



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN PROTOTIPE SISTEM AKTUATOR  
KENDALI SIRIP MENGGUNAKAN BRUSHLESS DC MOTOR**

**SKRIPSI**

**ANWAR SHIDDIQ ABDUL RACHMAN  
0906602420**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JANUARI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN PROTOTIPE SISTEM AKTUATOR  
KENDALI SIRIP MENGGUNAKAN BRUSHLESS DC MOTOR**

**SKRIPSI**

**DIAJUKAN SEBAGAI SALAH SATU SYARAT UNTUK MEMPEROLEH  
GELAR SARJANA TEKNIK**

**ANWAR SHIDDIQ ABDUL RACHMAN  
0906602420**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JANUARI 2012**

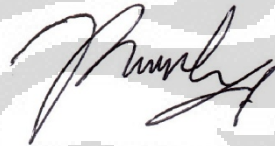
## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Anwar Shiddiq Abdul Rachman**

**NPM : 0906602420**

**Tanda tangan :**



**Tanggal : 17 Januari 2012**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Anwar Shiddiq Abdul Rachman  
NPM : 0906602420  
Program studi : Ekstensi Teknik Elektro 2009  
Judul skripsi : Rancang Bangun Prototipe Sistem Aktuator  
Kendali Sirip Menggunakan Brushless DC Motor

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Abdul Halim, M.Eng. (.....)

Penguji : Dr. Abdul Muis, S.T., M.Eng. (.....)

Penguji : Ir. Aries Subiantoro, M.SEE. (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 17 Januari 2012

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT karena atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Rancang Bangun Prototipe Sistem Aktuator Kendali Sirip Menggunakan Brushless DC Motor” dengan baik. Penulisan skripsi ini dibuat untuk memenuhi salah satu persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

Skripsi ini dapat tersusun dengan baik atas dukungan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, tidak lupa penulis sampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. Abdul Halim, M. Eng., selaku dosen pembimbing penulis yang cukup sabar dalam memberikan arahan dan dukungan dalam penyusunan skripsi ini.
2. Suwarto dan Any Ciptaningsih, selaku orang tua tercinta dan Anita Yuniawati Ramadhana, selaku kakak yang senantiasa membantu dan memberikan dukungan dalam berbagai hal hingga selesainya skripsi ini.
3. Arief Kurniawan, Ariel Yagusandri, Ramlan, dan teman-teman di Ekstensi Teknik Elektro UI yang telah memberikan semangat serta dukungan dalam pembuatan skripsi ini.
4. Mahshasti, Fajar Pandu, Ajar Abadi, Robyn Frannando, dan sahabat-sahabat di D3-Teknik Elektronika UNJ yang menyediakan waktu dan tenaga untuk membantu dalam penyusunan skripsi ini.
5. Serta pihak lain yang mungkin tidak sempat penulis uraikan satu per satu.

Semoga pihak-pihak yang terkait dalam penulisan skripsi ini Allah berikan balasan yang lebih atas kebaikan yang mereka berikan. Semoga skripsi ini memberikan manfaat dalam pengembangan ilmu pengetahuan, serta jika ada kekurangan dapat diperbaiki untuk selanjutnya.

Depok, Januari 2012

Penulis

## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Anwar Shiddiq Abdul Rachman  
NPM : 0906602420  
Program studi : Ekstensi Teknik Elektro 2009  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas skripsi saya yang berjudul:

Rancang Bangun Prototipe Sistem Aktuator Kendali Sirip Menggunakan  
Brushless DC Motor

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan skripsi saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 17 Januari 2012

Yang menyatakan



Anwar Shiddiq Abdul Rachman

## ABSTRAK

Nama : Anwar Shiddiq Abdul Rachman  
Program Studi : Ekstensi Teknik Elektro  
Judul : Rancang Bangun Prototipe Sistem Aktuator Kendali Sirip  
Menggunakan Brushless DC Motor

Indonesia sedang mengembangkan teknologi roket kendali untuk mendukung sistem pertahanan. Roket dapat dikembangkan untuk alutsista (alat utama sistem senjata) sebagai pertahanan. Arah roket diatur oleh sirip yang mendapatkan masukan dari *autopilot* lalu diolah ke dalam mikrokontroler dan menjalankan aktuator untuk menggerakkan sirip. Skripsi ini membahas tentang pengendalian sirip menggunakan brushless DC motor dan AVR ATMega8535. Sirip bergerak sebesar  $+10^{\circ}$  sampai  $-10^{\circ}$  dengan pergerakan sudut sebesar  $1^{\circ}$ . Brushless DC motor yang digunakan sebagai aktuator membutuhkan 6 mosfet untuk menghasilkan 6 urutan sinyal yang dibutuhkan. Metode yang digunakan untuk pengendalian brushless DC motor menggunakan metode *six-step*. Untuk mengatur kecepatan brushless DC motor, *delay* diberikan pada tiap step. Semakin kecil *delay*, maka putaran motor akan semakin cepat. Brushless DC motor akan melambat saat sirip mendekati sudut yang diinginkan. Ketika terjadi simpangan sudut yang cukup besar, maka dibutuhkan *delay* yang kecil agar putaran cepat. Sebaliknya, saat simpangan sudut kecil, maka dibutuhkan *delay* yang besar agar putaran melambat dan tidak menyebabkan gerakan yang berlebih.

Kata kunci:

Driver mosfet, kendali sirip, brushless DC motor, metode *six-step*, AVR ATMega8535.

## ABSTRACT

*Name : Anwar Shiddiq Abdul Rachman*  
*Study Program : Electrical Engineering -Extension*  
*Title : Prototype Development of Fin Control Actuator System Using Brushless DC Motor*

*Indonesia has been developing rocket controlling technology for supporting military needs. Rocket is developed for military equipment. The direction of rocket is controlled by fin which has input command from the autopilot. That input is processed into microcontroller to move the fin. This paper explores rocket fin control using brushless DC motor and AVR ATmega8535. One fin moves from  $-10^{\circ}$  to  $10^{\circ}$ . One movement of fin is set  $1^{\circ}$ . Brushless DC motor needs six mosfet to generate six steps signal. Six-step method is used to control brushless DC motor. Six-step's delay is utilized to control speed of brushless DC motor. The smaller delay makes the rotation motor faster. Brushless DC motor will decrease the rotation speed when error comes to setpoint. When the deviation angle is too high, delay time is reduced to make higher rpm. Conversely, when deviation angle is small, delay time is increased to make lower rpm and then over movement will not occur.*

*Key Words:*

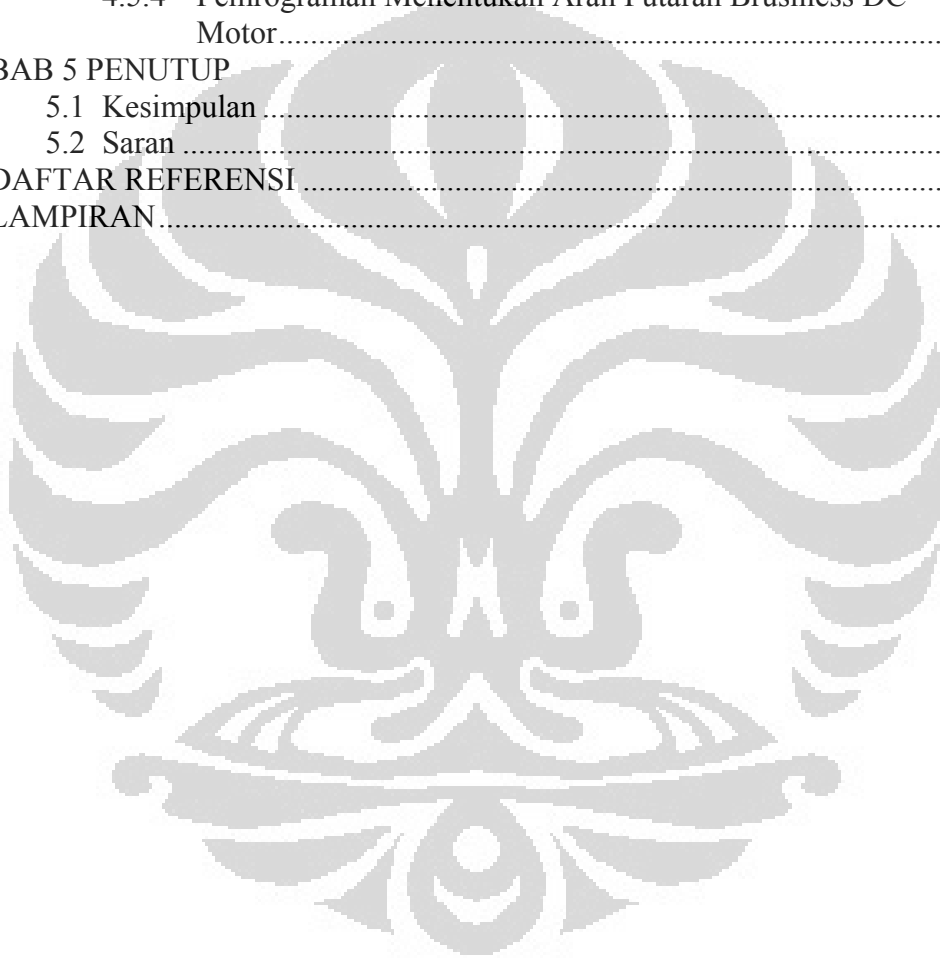
*Mosfet driver, controlling fin, brushless DC motor, six-step method, AVR ATmega8535.*



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK.....	vi
<i>ABSTRACT</i> .....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Penelitian.....	3
1.6 Metode Penelitian.....	3
1.7 Sistematika Penulisan.....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Raket Kendali.....	4
2.2 Mikrokontroler AVR ATmega8535.....	6
2.2.1 Arsitektur ATmega8535.....	7
2.2.2 Konfigurasi Pin ATmega8535.....	9
2.3 Brushless DC motor.....	10
2.3.1 Prinsip Kerja Brushless DC Motor.....	12
2.3.2 Driver 3 Fasa.....	13
2.4 Pengendalian Brushless DC Motor.....	20
2.4.1 Metode <i>Six-Step</i> .....	21
2.4.2 Metode Sinyal PWM.....	21
2.4.3 Metode PWM Sinusoidal.....	22
2.5 Roda Gigi ( <i>Gear</i> ).....	24
2.5.1 Jenis-jenis Roda Gigi ( <i>Gear</i> ).....	25
2.5.2 Kelebihan dan Kelemahan dari Beberapa Jenis Roda Gigi.....	26
2.6 Sensor Sudut Putar ( <i>Rotation Sensor</i> ).....	27
2.7 ADC ( <i>Analog to Digital Converter</i> ).....	28
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM KENDALI SIRIP	
3.1 Perancangan Kendali Sirip.....	30
3.2 Sirip.....	32
3.2.1 <i>Pitch Gauge</i> .....	33
3.3 DI-Super Smart AVR.....	33
3.4 Aktuator Sirip.....	35
3.5 Umpan Balik pada Pergerakan Sirip.....	38
3.6 Roda Cacing.....	40
BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS HASIL	
4.1 Alat Ukur yang Digunakan.....	42
4.2 Kerja Brushless DC motor.....	44
4.2.1 Keadaan Aktif Mosfet Tipe-p dan Mosfet Tipe-n.....	49

4.2.2	Driver L293D sebagai Gerbang Buffer yang Meneruskan Sinyal dari Keluaran Mikrokontroler untuk Mengaktifkan Mosfet .....	50
4.3	Umpan Balik yang Diberikan oleh <i>Rotation Sensor</i> ke Mikrokontroler Menggunakan ADC.....	51
4.4	Diagram Alir pada Pemrograman Sistem Pergerakan Sirip .....	54
4.5	Pemrograman .....	59
4.5.1	<i>Setpoint</i> Sudut dengan Masukan dari Kombinasi Port B.....	60
4.5.2	Pemrograman pada Pemberian Sinyal Brushless DC Motor ....	61
4.5.3	Perhitungan Nilai <i>Error</i> sebagai Umpan Balik untuk Brushless DC Motor.....	63
4.5.4	Pemrograman Menentukan Arah Putaran Brushless DC Motor.....	71
BAB 5 PENUTUP		
5.1	Kesimpulan .....	72
5.2	Saran .....	73
DAFTAR REFERENSI .....		75
LAMPIRAN.....		77



