL,0);
        analogWrite(VH,255);
        analogWrite(VL,0);
        analogWrite(WH,255);
        analogWrite(WL,0);
    }
    else {
        switch(n){
            case 1:
                //hall sensor value = 001 (fasa U high : fasas W low)
                analogWrite(UH,PWM);
                analogWrite(UL,0);
                analogWrite(VH,255);
                analogWrite(VL,0);
                analogWrite(WH,255);
                analogWrite(WL,255);
                break;
            case 2:
                //hall sensor value = 010 (fasa V high : fasas U low)
                analogWrite(UH,255);
                analogWrite(UL,255);
                analogWrite(VH,PWM);
                analogWrite(VL,0);
                analogWrite(WH,255);
                analogWrite(WL,0);
                break;
            case 3:
                //hall sensor value = 011 (fasa V high : fasas W low)
                analogWrite(UH,255);
                analogWrite(UL,0);
                analogWrite(VH,PWM);
                analogWrite(VL,0);
                analogWrite(WH,255);
                analogWrite(WL,255);

```

```

break;
case 4:
//hall sensor value = 100 (fasa W high : fasa V low)
analogWrite(UH,255);
analogWrite(UL,0);
analogWrite(VH,255);
analogWrite(VL,255);
analogWrite(WH,PWM);
analogWrite(WL,0);
break;
case 5:
//hall sensor value = 101 (fasa U high : fasa V low)
analogWrite(UH,PWM);
analogWrite(UL,0);
analogWrite(VH,255);
analogWrite(VL,255);
analogWrite(WH,255);
analogWrite(WL,0);
break;
case 6:
//hall sensor value = 110 (fasa W high : fasa U low)
analogWrite(UH,255);
analogWrite(UL,255);
analogWrite(VH,255);
analogWrite(VL,0);
analogWrite(WH,PWM);
analogWrite(WL,0);
break;
default:
//floating
analogWrite(UH,255);
analogWrite(UL,0);
analogWrite(VH,255);
analogWrite(VL,0);
analogWrite(WH,255);
analogWrite(WL,0);
break;
}
}

```

2. Program Arduino Sistem *Monitoring* (Arduino *Slaver*)

```
//=====MONITORING KECEPATAN, DAYA INPUT DAN DAYA
OUTPUT=====
```

```
//Dipasang di Arduino ke 2 (khusus pembacaan)
//salah satu sensor hall dihubungkan ke pin 3
//salah satu output HIGH dihubungkan ke pin 9
//Output sensor arus terhubung ke pin A2 dan A3 Arduino 2
//Output tegangan dihubungkan ke A0 dan A1 Arduino 2
```

```
#include "ACS712.h"
ACS712 sensor1 (ACS712_05B,A3);
ACS712 sensor2 (ACS712_05B,A2);
```

```
//BACA TEGANGAN INPUT=====
//float input_volt = 0;
//float temp1      = 0;
//float r1          = 680000; //r1 value
//float r2          = 100000; //r2 value
float V1;
float Vin;
```

```
//BACA ARUS INPUT=====
//double mVperAmp1 = 0.1175;
//double RawValue1 = 0;
//double ACSoffset1 = 2.5; //(Nilai kedua Input dan Output harus "0")
//double Voltage1   = 0;
//double Input_Amps = 0;
float I1;
```

```
//BACA TEGANGAN OUTPUT=====
//float output_volt = 0;
//float temp2       = 0;
//float r3           = 680000; //r3 value
//float r4           = 100000; //r4 value
float V2;
float Vout;
```

```
//BACA ARUS OUTPUT=====
//double mVperAmp2 = 0.1175;
//double RawValue2 = 0;
//double ACSoffset2 = 2.5; //(Nilai kedua Input dan Output harus "0")
//double Voltage2   = 0;
```