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Bagian dari sirip roket, (kanan) saat terpasang di roket dan (kiri) aktuator sirip.....	5
Gambar 2.2	Blok diagram ATMEga8535 .....	8
Gambar 2.3	Pin ATMEga8535 .....	9
Gambar 2.4	Sinusoidal <i>back</i> EMF .....	10
Gambar 2.5	Trapezoidal <i>back</i> EMF .....	11
Gambar 2.6	Letak rotor di dalam dan di luar stator .....	11
Gambar 2.7	Pemberian tegangan pada kumparan stator (panah masuk diberikan tegangan positif dan panah keluar diberikan tegangan 0V).....	13
Gambar 2.8	Urutan penyalaan saklar pada driver brushless DC motor .....	14
Gambar 2.9	Keluaran stator yang dihasilkan oleh urutan pengaturan saklar..	15
Gambar 2.10	Driver 3 fasa brushless DC motor .....	16
Gambar 2.11	<i>Channel</i> mosfet (a) mosfet tipe-n dan (b) mosfet tipe-p .....	16
Gambar 2.12	Simbol mosfet (a) mosfet tipe-n dan (b) mosfet tipe-p .....	17
Gambar 2.13	Fungsi mosfet sebagai saklar.....	18
Gambar 2.14	Blok diagram L293/L293D .....	19
Gambar 2.15	Konfigurasi pin L293/L293D .....	19
Gambar 2.16	<i>Logic</i> diagram L293/L293D .....	20
Gambar 2.17	Driver 3 fasa dengan modul PWM.....	22
Gambar 2.18	6 Sinyal PWM yang berbeda diberikan pada mosfet .....	22
Gambar 2.19	6 Sinyal PWM yang dihasilkan dari gelombang sinusoidal .....	23
Gambar 2.20	Jenis-jenis roda gigi.....	26
Gambar 2.21	<i>Rotation Sensor</i> .....	28
Gambar 3.1	Blok diagram kendali sirip .....	30
Gambar 3.2	Pengendali sirip, pengukur simpangan sudut, dan aktuator sirip dengan penggerak brushless DC motor .....	31
Gambar 3.3	Diagram alir sistem kendali sirip.....	32
Gambar 3.4	Desain sirip, (a) tampak samping dan (b) tampak belakang .....	33
Gambar 3.5	<i>Pitch gauge</i> dengan simpangan sudut $-10^{\circ}$ sampai $+10^{\circ}$ .....	33
Gambar 3.6	DI-Super Smart AVR ATMEga8535 .....	34
Gambar 3.7	Brushless DC motor Hyperion ZS2205-34 .....	35
Gambar 3.8	Mosfet tipe-n IRF540N dan mosfet tipe-p IRF9540N .....	36
Gambar 3.9	Skema rangkaian driver brushless DC motor dengan 6 buah mosfet (3 mosfet tipe-p dan 3 mosfet tipe-n) .....	36
Gambar 3.10	Skema rangkaian L293D .....	38
Gambar 3.11	<i>Rotation sensor</i> , tampak atas dan tampak samping.....	39
Gambar 3.12	<i>Rotation sensor</i> dihubungkan ke mikrokontroler sebagai masukan ADC di Port A.....	40
Gambar 3.13	Skema rangkaian penggerak sirip.....	41
Gambar 4.1	Heles UX-37 .....	42
Gambar 4.2	Tampilan <i>hyperterminal</i> .....	43
Gambar 4.3	Oscilloscope portable DSO-2090 USB .....	43
Gambar 4.4	Tampilan <i>software</i> dari masukan oscilloscope portable DSO-2090 USB .....	44

Gambar 4.5	Driver L293D, Driver mosfet, Layout pcb driver L293D, dan Layout pcb driver mosfet.....	44
Gambar 4.6	Blok diagram <i>open loop</i> aktuator sirip.....	45
Gambar 4.7	Gelombang yang dihasilkan oleh driver mosfet pada tiap fasa untuk menjalankan brushless DC motor ( <i>clockwise</i> ) .....	47
Gambar 4.8	Gelombang yang dihasilkan oleh driver mosfet pada tiap fasa untuk menjalankan brushless DC motor ( <i>counterclockwise</i> ) .....	48
Gambar 4.9	Pergerakan <i>hole</i> pada mosfet tipe-p .....	49
Gambar 4.10	Pergerakan elektron pada mosfet tipe-n .....	50
Gambar 4.11	Gerbang buffer tiga pin .....	50
Gambar 4.12	Konfigurasi (a) pada AVR-OspII dan (b) pada komputer.....	52
Gambar 4.13	Konfigurasi pada <i>hyperterminal</i> , (a) port komunikasi yang digunakan dan (b) <i>baudrate</i> yang digunakan .....	52
Gambar 4.14	(a) DI-USB AVR ISP V2, JP1 dan JP2 dilingkari merah, (b) posisi <i>jumper</i> untuk mendownload program (kiri) dan posisi <i>jumper</i> untuk komunikasi serial (kanan).....	53
Gambar 4.15	Tampilan hasil nilai ADC mikrokontroler pada Port A <i>channel 6</i> .....	53
Gambar 4.16	Diagram alir 1 .....	55
Gambar 4.17	Diagram alir 2.....	56
Gambar 4.18	Diagram alir 3.....	56
Gambar 4.19	Diagram alir 4.....	57
Gambar 4.20	Diagram alir 5a.....	58
Gambar 4.21	Diagram alir 5b.....	59
Gambar 4.22	Pergerakan brushless DC motor dari posisi $-10^\circ$ menuju $10^\circ$ dengan <i>delay</i> 7 ms .....	64
Gambar 4.23	Respon dari $-10^\circ$ menuju $10^\circ$ semakin mendekati <i>setpoint</i> , <i>delay</i> semakin lambat .....	64
Gambar 4.24	Hasil respon dari $-10^\circ$ menuju $10^\circ$ dengan <i>delay</i> 7 ms saat $error > 10$ dan $delay = 70/error$ ms saat $error \leq 10$ .....	66
Gambar 4.25	dari $10^\circ$ menuju $0^\circ$ dengan $delay = 700/error$ ms .....	67
Gambar 4.26	Respon dari $10^\circ$ menuju $0^\circ$ dengan <i>delay</i> 7 ms saat $error > 10$ dan $delay = 70/error$ ms saat $error \leq 10$ .....	68
Gambar 4.27	Respon dari $9^\circ$ menuju $10^\circ$ dengan $delay = 700/error$ ms .....	69
Gambar 4.28	Perubahan dari $9^\circ$ menuju $10^\circ$ dengan <i>delay</i> 7 ms saat $error > 10$ dan $delay = 70/error$ ms saat $error \leq 10$ .....	70
Gambar 4.29	Perubahan lebar pulsa yang terjadi pada <i>gate</i> mosfet .....	71

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Urutan pengaturan saklar brushless DC moto.....	14
Tabel 2.2	Tabel kebenaran gerbang .....	20
Tabel 2.3	Pemilihan tegangan referensi pada ADC .....	28
Tabel 3.1	Spesifikasi Hyperion ZS2205-34 .....	35
Tabel 4.1	Posisi on/off mosfet untuk <i>clockwise</i> brushless DC motor .....	46
Tabel 4.2	Posisi on/off mosfet untuk <i>counterclockwise</i> brushless DC motor..	47
Tabel 4.3	Hasil Pengukuran Masukan dan Keluaran L293.....	50
Tabel 4.4	Nilai yang dihasilkan pada mikrokontroler tiap pergerakan $1^\circ$ .....	54
Tabel 4.5	Perbandingan respon dari $-10^\circ$ menuju $10^\circ$ .....	66
Tabel 4.6	Perbandingan respon dari $10^\circ$ menuju $0^\circ$ .....	68
Tabel 4.7	Perbandingan dengan menggunakan Persamaan 4.2 dan 4.3 dari sudut $9^\circ$ (nilai 651) sampai $10^\circ$ (nilai 646) .....	69
Tabel 4.8.	Perbandingan respon dari $9^\circ$ menuju $10^\circ$ .....	70



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia sedang mengembangkan teknologi untuk mendukung sistem informasi dan pertahanan. Penelitian dan pengembangan dilakukan terhadap roket kendali. Roket dapat dikembangkan untuk mengorbitkan satelit ataupun untuk alutsista (alat utama sistem senjata) sebagai pertahanan.

Implementasi roket pada sistem pertahanan tidak hanya daya dorong yang ada pada roket saja yang diperhatikan, bahan peledak, *sensor tracking*, *satellite controlling*, dan sirip kendali roket yang stabil terhadap gangguan pun harus dikembangkan dengan baik. Dengan sinyal posisi yang dikirimkan dari *autopilot* roket kendali diharapkan dapat bergerak ke arah yang diinginkan.

Arah roket diatur oleh sirip yang mendapatkan masukan dari *autopilot* lalu diolah ke dalam mikrokontroler dan menjalankan aktuator untuk menggerakkan sirip. Sudut yang dihasilkan dari pergerakan sirip tidak lebih dari  $10^{\circ}$ . Kendali sirip tidak hanya digunakan sebagai kendali arah roket, namun dapat juga diimplementasikan dalam bidang penerbangan dan transportasi.

Sirip dikendalikan oleh aktuator untuk mencapai sudut yang diinginkan. Aktuator adalah suatu peralatan mekanis yang digunakan untuk menggerakkan dalam suatu sistem. Ada beberapa macam aktuator, diantaranya adalah hidrolis, pneumatik, dan elektromekanik. Aktuator hidrolis adalah aktuator yang memanfaatkan tekanan fluida sebagai penggerak, aktuator pneumatik adalah aktuator yang memanfaatkan udara sebagai penggerak, dan aktuator elektromekanik adalah aktuator yang memanfaatkan energi listrik sebagai penggerak.

Pergerakan sirip menggunakan aktuator elektromekanik. Aktuator elektromekanik meliputi solenoid, relai, motor DC, motor stepper, motor servo, motor AC, dan brushless DC motor. Aktuator akan dikendalikan untuk mengatur pergerakan sirip dan mendapatkan sudut yang diinginkan.

Kendali sirip dirancang menggunakan brushless DC motor sebagai aktuator. Putaran brushless DC motor akan menggerakkan sirip sebesar  $-10^{\circ}$  sampai  $+10^{\circ}$ .

Metode yang digunakan dalam pengendalian brushless DC motor adalah metode *six-step* dengan driver 3 fasa. Untuk menghasilkan respon sistem yang baik, maka *delay* pada metode *six-step* harus disesuaikan agar dapat mencapai kecepatan yang diinginkan.

Untuk menentukan posisi sudut sirip, *autopilot* akan mengirimkan data posisi kepada mikrokontroler, dalam hal ini mikrokontroler yang digunakan adalah AVR ATmega8535. Mikrokontroler mengendalikan aktuator yang digunakan untuk menggerakkan sirip. Mikrokontroler harus mendapatkan umpan balik dari pergerakan sirip untuk mendapatkan pergerakan sirip yang akurat.

Berdasarkan uraian di atas maka penulis ingin mengadakan penelitian mengenai sistem kendali aktuator sirip menggunakan brushless DC motor.

## 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disebutkan di atas, maka perumusan masalah akan ditekankan pada:

1. Bagaimana pengendalian brushless DC motor dengan menggunakan metode *six-step*.
2. Bagaimana mendapatkan pergerakan sirip yang akurat sebesar  $1^\circ$  dengan jarak pergerakan sirip  $-10^\circ$  sampai  $+10^\circ$ .
3. Bagaimana membuat program pada mikrokontroler AVR ATmega8535 dengan BASCOM AVR untuk mengendalikan pergerakan sirip.
4. Bagaimana menerapkan kendali brushless DC motor menggunakan metode *six-step* ke dalam bahasa pemrograman pada mikrokontroler AVR ATmega8535.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah merancang dan membuat suatu sistem kendali sirip roket untuk mendapatkan pergerakan sirip roket sesuai dengan sudut yang diinginkan.

#### 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar untuk pengembangan dan penelitian berikutnya.
2. Pengaturan sudut sirip dapat diaplikasikan dalam bidang transportasi.

#### 1.5 Batasan Penelitian

Pembahasan penelitian ini dibatasi oleh beberapa hal, diantaranya:

1. Perancangan driver brushless DC motor.
2. Pengendalian sudut aktuator sirip dengan metode *six-step*.
3. Pemrograman pada mikrokontroler.
4. Pembuatan perangkat keras dan perangkat lunak.

#### 1.6 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Tinjauan pustaka.
2. Survey konstruksi mekanik sirip.
3. Pengumpulan data.
4. Pengolahan data.
5. Analisis data.
6. Dokumentasi.

#### 1.7 Sistematika Penulisan

Skripsi ini disusun dalam lima bab. Bab 1 merupakan pendahuluan yang berisi latar belakang masalah yang akan diteliti dan rencana penelitian yang akan dilakukan. Bab 2 merupakan tinjauan pustaka yang berisi tentang teori pendukung yang berkaitan dengan penelitian. Bab 3 merupakan perancangan sistem kendali sirip yang berisi tentang perancangan yang dilakukan serta komponen yang digunakan. Bab 4 merupakan pengujian dan analisis hasil yang berisi tentang analisis hasil penelitian yang telah dilakukan. Bab 5 merupakan penutup yang berisi tentang rangkuman seluruh penelitian yang telah dilakukan serta saran untuk penelitian berikutnya.



## BAB 2

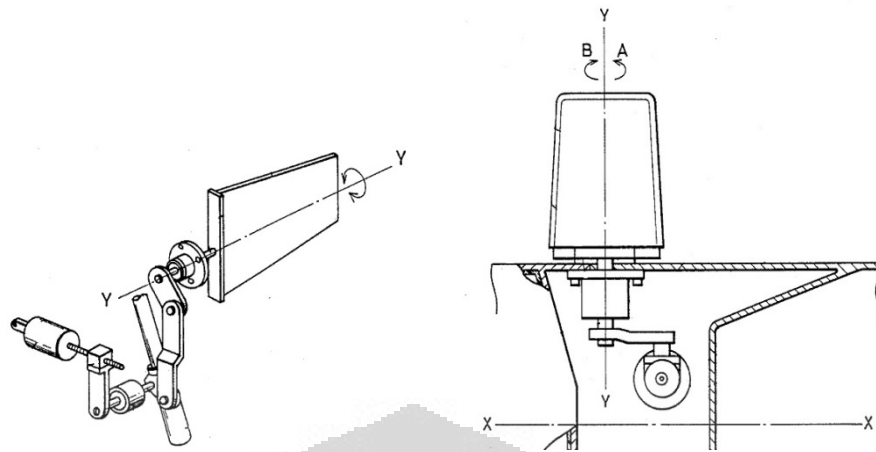
### TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas mengenai teori penunjang pada proses pembuatan prototipe sistem aktuator kendali sirip menggunakan mikrokontroler ATmega8535 sebagai kontroler dan brushless DC motor sebagai aktuator. Teori didapat dari buku, jurnal, dan skripsi yang membahas mengenai sistem kendali sirip dan komponen yang digunakan pada pembuatan prototipe ini.

#### 2.1 Roket Kendali

Roket dikendalikan oleh sistem yang mengatur pergerakan sirip. Untuk mengatur kecepatannya, roket menggunakan pendorong atau *booster*. Ketika roket diluncurkan, saat itu juga arah roket diatur. Walaupun kecepatan awal roket ditingkatkan dengan menggunakan pendorong, saat kecepatan terbangnya masih rendah, sulit untuk mendapatkan hasil yang cukup signifikan dalam menggerakkan roket akibat pergerakan sirip [1]. Pergerakan sirip dapat mengakibatkan adanya gaya aerodinamis yang dapat mengubah arah dari roket tersebut.

Target yang dituju adalah target diam yang data posisinya akan digunakan sebagai acuan untuk *autopilot* dalam mengarahkan roket. *Autopilot* adalah alat yang akan mengirimkan perintah untuk menggerakkan sirip. Ada 4 sirip yang berada pada roket yang dikendalikan oleh aktuator, dan masing-masing aktuator dikendalikan secara independen akibat penyimpangan pada permukaan yang terjadi, penyimpangan sirip pada umumnya bergerak kurang dari  $10^\circ$  [2]. Simpangan sirip sebesar  $1^\circ$  mampu membuat perubahan arah roket cukup signifikan, sehingga pergerakan sirip pada roket tidak lebih dari  $10^\circ$ . Pergerakan sirip harus mampu menahan beban angin, gravitasi, dan kecepatan yang dihasilkan oleh pendorong.



Gambar 2.1 Bagian dari sirip roket, (kanan) saat terpasang di roket dan (kiri) aktuator sirip [1]

Mach adalah satuan kecepatan yang umum untuk mengekspresikan kecepatan suatu pesawat terbang relatif terhadap kecepatan suara [3]. Kecepatan suara tergantung pada tingkat tekanan dan suhu atmosfer. Kecepatan untuk roket sesuai dengan satuan Mach dibagi menjadi 5, yaitu:

1. Subsonik ( $Mach < 1,0$ )
2. Sonik ( $Mach = 1,0$ )
3. Transonik ( $0,8 < Mach < 1,3$ )
4. Supersonik ( $Mach > 1,3$ )
5. Hypersonik ( $Mach > 5,0$ )

Roket kendali RXX-200 memiliki kecepatan 0,9 Mach atau sekitar 306 m/s (1 Mach = 340 m/s). Menurut perhitungan numerik dan perhitungan empiris torsi yang dibutuhkan dengan tekanan dinamis pada sirip antara 387,94 Pa – 78262,18 Pa dan diameter *shaft* sebesar 25 mm adalah 0,21-0,236 Nm [4]. Hasil perhitungan numerik digunakan sebagai acuan, karena menghasilkan nilai yang lebih besar.

Pengembangan wahana untuk roket kendali terdiri dari beberapa aspek terkait, diantaranya [5]:

1. Penentuan Misi. Misi terbang roket, seperti terbang jelajah, terbang dari darat ke udara, terbang dari udara ke udara, dan dari udara ke darat.
2. Desain Aerodinamik. Penentuan bentuk sirip, posisi, dan hal-hal yang berkaitan dengan bentuk aerodinamik untuk menaikkan performa roket.
3. Pembuatan Struktur. Pemilihan material sesuai dengan berat yang diinginkan, struktur roket yang akan dibuat, penentuan bentuk *nose* serta sirip, penyambungan sirip, dan mekanisme kendali sirip.
4. Instrumentasi Sistem Kendali. Perangkat keras dan perangkat lunak yang digunakan.
5. Sistem Indera Dinamik dan Rekoveri. Pada tahap pengujian, sistem ini diperlukan untuk mendapatkan data dari gerak roket yang akan digunakan untuk perbaikan performa roket. Sistem rekoveri untuk mendapatkan kembali roket yang telah uji terbang.
6. Propulsi. Motor roket mempunyai gaya dorong dan waktu bakar yang berbeda yang disesuaikan dengan kegunaannya.
7. Uji Validasi. Untuk memastikan semua sistem bekerja dengan baik.

## 2.2 Mikrokontroler AVR ATmega8535

Mikrokontroler adalah suatu IC dimana terdapat mikroprosesor ROM (*Read-Only Memory*), serta RAM (*Random Access Memory*) dalam satu kemasan. Ada beberapa vendor yang membuat mikrokontroler, diantaranya Intel, Microchip, Winbond, Atmel, Philips, Arduino, dan Xeremics.

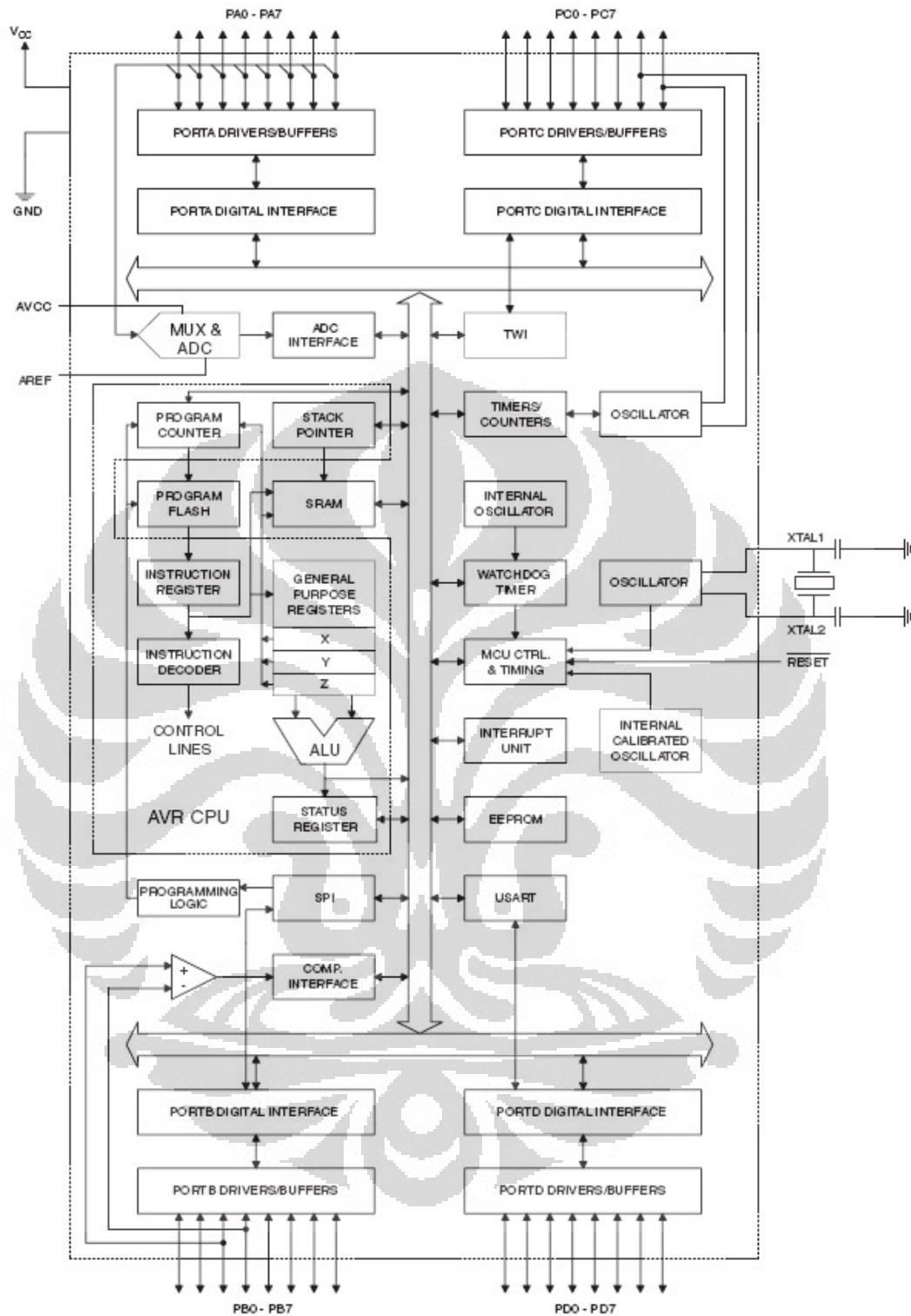
Atmel memproduksi mikrokontroler jenis AVR (*Alf and Vegard's Risc Processor*) yang berasal dari nama penemunya, yaitu Alf Egil Bogen dan Vegard Wollan. AVR termasuk ke dalam jenis mikrokontroler RISC (*Reduced Instruction Set Computing*) 8 bit, dimana semua instruksi dikemas dalam kode 16-bit dan sebagian besar instruksi dieksekusi dalam satu siklus *clock*. Berbeda dengan MCS51, dengan teknologi CISC (*Complex Instruction Set Computing*) membutuhkan 12 siklus *clock*. Secara umum AVR dapat dikelompokkan menjadi 4 kelas, yaitu: ATtiny, AT90Sxx, ATmega, dan AT86RFxx. Pada dasarnya yang

membedakan masing-masing kelas adalah kapasitas memori, peripheral, dan fungsinya. Dari segi arsitektur dan instruksi yang digunakan, bisa dikatakan sama.

### 2.2.1 Arsitektur ATmega8535

Mikrokontroler AVR ATmega8535 memiliki beberapa bagian yang berapa pada setiap chip, yaitu [6]:

1. Saluran I/O sebanyak 32 buah, yaitu Port A, Port B, Port C, dan Port D.
2. ADC 10 bit sebanyak 8 saluran.
3. Tiga buah *Timer/Counter* dengan kemampuan perbandingan.
4. CPU yang terdiri atas 32 buah register.
5. Watchdog Timer dengan *osilator internal*.
6. SRAM sebesar 512 byte.
7. Memory Flash sebesar 8 kb dengan kemampuan *Read While Write*.
8. Unit interupsi internal dan eksternal.
9. Port antarmuka SPI.
10. EEPROM sebesar 512 byte yang dapat diprogram saat operasi.
11. Komparator analog.
12. Port USART untuk komunikasi serial.

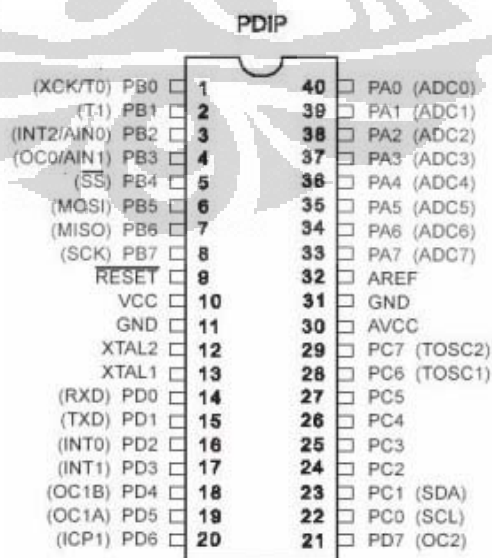


Gambar 2.2 Blok diagram ATmega8535 [6]

### 2.2.2 Konfigurasi Pin ATmega8535

Konfigurasi pin ATmega8535 bisa dilihat pada Gambar 2.3, dengan penjelasan sebagai berikut [6]:

1. VCC merupakan pin yang berfungsi sebagai pin masukan catu daya.
2. GND merupakan pin ground.
3. Port A (PA0-PA7) merupakan pin I/O dua arah dan pin masukan ADC.
4. Port B (PB0-PB7) merupakan pin I/O dua arah dan pin fungsi khusus, yaitu *Timer/Counter*, komparator analog, dan SPI.
5. Port C (PC0-PC7) merupakan pin I/O dua arah dan pin fungsi khusus, yaitu TWI, komparator analog, dan Timer Oscilator.
6. Port D (PD0-PD7) merupakan pin I/O dua arah dan pin fungsi khusus, yaitu komparator analog, interupsi eksternal, dan komunikasi serial.
7. RESET merupakan pin yang digunakan untuk mereset mikrokontroler.
8. XTALL1 dan XTALL2 merupakan pin masukan clock eksternal.
9. AVCC merupakan pin masukan tegangan untuk ADC.
10. AREF merupakan pin masukan tegangan referensi ADC.