```

//double Output_Amps = 0;
float I2;
//KONTROL KECEPATAN=====

#define ENC_COUNT_REV 16 //jumlah pulsa per rotasi
#define ENC_IN 3 //pin hall yang akan diukur untuk kecepatan
#define PWM_PIN 9 //pin pwm

volatile long encoderValue = 0; // Pulse count from encoder
int interval = 1000; //interval pengukuran (ms)
// Counters for milliseconds during interval
long previousMillis = 0;
long currentMillis = 0;
int rpm = 0; //nilai awal rpm
int pwm_value; //nilai awal pwm
//=====
=====

void setup()
{
  Serial.begin(115200); // Setup Serial Monitor
  sensor1.calibrate();
  sensor2.calibrate();

  //MONITOR KECEPATAN MOTOR=====
  pinMode(ENC_IN, INPUT_PULLUP); //setel pin hall yang akan dimonitor
  pinMode(PWM_PIN, OUTPUT); //setel pin pwm
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(ENC_IN), updateEncoder, RISING); //interrupt
  previousMillis = millis(); // Setup initial values for timer
}

void loop()
{

  //BACA TEGANGAN INPUT=====
  //  int analogvalue1 = analogRead(A0);
  //  temp1 = (analogvalue1*5)/1023.0;
  //  input_volt = temp1/(r2/(r1+r2))+0.3;
  //  if (input_volt < 0.09)
  //  {
  //    float bitV1 = analogRead (A0);
  //    V1 = bitV1*5.0/1023.0;
  //    Vin = V1*12.0/5.0;
  //    //input_volt = 0.0;
  //  }

  //BACA ARUS INPUT=====

```

```

// RawValue1 = analogRead(A1);
// Voltage1 = (RawValue1 * 5) / 1023;
// Input_Amps = (Voltage1 - ACSoffset1) / mVperAmp1;
// if (Input_Amps < 0.09)
{
  I1 = sensor1.getCurrentDC();
//   Input_Amps = 0.0;
}

//BACA TEGANGAN OUTPUT=====
//   int analogvalue2 = analogRead(A2);
//   temp2 = (analogvalue2*5)/1023.0;
//   output_volt = temp2/(r4/(r3+r4))+0.3;
//   if (output_volt < 0.09)
{
  float bitV2 = analogRead (A1);
  V2 = bitV2*5.0/1023.0;
  Vout = V2*12.0/5.0;
  //output_volt = 0.0;
}

//BACA ARUS OUTPUT=====
// RawValue2 = analogRead(A3);
// Voltage2 = (RawValue2 * 5) / 1023;
// Output_Amps = (Voltage2 - ACSoffset2) / mVperAmp2;
// if (Output_Amps < 0.09)
{
  I2 = sensor2.getCurrentDC();
  //Output_Amps = 0.0;
}

//KONTROL KECEPATAN=====
//Read PWM Value
analogWrite(9, 255);
pwm_value = pulseIn(PWM_PIN, HIGH);
pwm_value = map(pwm_value, 0, 1023, 0, 255);

//Update RPM value every second
currentMillis = millis();
if (currentMillis - previousMillis > interval) {
  previousMillis = currentMillis;

  //Calculate RPM
  rpm = (float)(encoderValue * 60 / ENC_COUNT_REV);

  // Only update display when there is a reading
  if (pwm_value < 255 || rpm > 0) {

```

```
//SERIAL MONITOR=====

    Serial.print("PWM      : ");Serial.println(pwm_value);
    Serial.print("Kecepatan : ");Serial.print(rpm);Serial.println(" rpm");
    Serial.print("V Input   : ");Serial.print(Vin);Serial.println(" V");
    Serial.print("I Input    : ");Serial.print(I1);Serial.println(" A");
    Serial.print("V Output   : ");Serial.print(Vout);Serial.println(" V");
    Serial.print("I Output    : ");Serial.print(I2);Serial.println(" A");
  }
  encoderValue = 0;
}
}