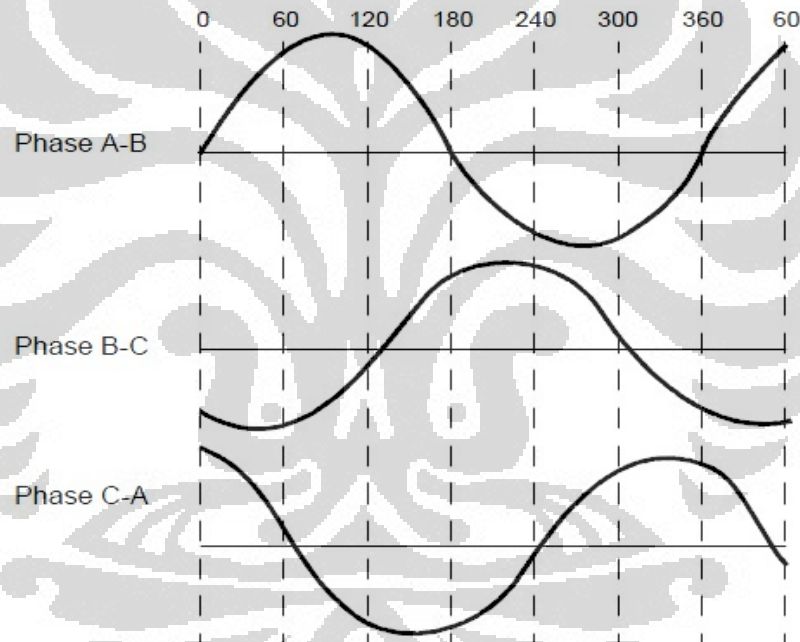


Gambar 2.3. Pin ATmega8535 [6]

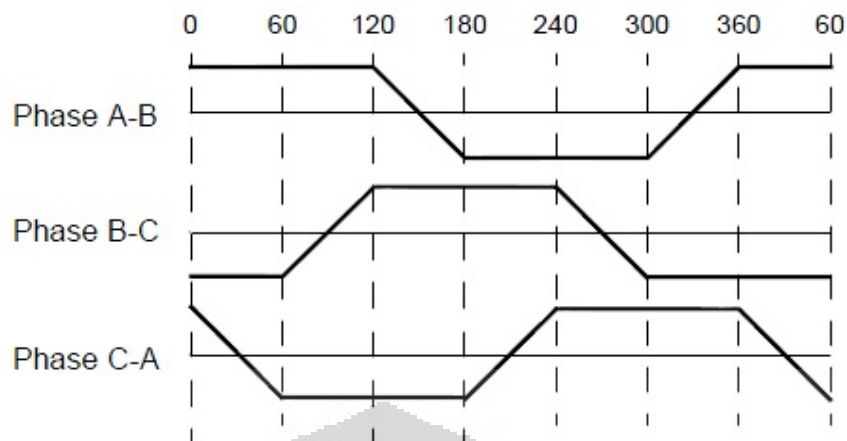
### 2.3 Brushless DC Motor (BLDC)

Brushless DC motor adalah sebuah motor sinkron AC 3 fasa yang cukup optimal untuk mengendalikan alat-alat sederhana, seperti pompa ABS, kipas pendingin, *cd-rom drive*, motor *harddisk*, dan *fuel pump*. Brushless DC motor tidak menggunakan sikat untuk menggerakkan rotornya. Sistem 3 fasa yang diberikan pada brushless DC motor, dapat menggerakkan dan membuatnya berputar akibat magnet permanen yang ada pada motor tersebut dengan pemberian sinyal 3 fasa.

Brushless DC motor memiliki *back EMF* berbentuk trapezoidal, berbeda dengan motor sinkron AC 3 fasa yang memiliki *back EMF* berbentuk sinusoidal.

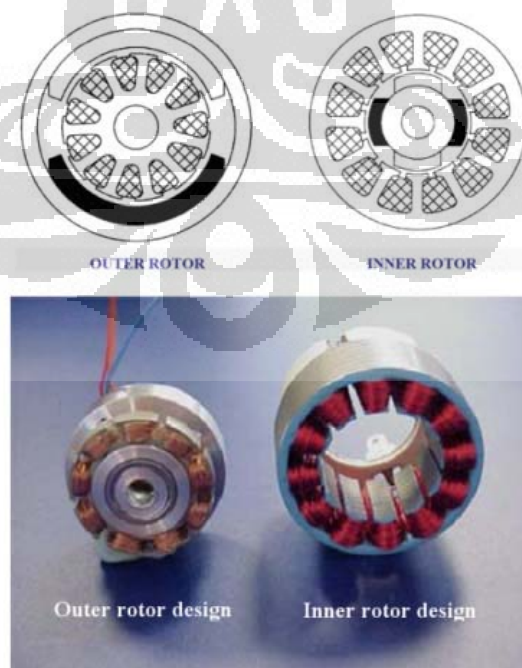


Gambar 2.4 Sinusoidal *back EMF* [7]



Gambar 2.5 Trapezoidal *back* EMF [7]

Brushless DC motor tidak termasuk motor AC karena tetap menggunakan sumber DC pada sumber tegangannya dan mengubahnya menjadi tegangan AC menggunakan inverter 3 fasa. Brushless DC motor terdiri dari dua bagian, yaitu rotor dan stator. Rotor adalah bagian yang bergerak, terbuat dari magnet permanen dan stator merupakan bagian yang diam, terdiri dari kumparan. Elektromagnet pada brushless DC motor tidak bergerak, hanya dipindahkan dari stator ke rotor. Letak rotor dapat berada di dalam stator maupun di luar stator (Gambar 2.6).



Gambar 2.6 Letak rotor di dalam dan di luar stator



Keuntungan menggunakan brushless DC motor dibandingkan dengan motor DC biasa adalah [8]:

1. Lebih tahan lama, karena tidak memerlukan perawatan terhadap sikatnya.
2. Efisiensi yang tinggi.
3. Torsi awal yang tinggi,
4. Kecepatan yang tinggi, tergantung pada kekuatan medan magnet yang dihasilkan oleh arus yang dibangkitkan dari kendali penggerakannya.

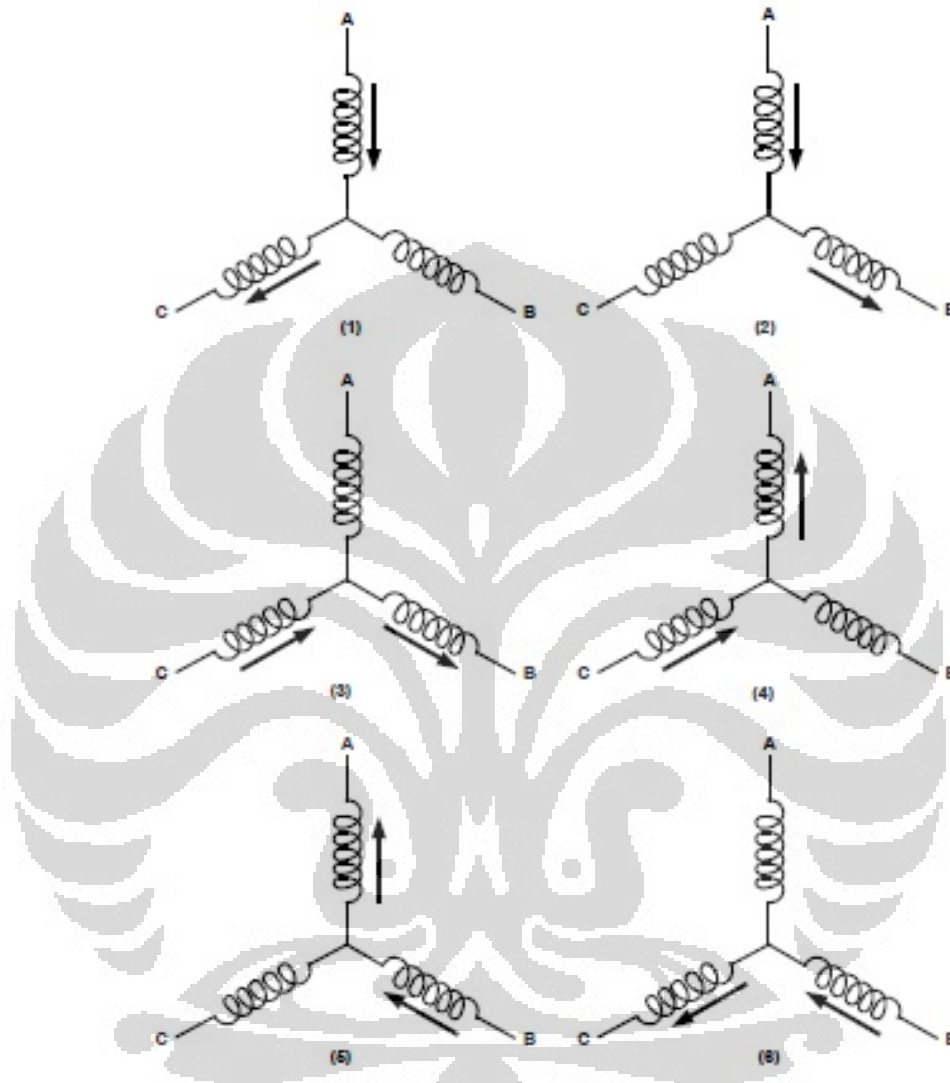
Walupun brushless DC motor memiliki kelebihan dibandingkan dengan motor DC biasa, pengendalian brushless DC motor lebih rumit untuk mengatur kecepatan dan torsi motor. Harga brushless DC motor juga cukup mahal jika dibandingkan dengan motor DC biasa.

### 2.3.1 Prinsip Kerja Brushless DC Motor

Prinsip kerja rotor di dalam dan rotor di luar adalah sama, hanya saja kecepatan dan torsi yang dihasilkan akan berbeda. Rotor di luar menghasilkan torsi lebih besar dan kecepatan yang lebih lambat dibandingkan dengan rotor yang di dalam. Hal tersebut disebabkan oleh perbedaan jumlah magnet pada rotornya. Semakin banyak magnet pada rotor, maka pergerakan satu stepnya akan semakin kecil, sehingga membutuhkan pergerakan yang lebih banyak dalam satu putaran.

Brushless DC motor akan bekerja jika polaritas pada ketiga kumparannya berubah-ubah. Jika pada Fasa A diberikan tegangan positif dan 0V pada Fasa C, maka akan timbul medan magnet yang akan menggerakkan magnet rotor. Kemudian, tegangan 0V diberikan pada Fasa B dan tegangan positif tetap di Fasa A, sehingga magnet rotor akan bergerak menuju arah medan magnet stator yang ditimbulkan oleh Fasa A dan Fasa B. Selanjutnya, Fasa B diberikan tegangan 0V dan Fasa C diberikan tegangan positif, Fasa C diberikan tegangan positif dan Fasa A diberikan tegangan 0V, Fasa A diberikan tegangan 0V dan Fasa B diberikan tegangan positif, Fasa B diberikan tegangan positif dan Fasa C diberikan tegangan 0V, kemudian diulang kembali. Pemberian tegangan yang berbeda-beda

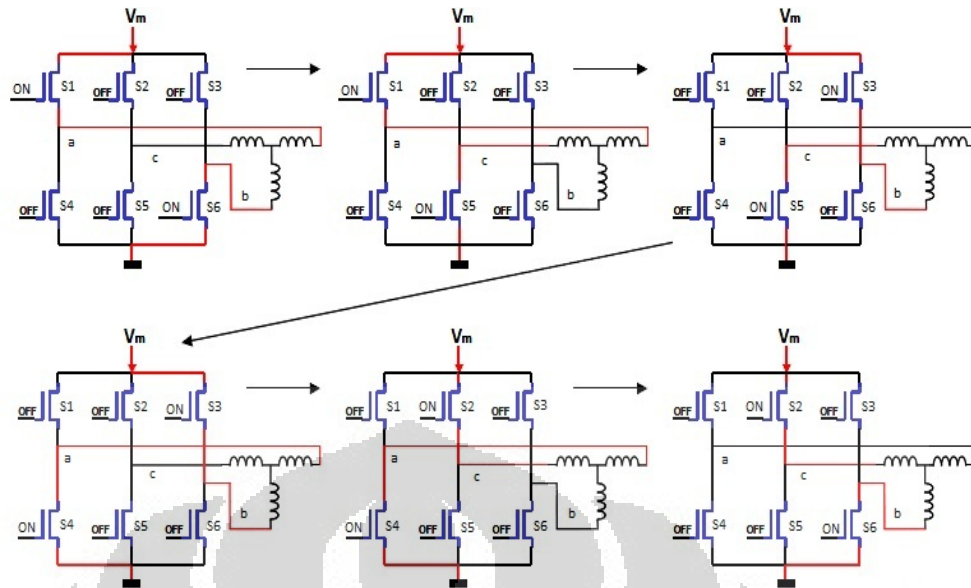
akan membuat medan magnet pada stator pun berpindah-pindah dan rotor pun berputar.



Gambar 2.7 Pemberian tegangan pada kumparan stator (panah masuk diberikan tegangan positif dan panah keluar diberikan tegangan 0V) [7]

### 2.3.2 Driver 3 Fasa

Brushless DC motor membutuhkan 6 step secara kontinyu untuk berputar yang diberikan oleh driver 3 fasa. Driver 3 fasa terdiri dari 6 buah saklar yang akan memberikan tegangan positif (sinyal *high*) dan tegangan 0V (sinyal *low*) secara bergantian. Mosfet akan digunakan sebagai saklar dengan keluaran L293/L293D yang akan mengendalikan *gate* mosfet tersebut.



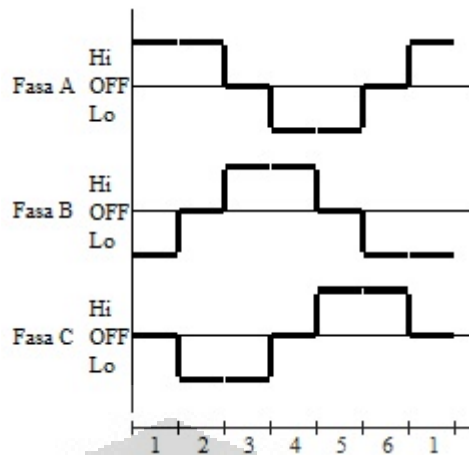
Gambar 2.8 Urutan penyalan saklar pada driver brushless DC motor [9]

Saklar  $S_1$ ,  $S_2$ , dan  $S_3$  akan memberikan sinyal *high* saat aktif untuk masing-masing keluaran (a, b, dan c), sedangkan  $S_4$ ,  $S_5$ , dan  $S_6$  akan memberikan sinyal *low* saat aktif untuk masing-masing keluaran.

Hasil keluaran dari Gambar 2.8 akan menghasilkan keluaran pada stator seperti Gambar 2.9. Untuk membalikkan arah putaran, maka urutan dari pemberian polaritas tegangan tersebut dibalik dari 1-2-3-4-5-6 menjadi 6-5-4-3-2-1 (Tabel 2.1).

Tabel 2.1 Urutan pengaturan saklar brushless DC motor

Urutan ke-	Saklar aktif		Fasa A	Fasa B	Fasa C
1	S1	S6	Hi	Lo	Off
2	S1	S5	Hi	Off	Lo
3	S3	S5	Off	Hi	Lo
4	S3	S4	Lo	Hi	Off
5	S2	S4	Lo	Off	Hi
6	S2	S6	Off	Lo	Hi



Gambar 2.9 Keluaran stator yang dihasilkan oleh urutan pengaturan saklar

Pergerakan brushless DC motor ini berurutan dari urutan ke-1 sampai ke-6. Pada masing-masing gerakan, sudut putar yang dihasilkan brushless DC motor tergantung pada banyaknya magnet yang ada pada rotornya. Dapat diperoleh besarnya sudut tiap urutannya dengan menggunakan Persamaan 2.1 dan 2.2 [8].

$$SPR = NR \times \emptyset \quad (2.1)$$

$$SA = \frac{360}{SPR} \quad (2.2)$$

Keterangan:

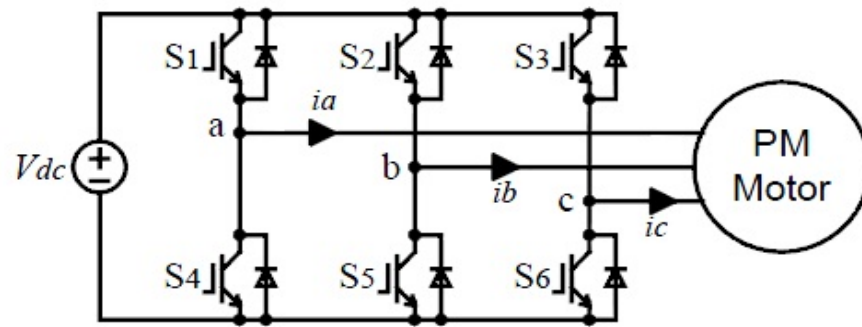
SPR : *Step per revolution*

NR : *Number of rotor teeth*

$\emptyset$  : *Number of motor phase*

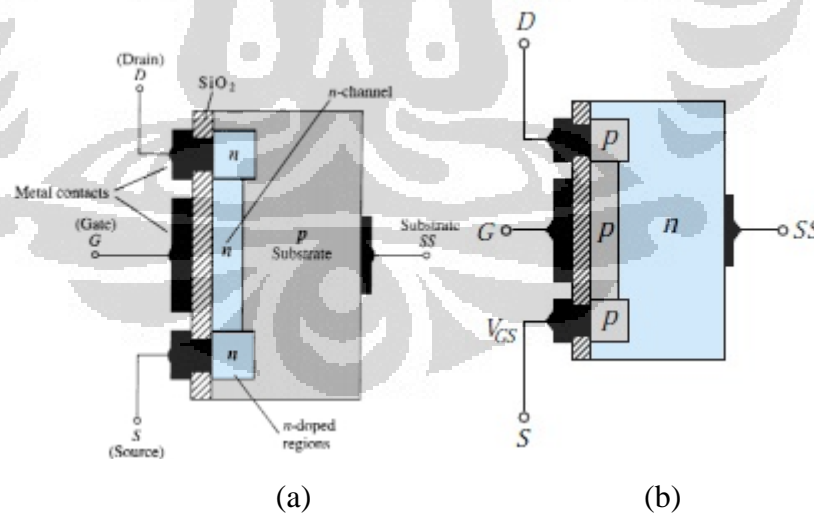
SA : *Step angle (derajat)*

Proses pengendalian brushless DC motor menggunakan mosfet yang terdiri dari mosfet tipe-n pada bagian bawah divais dan mosfet tipe-p pada bagian atas divais [11]. Mosfet tipe-p memberikan sinyal *high* (meneruskan tegangan positif), sedangkan mosfet tipe-n akan memberikan sinyal *low* (meneruskan tegangan 0V) untuk brushless DC motor. Pada Gambar 2.10, ada tiga keluaran yang digunakan untuk brushless DC motor.

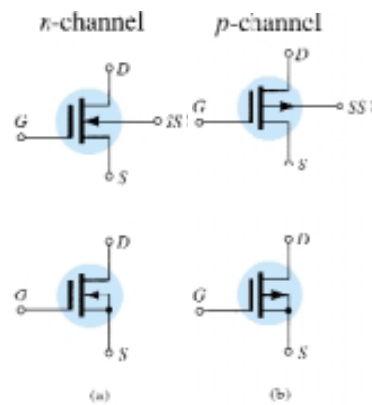


Gambar 2.10 Driver 3 fasa brushless DC motor [12]

Mosfet (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) mempunyai tiga bagian kontak, yaitu drain (D), gate (G), dan source (S). Ketiga bagian itu dihubungkan pada metal yang nantinya akan dihubungkan ke rangkaian. Pada gate diberi lapisan insulator berupa *silicon dioxide* ( $\text{SiO}_2$ ) yang sangat tipis, sehingga tidak akan ada hubungan elektrik secara langsung antara gate dengan *channel* [13]. Susunan bagian mosfet tipe-p dan tipe-n dapat dilihat pada Gambar 2.11, beserta simbolnya pada Gambar 2.12.



Gambar 2.11 *Channel* mosfet (a) mosfet tipe-n dan (b) mosfet tipe-p [13]

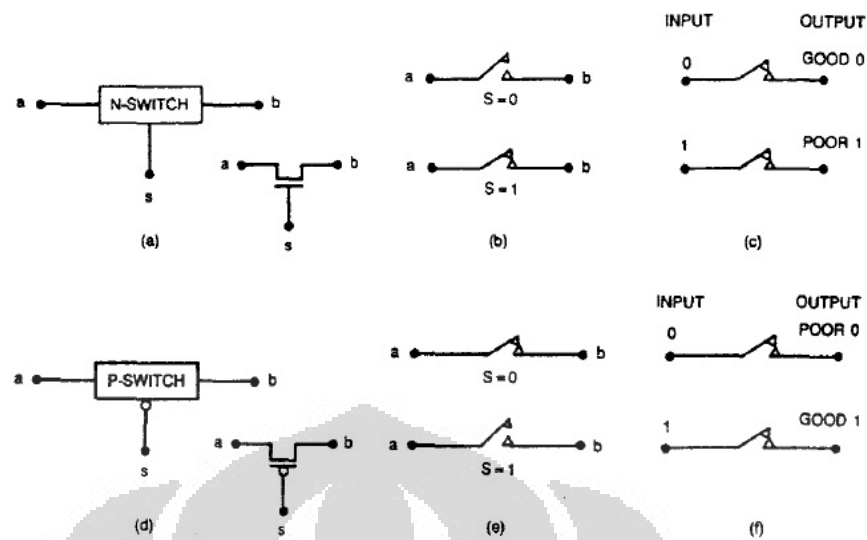


Gambar 2.12 Simbol mosfet (a) mosfet tipe-n dan (b) mosfet tipe-p [13]

Mosfet tipe-p baik dalam memberikan sinyal *high* dan mosfet tipe-n baik dalam memberikan sinyal *low*. Sinyal *high* dan sinyal *low* dibutuhkan oleh motor brushless untuk setiap step gerakannya. Selain itu, jika sebagai saklar, proses *switching* mosfet lebih cepat dibandingkan dengan transistor pada umumnya.

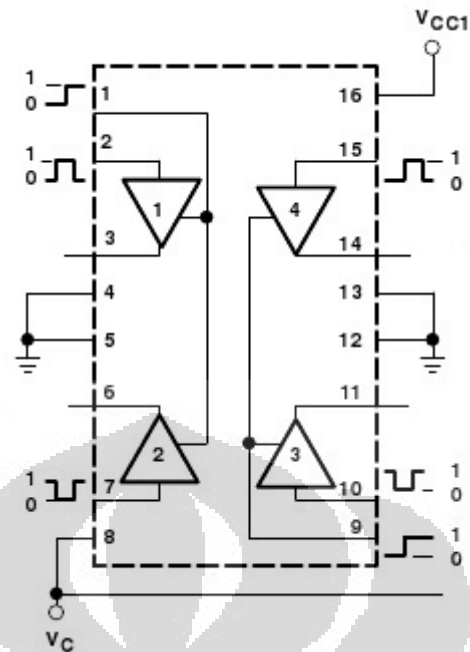
Pada Gambar 2.13 dapat dilihat bahwa mosfet tipe-p akan tertutup jika diberikan logika '0' pada gatinya dan akan terbuka saat diberikan logika '1'. Untuk hantaran arus drain-source mosfet tipe-p sangat baik untuk mengalirkan logika '1' dan kurang optimal jika mengalirkan logika '0' [14].

Mosfet tipe-n akan terbuka jika diberikan logika '0' pada gatinya dan akan tertutup saat diberikan logika '1'. Untuk hantaran arus drain-source mosfet tipe-n sangat baik untuk mengalirkan logika '0' dan kurang optimal jika mengalirkan logika '1' [14].

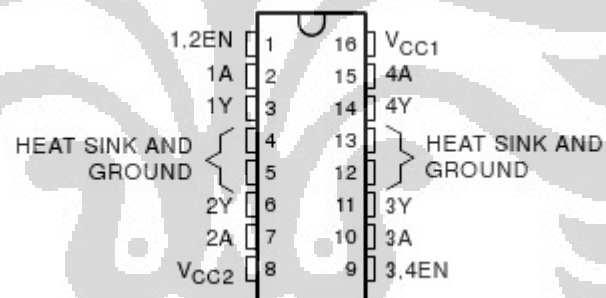


Gambar 2.13 Fungsi mosfet sebagai saklar [14]

*Gate* mosfet akan diatur oleh L293/L293D yang dikendalikan oleh mikrokontroler. Blok diagram L293/L293D dapat dilihat pada Gambar 2.14. L293/L293D memiliki 4 buah gerbang buffer yang umum digunakan untuk menggerakkan motor DC. IC ini membutuhkan tegangan 5V untuk *enable* keempat gerbang buffernya dan untuk IC itu sendiri, sedangkan untuk besar keluaran yang dihasilkan tergantung dari sumber yang diberikan pada gerbang. L293/L293D mampu diberikan tegangan dari 4.5V sampai dengan 36V, dengan arus keluaran 1A dan arus keluaran puncak sebesar 2A per gerbang (600mA dan 1,2A pada arus puncak keluaran untuk L293D) dan sudah tersedia dioda pada L293D [15].



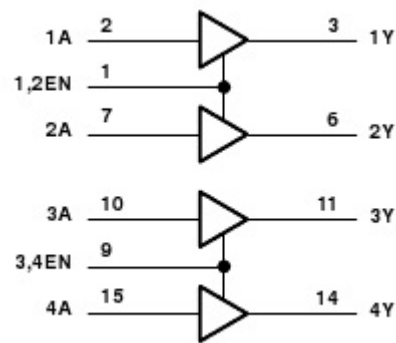
Gambar 2.14 Blok diagram L293/L293D [15]



Gambar 2.15 Konfigurasi pin L293/L293D [15]

IC ini memiliki 4 masukan, 4 keluaran, 2 pin *enable*, serta tegangan untuk IC yang terpisah tegangan untuk keluarannya. Pin *enable* harus selalu diberikan logika '1' untuk mengaktifkan gerbang tersebut, sedangkan jika diberi logika '0' gerbang akan off. *Enable* pertama pada Pin 1 untuk masukan/keluaran 1 dan masukan/keluaran 2, sedangkan *enable* kedua pada Pin 9 untuk masukan/keluaran 3 dan masukan/keluaran 4 (Gambar 2.16).