void updateEncoder()
{
  // Increment value for each pulse from encoder
  encoderValue++;
}
```

3. Datasheet IC Optocoupler PC817

■ Absolute Maximum Ratings

($T_a = 25^{\circ}\text{C}$)

Parameter		Symbol	Rating	Unit
Input	Forward current	I_F	50	mA
	¹⁾ Peak forward current	I_{FM}	1	A
	Reverse voltage	V_R	6	V
	Power dissipation	P	70	mW
Output	Collector-emitter voltage	V_{CE0}	35	V
	Emitter-collector voltage	V_{EC0}	6	V
	Collector current	I_C	50	mA
	Collector power dissipation	P_C	150	mW
Total power dissipation		P_{tot}	200	mW
²⁾ Isolation voltage		V_{iso}	5 000	V _{rms}
Operating temperature		T_{op}	- 30 to + 100	$^{\circ}\text{C}$
Storage temperature		T_{stg}	- 55 to + 125	$^{\circ}\text{C}$
³⁾ Soldering temperature		T_{sol}	260	$^{\circ}\text{C}$

¹⁾ Pulse width < 100 μ s, Duty ratio : 0.001

²⁾ 40 to 60% RH, AC for 1 minute

³⁾ For 10 seconds

■ Electro-optical Characteristics

($T_a = 25^{\circ}\text{C}$)

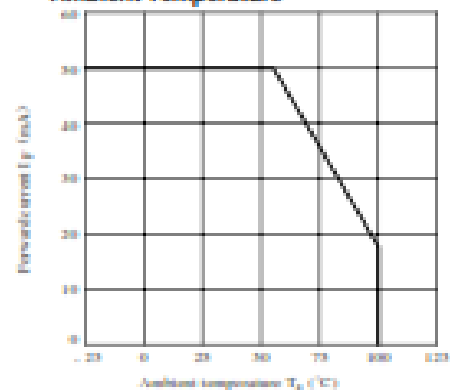
Parameter		Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Input	Forward voltage	V_F	$I_F = 20\text{mA}$	-	1.2	1.4	V
	Peak forward voltage	V_{FM}	$I_{FM} = 0.5\text{A}$	-	-	3.0	V
	Reverse current	I_R	$V_R = 4\text{V}$	-	-	10	μA
	Terminal capacitance	C_i	$V = 0, f = 1\text{kHz}$	-	30	250	pF
Output	Collector dark current	I_{C0}	$V_{CE0} = 20\text{V}$	-	-	10^{-7}	A
Transfer characteristics	¹⁾ Current transfer ratio	CTR	$I_F = 2\text{mA}, V_{CE0} = 5\text{V}$	50	-	600	%
	Collector-emitter saturation voltage	$V_{CE(sat)}$	$I_F = 20\text{mA}, I_C = 1\text{mA}$	-	0.1	0.2	V
	Isolation resistance	R_{iso}	DC500V, 40 to 60% RH	5×10^{10}	10^{11}	-	Ω
	Floating capacitance	C_i	$V = 0, f = 1\text{MHz}$	-	0.6	1.0	pF
	Cut-off frequency	f_c	$V_{CE} = 5\text{V}, I_C = 2\text{mA}, R_L = 100\Omega, -3\text{dB}$	-	80	-	kHz
	Response time	Rise time	$V_{CE} = 2\text{V}, I_C = 2\text{mA}, R_L = 100\Omega$	-	4	16	μs
		Fall time		-	3	16	μs

¹⁾ Classification table of current transfer ratio is shown below.

Model No.	Rank mark	CTR (%)
PC817A	A	80 to 160
PC817B	B	130 to 260
PC817C	C	200 to 400
PC817D	D	300 to 600
PC8 \div 7AB	A or B	80 to 260
PC8 \div 7BC	B or C	130 to 400
PC8 \div 7CD	C or D	200 to 600
PC8 \div 7AC	A, B or C	80 to 400
PC8 \div 7BD	B, C or D	130 to 600
PC8 \div 7AD	A, B, C or D	80 to 600
PC8 \div 7	A, B, C, D or No mark	80 to 600

\div : 1 or 2 or 3 or 4

Fig. 1 Forward Current vs. Ambient Temperature



4. Datasheet MOSFET IRF4905

International
IR Rectifier

PD - 97034

IRF4905SPbF
IRF4905LPbF

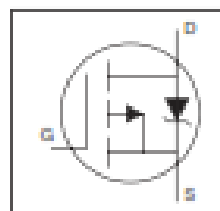
Features

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- 150°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Repetitive Avalanche Allowed up to T_{jmax}
- Some Parameters Are Different from IRF4905S
- Lead-Free

Description

Features of this design are a 150°C junction operating temperature, fast switching speed and improved repetitive avalanche rating. These features combine to make this design an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of other applications.