Gambar 2.16 *Logic Diagram L293/L293D* [15]

Jika diberikan logika '1' pada masukannya, maka sinyal keluaran akan *high* sesuai dengan tegangan yang diberikan untuk keluarannya. Tabel kebenaran L293/L293D dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Tabel kebenaran gerbang [15]

Input		Output
A	EN	Y
H	H	H
L	H	L
X	L	Z

Keterangan:

A : Masukan gerbang buffer

EN : *Enable* pada gerbang buffer

Y : Keluaran gerbang buffer

H : Sinyal *high*

L : Sinyal *low*

X : *Don't care*

Z : *High impedansi*

#### 2.4 Pengendalian Brushless DC Motor

Metode yang digunakan dalam pengendalian brushless DC motor diantaranya adalah metode *six-step*, metode sinyal PWM, dan metode PWM sinusoidal.

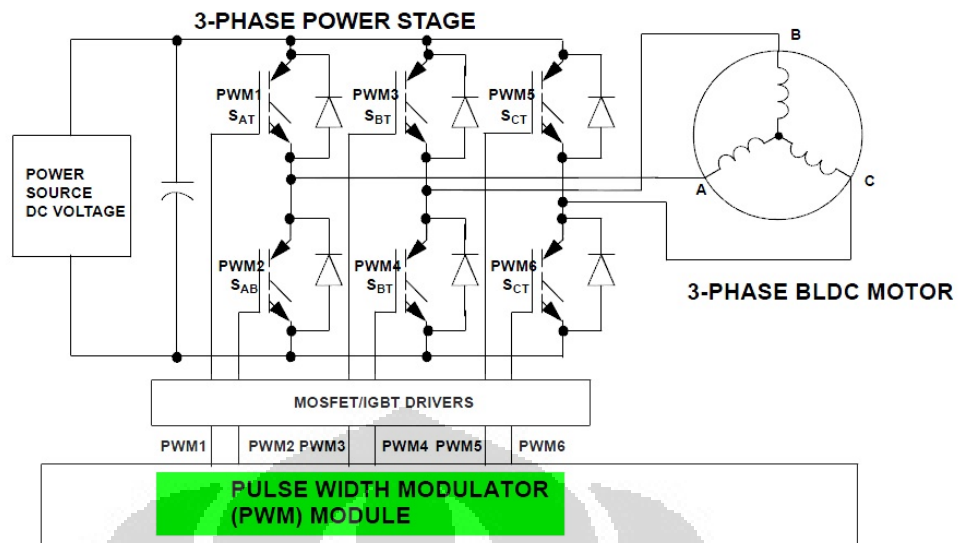
#### 2.4.1 Metode *Six-Step*

Metode *six-step* merupakan metode paling sering digunakan dalam pengendalian brushless DC motor, karena metode yang digunakan sederhana, sehingga mudah untuk diaplikasikan. Namun, metode *six-step* memiliki kelemahan, yaitu memiliki arus rms yang tinggi, rugi-rugi daya yang tinggi, dan bising [16]. Hal ini terjadi karena PWM yang digunakan dalam metode ini merupakan PWM *square* dengan frekuensi tertentu sehingga menciptakan gelombang AC yang terbentuk *trapezoid* atau *square* [16].

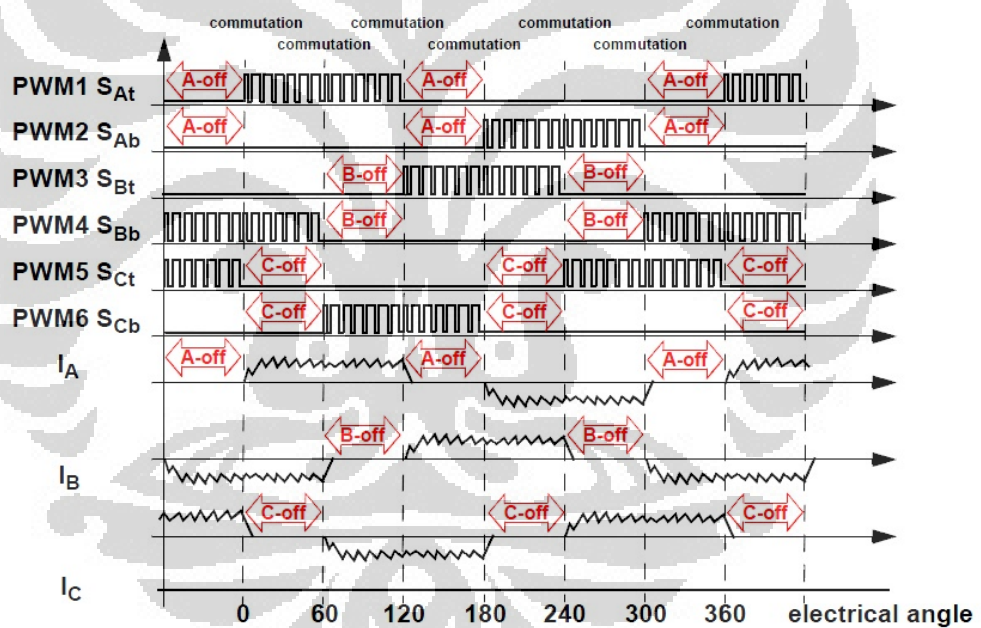
Metode ini disebut metode *six-step*, karena untuk menciptakan gelombang *trapezoid* atau *square* yang menyerupai gelombang sinusoidal, menggunakan 6 step posisi saklar untuk brushless DC motor. Metode *six-step* ini menggunakan urutan penyalan saklar seperti Gambar 2.8 dan Tabel 2.1 dengan hasil keluaran pada stator seperti Gambar 2.9. Frekuensi gelombang *square* diatur dengan mengatur waktu tunda (*delay*) pada pergantian tiap urutan penyalan saklar.

#### 2.4.2 Metode Sinyal PWM

Metode sinyal PWM menggunakan modul PWM untuk mengendalikan driver 3 fasa yang terdiri dari 6 buah mosfet (Gambar 2.17). Sinyal PWM yang diberikan pada mosfet berbeda-beda seperti Gambar 2.18, sehingga keluaran yang dihasilkan oleh driver tersebut dapat menggerakkan brushless DC motor.



Gambar 2.17 Driver 3 fasa dengan modul PWM [17]



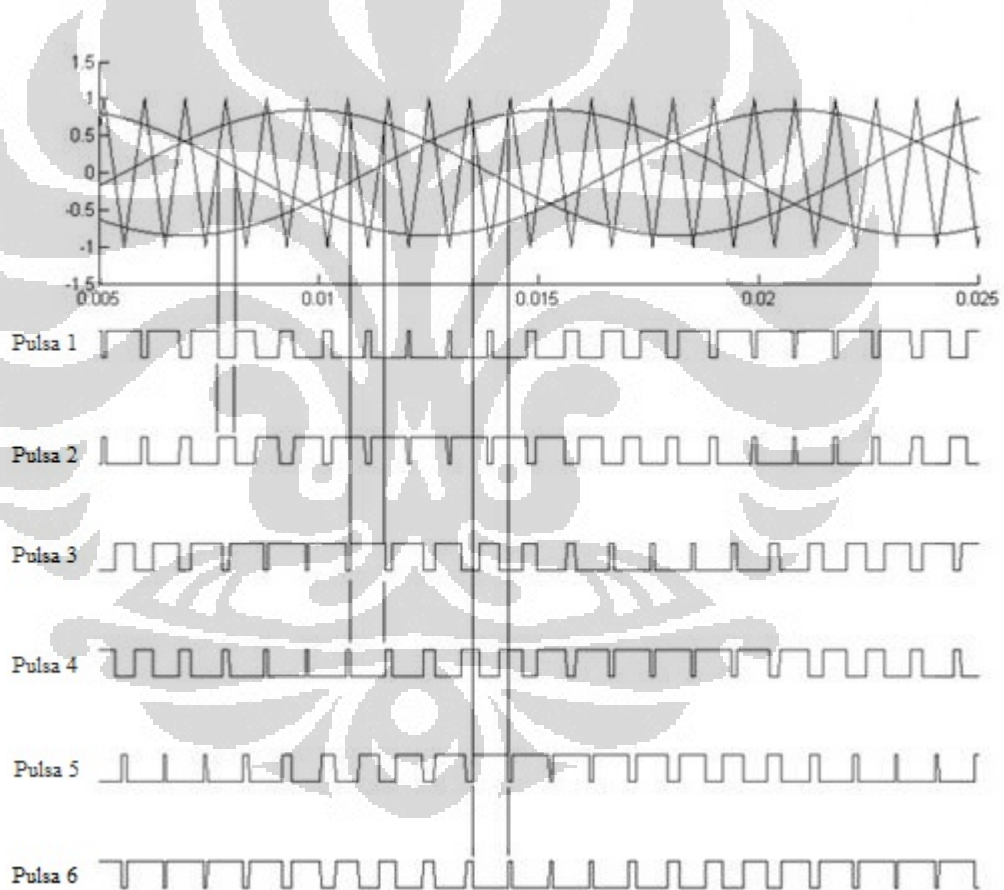
Gambar 2.18 6 Sinyal PWM yang berbeda diberikan pada mosfet [17]

### 2.4.3 Metode PWM Sinusoidal

Metode PWM sinusoidal bertujuan untuk menciptakan gelombang sinusoidal sebagai masukan motor. Kelebihan pengendalian ini adalah memiliki arus rms yang lebih kecil dibandingkan dengan metode *six-step*, rugi-rugi yang kecil, dan tidak bising [16]. Metode ini jarang digunakan karena algoritma yang rumit dalam pembangkitan sinyal PWM sinusoidal

[16]. Proses pembangkitan sinyal PWM sinusoidal dilakukan dengan cara membandingkan sinyal sinusoidal dengan sinyal segitiga yang memiliki frekuensi lebih tinggi. Karena sinyal segitiga dan sinyal sinusoidal ini berpotongan pada dua titik, maka sebuah sinyal PWM akan terbentuk (Gambar 2.19).

Besar PWM yang dihasilkan tergantung dari frekuensi sinyal segitiga yang digunakan. Semakin besar frekuensi sinyal segitiga yang digunakan, PWM yang dihasilkan semakin baik dan semakin sempurna gelombang sinusoidal yang terbentuk. Oleh karena itu, sinyal PWM tersebut harus dibagi menjadi 6 bagian untuk menunjang proses komutasi pada BLDC.



Gambar 2.19 6 Sinyal PWM yang dihasilkan dari gelombang sinusoidal [16]

## 2.5 Roda Gigi (*Gear*)

Roda gigi digunakan untuk mentransmisikan daya yang cukup besar dengan putaran yang tepat. Roda gigi berguna untuk mentransmisikan daya dan putaran, baik menaikkan putaran, maupun menurunkan putaran. Roda gigi juga memiliki beberapa kelebihan jika dibandingkan dengan alat transmisi lainnya seperti rantai ataupun *belt*, yaitu:

1. Sistem transmisinya lebih ringkas, putaran lebih tinggi, dan daya yang besar.
2. Sistem yang kompak sehingga konstruksinya sederhana.
3. Kemampuan menerima beban lebih tinggi.
4. Efisiensi pemindahan dayanya tinggi karena faktor terjadinya slip sangat kecil.
5. Kecepatan transmisi rodagigi dapat ditentukan sehingga dapat digunakan dengan pengukuran yang kecil dan daya yang besar.
6. Putaran yang ditransmisikan lebih tinggi.
7. Dapat meneruskan putaran dengan perbandingan yang tetap.
8. Dapat merubah arah dan sudut putar dari poros.

Roda gigi harus mempunyai perbandingan kecepatan sudut tetap antara dua poros. Di samping itu, terdapat pula roda gigi yang perbandingan kecepatan sudutnya dapat bervariasi. Ada pula roda gigi dengan putaran yang terputus-putus.

Roda gigi diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu:

1. Menurut letak poros.
  - a. Roda gigi dengan poros sejajar.
  - b. Roda gigi dengan poros berpotongan.
  - c. Roda gigi dengan poros silang.
2. Menurut arah putaran.
  - a. Roda gigi luar (arah putaran berlawanan).
  - b. Roda gigi dalam dan pinion (arah putaran sama).
  - c. Roda gigi rack dan pinion (gerak lurus dan berputar).
3. Menurut bentuk jalur gigi.
  - a. Roda gigi lurus.

- b. Roda gigi miring.
- c. Roda gigi miring ganda.

### 2.5.1 Jenis-jenis Roda Gigi (*Gear*)

Pada umumnya roda gigi dibagi menjadi empat jenis, yaitu:

#### 1. Roda Gigi Lurus (*Spur Gear*)

Suatu elemen mesin yang berfungsi sebagai penerus daya dan putaran dari poros penggerak ke poros yang digerakkan tanpa terjadi slip, dimana sumbu kedua poros tersebut terletak sejajar. Bentuk roda gigi ini dapat dilihat pada Gambar 2.20(a).