HEXFET® Power MOSFET



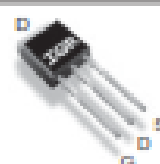
$$V_{DS} = -55V$$

$$R_{DS(on)} = 20m\Omega$$

$$I_D = -42A$$



D²Pak
IRF4905SPbF



TO-262
IRF4905LPbF

G	D	S
Gate	Drain	Source

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
I_D @ $T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$ (Silicon Limited)	-70	A
I_D @ $T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$ (Silicon Limited)	-44	
I_D @ $T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$ (Package Limited)	-42	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	-250	A
P_D @ $T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	170	W
	Linear Derating Factor	1.3	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
E_{AS} (Thermally Limited)	Single Pulse Avalanche Energy ②	140	mJ
E_{AS} (Tested)	Single Pulse Avalanche Energy Tested Value ②	750	mJ
I_{AS}	Avalanche Current ③	See Fig. 12a, 12b, 15, 16	A
E_{AS}	Repetitive Avalanche Energy ⑤		mJ
T_J	Operating Junction and	-55 to +150	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting Torque, 6-32 or M3 screw ④	10 lbf•in (1.1N•m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
R_{JC}	Junction-to-Case ⑥	—	0.75	
R_{JA}	Junction-to-Ambient (PCB Mount, steady state) ⑦⑧	—	40	

www.irf.com

1

IRF4905S/L

International
IOR Rectifier

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{DS(BR)}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	-55	—	—	V	$V_{GS} = 0\text{V}$, $I_D = -250\mu\text{A}$
$\Delta V_{DS(BR)}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	-0.054	—	V/°C	Reference to 25°C , $I_D = -1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	20	m Ω	$V_{GS} = -10\text{V}$, $I_D = -42\text{A}$ ①
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	-2.0	—	-4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}$, $I_D = -250\mu\text{A}$
g_{fs}	Forward Transconductance	19	—	—	S	$V_{DS} = -25\text{V}$, $I_D = -42\text{A}$
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	-25	μA	$V_{GS} = -55\text{V}$, $V_{DS} = 0\text{V}$
		—	—	-200		$V_{GS} = -44\text{V}$, $V_{DS} = 0\text{V}$, $T_J = 125^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{DS} = -20\text{V}$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{DS} = 20\text{V}$
Q_g	Total Gate Charge	—	120	180	nC	$I_D = -42\text{A}$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	32	—		$V_{DS} = -44\text{V}$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	53	—		$V_{DS} = -10\text{V}$ ②
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	20	—	ns	$V_{DS} = -25\text{V}$
t_r	Rise Time	—	92	—		$I_D = -42\text{A}$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	51	—		$R_{DS} = 2.6\ \Omega$
t_f	Fall Time	—	64	—		$V_{DS} = -10\text{V}$ ②
L_s	Internal Source Inductance	—	7.5	—	nH	Between lead, and center of die contact
C_{iss}	Input Capacitance	—	3500	—	pF	$V_{DS} = 0\text{V}$
C_{oss}	Output Capacitance	—	1250	—		$V_{GS} = -25\text{V}$
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	450	—		$f = 1.0\text{MHz}$
C_{oss}	Output Capacitance	—	4620	—		$V_{GS} = 0\text{V}$, $V_{DS} = -1.0\text{V}$, $f = 1.0\text{MHz}$
C_{oss}	Output Capacitance	—	940	—		$V_{GS} = 0\text{V}$, $V_{DS} = -44\text{V}$, $f = 1.0\text{MHz}$
$C_{oss, eff.}$	Effective Output Capacitance	—	1530	—		$V_{GS} = 0\text{V}$, $V_{DS} = 0\text{V}$ to -44V ③

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	-42	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	-250		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	-1.3	V	$T_J = 25^\circ\text{C}$, $I_S = -42\text{A}$, $V_{GS} = 0\text{V}$ ②
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	61	92	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}$, $I_F = -42\text{A}$, $V_{SD} = -25\text{V}$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	150	220	nC	$di/dt = -100\text{A}/\mu\text{s}$ ③
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S+L_D)				

5. Datasheet MOSFET IRF540N

• FEATURES

- Drain Current $I_D = 33A @ T_C = 25^\circ C$
- Static Drain-Source On-Resistance
: $R_{DS(on)} = 44m\Omega$ (Max)
- Fast Switching Speed
- Minimum Lot-to-Lot variations for robust device performance and reliable operation

• DESCRIPTION

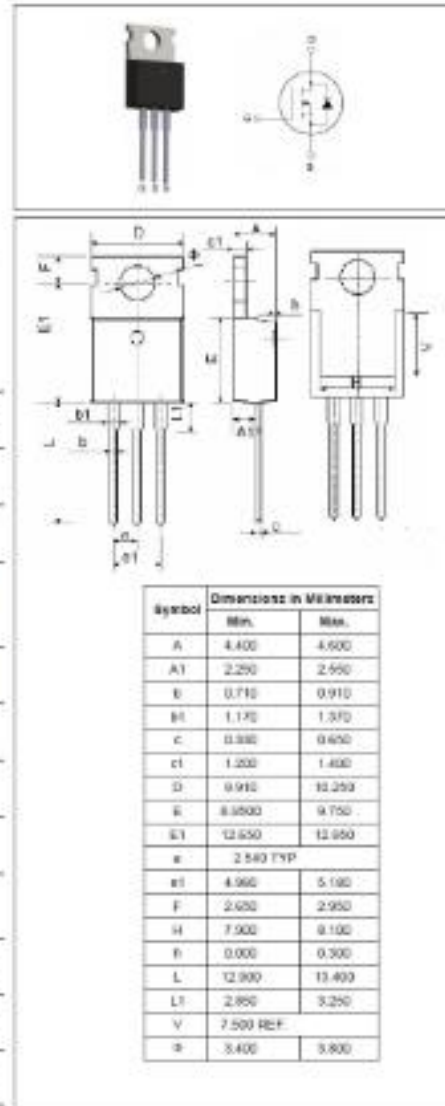
- Designed especially for high voltage, high speed applications, such as off-line switching power supplies, UPS, AC and DC motor controls, relay and solenoid drivers.

• ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ($T_J = 25^\circ C$)

SYMBOL	PARAMETER	VALUE	UNIT
V_{DS}	Drain-Source Voltage	100	V
V_{GS}	Gate-Source Voltage-Continuous	± 20	V
I_D	Drain Current-Continuous @ $T_C = 25^\circ C$	33	A
	Drain Current-continuous @ $T_C = 100^\circ C$	23	
I_{RM}	Drain Current-Single Pulsed	110	A
P_D	Total Dissipation @ $T_C = 25^\circ C$	130	W
T_J	Max. Operating Junction Temperature	-55-175	$^\circ C$
T_{stg}	Storage Temperature	-55-175	$^\circ C$

• THERMAL CHARACTERISTICS

SYMBOL	PARAMETER	MAX	UNIT
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance, Junction to Case	1.15	$^\circ C/W$
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance, Junction to Ambient	62	$^\circ C/W$





INCHANGE SEMICONDUCTOR

isc N-Channel Mosfet Transistor**IRF540NPBF****ELECTRICAL CHARACTERISTICS** $T_c=25^{\circ}\text{C}$ unless otherwise specified

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	MAX	UNIT
$V_{DS(BR)}$	Drain-Source Breakdown Voltage	$V_{GS}=0$; $I_D=250\mu\text{A}$	100		V
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	$V_{DS}=V_{GS}$; $I_D=250\mu\text{A}$	2	4	V
$R_{DS(on)}$	Drain-Source On-Resistance	$V_{GS}=10\text{V}$; $I_D=16\text{A}$		44	m Ω
I_{SS}	Gate-Body Leakage Current	$V_{GS}=\pm 20\text{V}$; $V_{DS}=0$		± 100	nA
I_{DSS}	Zero Gate Voltage Drain Current	$V_{GS}=100\text{V}$; $V_{DS}=0$		25	μA
V_{SD}	Forward On-Voltage	$I_S=16\text{A}$; $V_{GS}=0$		1.2	V

6. Dokumentasi Alat