#### 2. Roda Gigi Miring (*Helical Gear*)

Suatu elemen mesin yang mempunyai jalur gigi yang membentuk spiral pada silinder, berfungsi sebagai penghubung antara roda gigi yang digerakkan dengan roda gigi penggerak dengan putaran dan daya yang sama. Daya pada roda gigi miring yang kecil sama dengan daya pada roda gigi lurus. Kedua poros terletak sejajar. Bentuk roda gigi ini dapat dilihat pada Gambar 2.20(b).

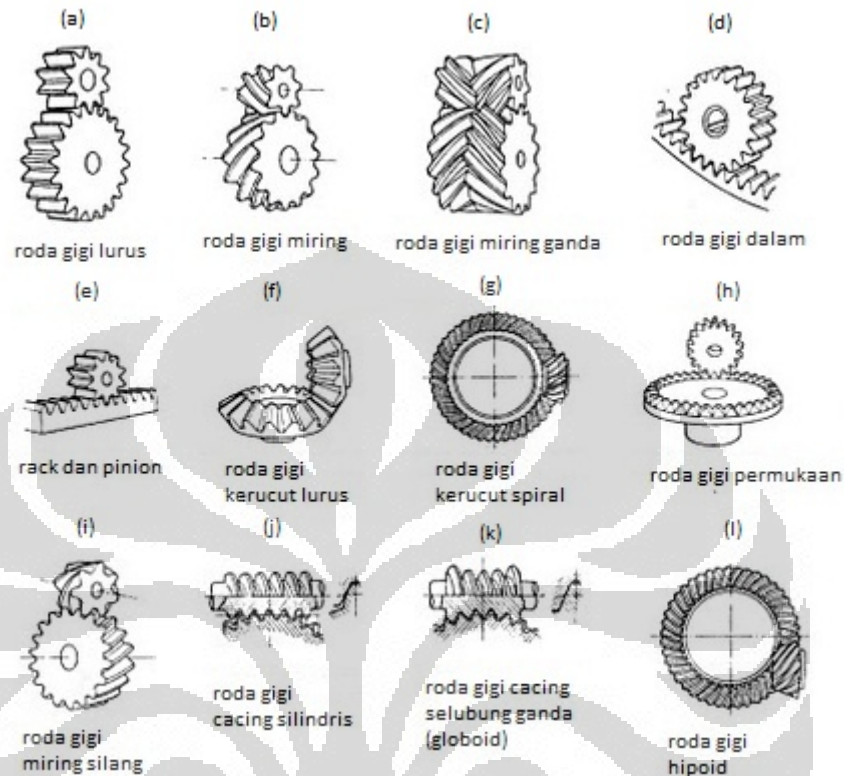
#### 3. Roda Gigi Cacing (*Worm Gear*)

Roda gigi ini meneruskan putaran dengan perbandingan reduksi yang besar, namun memiliki kapasitas beban yang rendah. Untuk beban yang besar roda gigi cacing dapat dipergunakan dengan perbandingan sudut kontak yang lebih besar. Roda gigi ini meliputi roda gigi cacing silindris, selubung ganda (globoid), roda gigi cacing samping. Kedua porosnya saling silang. Bentuk roda gigi ini dapat dilihat pada Gambar 2.20(j) dan Gambar 2.20(k).

#### 4. Roda Gigi Kerucut (*Bevel Gear*)

Roda gigi yang paling sering dipakai tetapi roda gigi ini sangat berisik dengan perbandingan kontak yang kecil, macam-macam roda gigi ini meliputi roda gigi kerucut lurus, spiral, miring, Zerol. Roda gigi ini sangat optimal ketika dihubungkan pada suatu mesin horizontal dengan rotor vertikal, seperti pada baling-baling

helikopter. Kedua porosnya berpotongan. Bentuk roda gigi ini dapat dilihat pada Gambar 2.20(f), 2.20(g), dan 2.20(k).



Gambar 2.20 Jenis-jenis roda gigi

## 2.5.2 Kelebihan dan Kelemahan dari Beberapa Jenis Roda Gigi

### 1. Roda gigi lurus (*Spur Gear*)

Kelebihan *spur gear* adalah *spur gear* merupakan roda gigi yang paling banyak ditemukan dan paling mudah untuk didisain dan dibuat. Selain itu, efisiensi *spur gear* lebih tinggi, tidak mudah rusak, dan harga yang cukup murah [18]. Namun, ada kekurangan pada *spur gear*, diantaranya adalah sangat bising saat digunakan pada beberapa kecepatan, kecepatannya tergolong rendah, hanya dapat memindahkan tenaga pada poros yang paralel, dan tidak dapat menahan beban yang besar, karena porosnya sejajar dengan gigi yang kecil [18].

## 2. Roda gigi miring (*Helical Gear*)

Kelebihan *helical gear* adalah tenaga yang dipindahkan lebih besar daripada *spur gear* dengan jumlah gigi yang sama dan dapat digunakan pada poros yang tidak paralel [19]. Kekurangannya adalah tingkat gesekan antargiginya cukup tinggi, sehingga membutuhkan pelumas [20].

## 3. Roda gigi cacing (*Worm Gear*)

Kelebihan *worm gear* adalah memiliki rasio yang tinggi, tidak dapat diputar dari bagian yang terputar, dan tidak perlu daya besar untuk menghasilkan torsi saat menahan beban yang berat. Kekurangannya adalah efisiensinya sangat rendah, tetapi dapat ditingkatkan dengan memberikan pelumas [21].

## 4. Roda gigi kerucut (*Bevel Gear*)

Kelebihan *bevel gear* adalah dapat mengubah sudut putar [22]. *Bevel gear* memiliki fleksibilitas yang baik, mudah untuk menaikkan tenaga yang dikeluarkan hanya dengan mengubah jumlah giginya, dapat dibuat dari bahan yang berbeda [23] *Bevel gear* tidak hanya memindahkan gaya dari arah yang satu ke yang lain, tetapi juga meningkatkan gaya yang dipindahkannya [23]. Kekurangannya adalah satu roda gigi dirancang berpasangan, harus presisi saat digunakan, dan garis sumbunya harus mampu menahan gaya yang dihasilkan [22].

### 2.6 Sensor Sudut Putar (*Rotation Sensor*)

Prinsip kerja sensor sudut putar (*rotation sensor*) mengambil prinsip kerja potensiometer. Pada saat sensor ini diputar maka nilai resistansi secara linear akan berubah. Pada umumnya menggunakan tegangan maksimum 5V agar sinyal keluaran dapat digunakan sebagai masukan analog pada mikrokontroler. Sensor akan memberikan nilai 0-5V dengan putaran 0-100%. Tegangan keluaran *rotation sensor* secara matematis dapat ditentukan pada Persamaan 2.3 [24].

$$V_{out} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times V_{in} \quad (2.3)$$



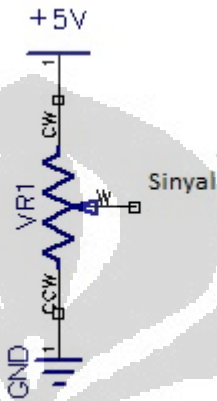
Keterangan:

$V_{out}$  : Tegangan keluaran dari potensiometer

$V_{in}$  : Tegangan yang diberikan pada potensiometer

$R_1$  : Nilai tahanan 1

$R_2$  : Nilai tahanan 2



Gambar 2.21 *Rotation Sensor*

## 2.7 ADC (*Analog to Digital Converter*)

ADC digunakan untuk mengubah sinyal masukan analog menjadi sinyal digital agar dapat diolah oleh mikrokontroler. Fitur dari ADC yang berada pada ATmega8535 adalah sebagai berikut [6]:

1. Resolusi 10 bit.
2. 0-VCC *range input* ADC.
3. Memiliki 8 *channel input* (Port A.0 – Port A.7).
4. Tiga mode pemilihan tegangan referensi.

Tabel 2.3 Pemilihan tegangan referensi pada ADC [6]

REFS1	REFS0	Voltage Reference Selection
0	0	AREF, Internal Vref turned off
0	1	AVCC with external capacitor at AREF pin
1	0	Reserved
1	1	Internal 2.56V Voltage reference with external capacitor at AREF pin

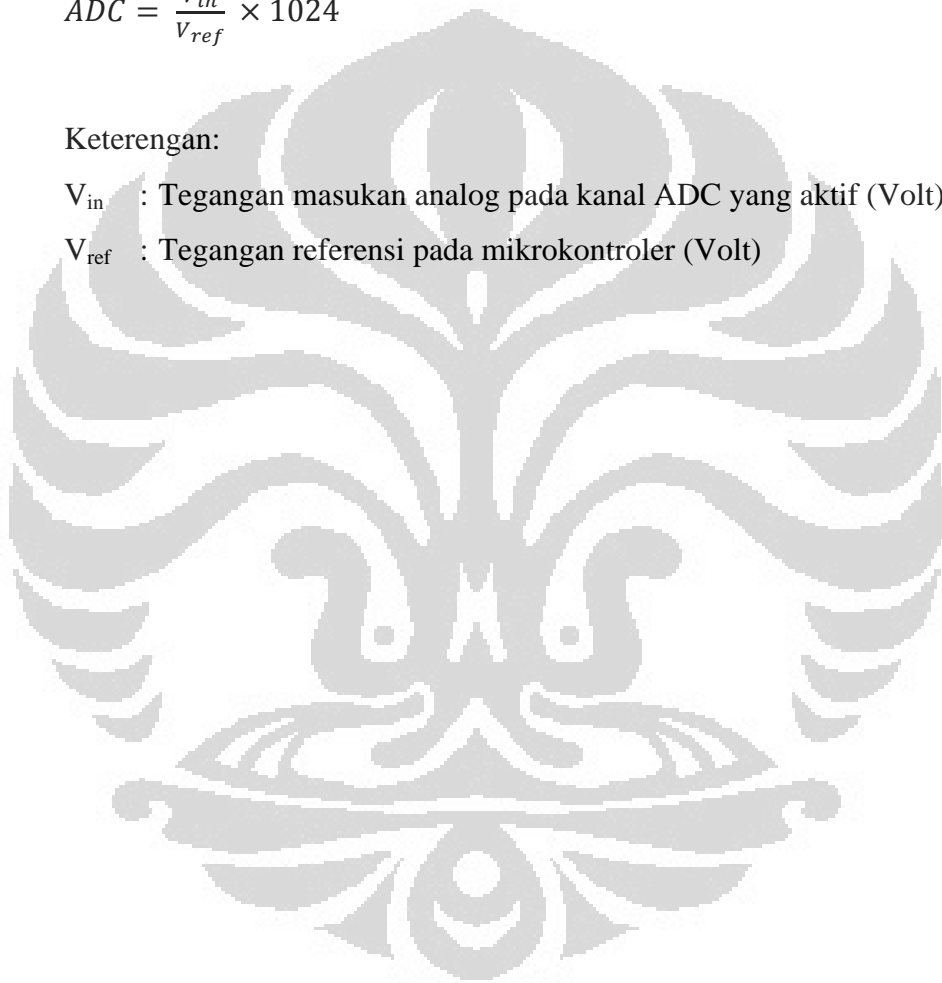
Untuk memperoleh nilai ADC, keluaran analog dapat dihubungkan pada PortA.0-A.7 mikrokontroler. Karena mikrokontroler ATmega8535 mengkonversi sinyal analog menjadi sinyal digital 10 bit, maka sinyal analog input 0-5V pada port mikrokontroler akan dikonversi menjadi biner 10 bit. Lalu, 10 bit itu ( $2^{10}$ ) akan diubah lagi menjadi desimal dengan nilai 1024. Nilai 1024 itu yang nantinya akan digunakan untuk mendapatkan nilai ADC, sesuai Persamaan 2.4 [6].

$$ADC = \frac{V_{in}}{V_{ref}} \times 1024 \quad (2.4)$$

Keterangan:

$V_{in}$  : Tegangan masukan analog pada kanal ADC yang aktif (Volt)

$V_{ref}$  : Tegangan referensi pada mikrokontroler (Volt)



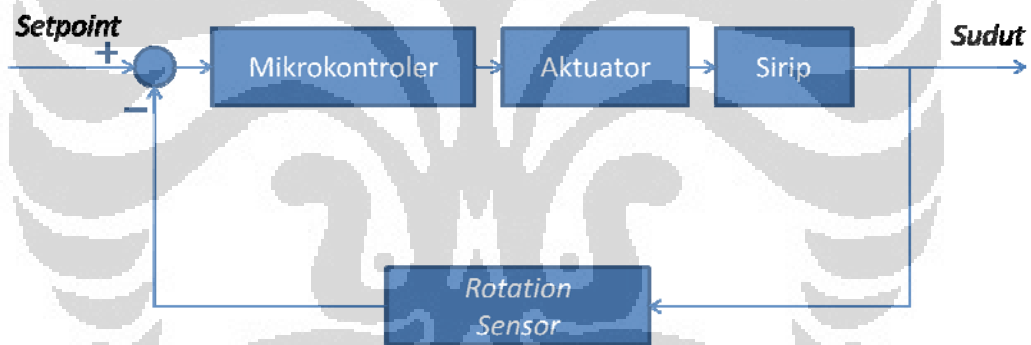
## BAB 3

### PERANCANGAN SISTEM KENDALI SIRIP

Bab ini membahas pembuatan alat pengendali sirip menggunakan brushless DC motor dengan mikrokontroler ATmega8535. Pembuatan sistem ini meliputi pembuatan perangkat keras dan pembuatan perangkat lunak. Sistem ini dibuat dalam beberapa blok dengan fungsi yang berbeda pada tiap bloknnya.

#### 3.1 Perancangan Kendali Sirip

Agar sistem dapat berjalan dengan baik, perlu dirancang suatu sistem dengan diagram alir maupun blok diagram yang akan berguna sebagai acuan untuk merancang sistem tersebut. Untuk perancangan kendali sirip, dapat dibuat blok diagram seperti pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Blok diagram kendali sirip

Komponen yang digunakan untuk mengendalikan sirip tersebut adalah:

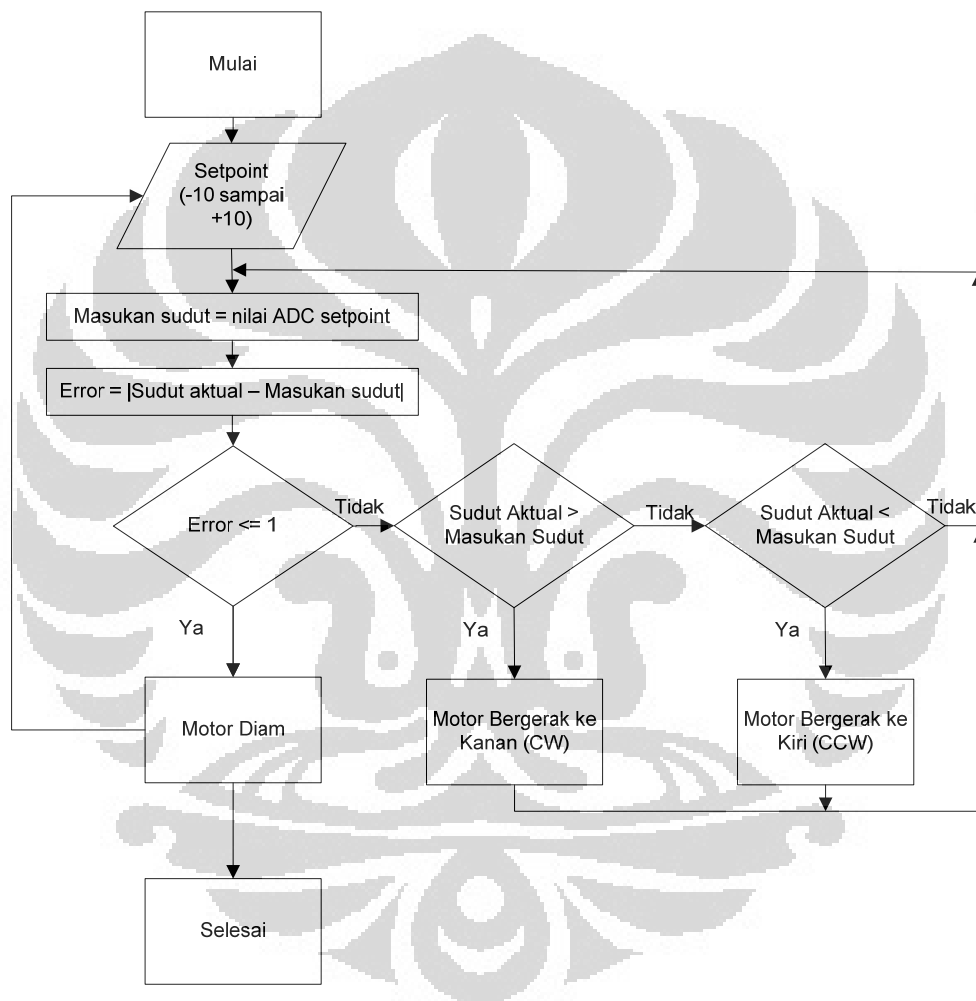
1. Mekanik sirip dan *pitch gauge*.
2. Mikrokontroler AVR ATmega8535 (menggunakan bahasa pemrograman basic dengan *software* BASCOM AVR).
3. Driver L293D dan driver mosfet untuk brushless DC motor.
4. Brushless DC motor Hyperion ZS2205-34.
5. Roda gigi (*gear*) dengan tipe *wormgear*.
6. Sensor sudut (*rotation sensor*).

Perancangan kendali sirip pada perangkat keras dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 3.2 Pengendali sirip (atas), pengukur simpangan sudut (tengah), dan aktuator sirip dengan penggerak brushless DC motor (bawah)

Sesuai blok diagram pada Gambar 3.1, dapat dibuat diagram alir untuk menjalankan sistem tersebut. Masukan diberikan pada salah satu port mikrokontroler dengan kombinasi tertentu untuk mendapatkan masukan -10 sampai 10. Diagram alir dapat dilihat pada Gambar 3.3. Motor akan berhenti jika telah mencapai sudut yang diinginkan dan akan berputar untuk memperkecil sudut aktualnya jika nilainya tidak sama dengan sudut yang diinginkan.

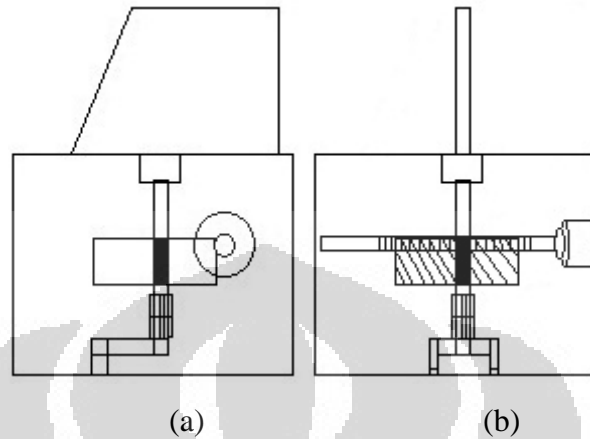


Gambar 3.3 Diagram alir sistem kendali sirip

### 3.2 Sirip

Desain bentuk sirip dapat dilihat pada Gambar 3.4. Bahan boks dan sirip berupa akrilik. Di dalam boks ada aktuator berupa brushless DC motor dengan menggunakan roda cacing (*worm gear*) sebagai perubah arah putaran. Sebagai

umpan balik digunakan sensor sudut putar (*rotation sensor*) pada roda gigi tersebut.



Gambar 3.4 Desain sirip, (a) tampak samping dan (b) tampak belakang

### 3.2.1 *Pitch Gauge*

*Pitch gauge* digunakan sebagai alat ukur sudut pada sirip dengan jarak antara  $-10^\circ$  sampai  $+10^\circ$ . Alat ini akan diletakkan pada sirip yang apabila sirip bergerak, maka alat ini pun akan bergerak dan menunjukkan besar simpangan yang terjadi.



Gambar 3.5 *Pitch gauge* dengan simpangan sudut  $-10^\circ$  sampai  $+10^\circ$

## 3.3 DI-Super Smart AVR

DI-Super Smart AVR merupakan sebuah modul elektronika berbasis mikrokontroler AVR dengan satu buah chip ATmega8535. Sistem minimum ini

dilengkapi modul *downloader* yang juga dapat berfungsi sebagai antarmuka dengan komputer melalui port USB. Modul ini dibangun dari dua modul, yaitu DI-Smart AVR System dan DI-USB AVR ISP V2. Modul ini dapat digunakan dengan chip AVR yang berbeda, seperti ATMega16 dan ATMega32. Untuk mengatur pergerakan dari sirip kendali digunakan modul DI-Super Smart AVR sebagai kontrolernya. Bentuk modul DI-Super Smart AVR dapat dilihat pada Gambar 3.6. Port yang digunakan adalah Port C sebagai keluaran, Port B sebagai masukan untuk menentukan besar sudut yang diinginkan, dan Port A sebagai masukan untuk sinyal analog.



Gambar 3.6 DI-Super Smart AVR ATmega8535

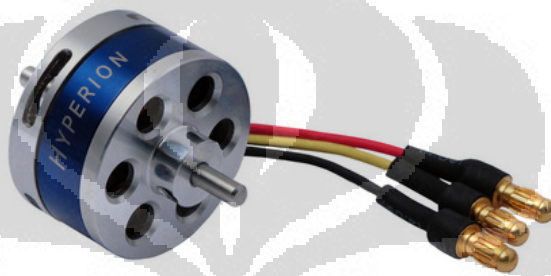
Pada sistem minimum di atas terdapat beberapa bagian pendukung *chip* AVR ATmega8535, diantaranya:

1. Trimpot sebagai pengatur tegangan pada  $A_{ref}$ , mengatur tegangan referensi pada ADC.
2. DI-USB AVR ISP V2 yang digunakan sebagai *downloader* dan antarmuka komunikasi serial dengan memindahkan posisi JP2.
3. Dapat diberikan sumber tegangan dari luar sebesar 9V atau 12V, karena sudah disediakan 7805 yang dapat menghasilkan keluaran sebesar 5V yang dibutuhkan oleh mikrokontroler. Lepas JP1 saat menggunakan sumber tegangan dari luar.
4. Pin pada masing-masing port untuk memudahkan dalam menghubungkan keluaran dengan perangkat lain.

5. Dua tombol untuk interupsi pada Port D.2 dan D.3.
6. 8 led pada keluaran Port C.

### 3.4 Aktuator Sirip

Untuk menggerakkan sirip digunakan motor brushless dengan tipe Hyperion ZS2205-34. Motor brushless ini termasuk *outer rotor design*, dengan 12 stator dan 14 magnet pada rotornya.



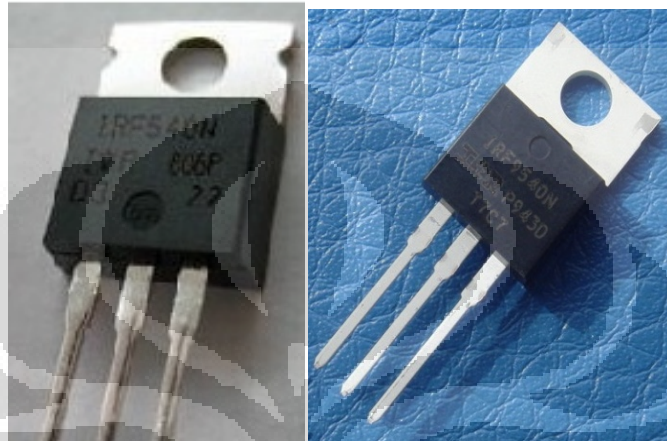
Gambar 3.7 Brushless DC motor Hyperion ZS2205-34

Tabel 3.1 Spesifikasi Hyperion ZS2205-34

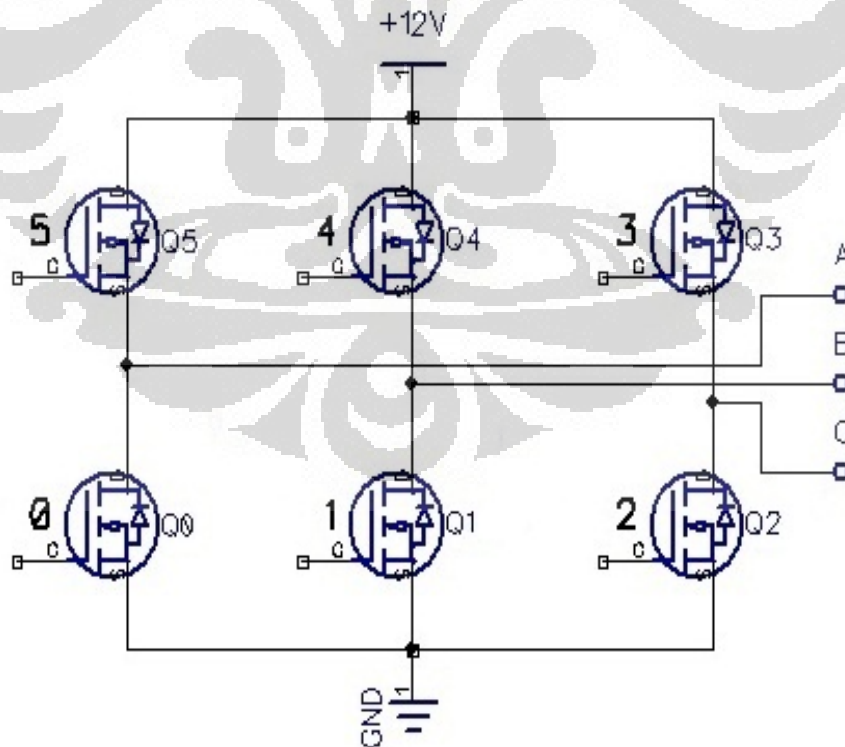
	ZS2205-34
<i>Weight</i>	32.6 g
<i>Winding</i>	34T
<i>Resistance</i>	0.164 Ohm
<i>IO (@10V)</i>	0.46 A
<i>KV</i>	1587 rpm/V
<i>Typical Current</i>	5A~10A
<i>Max. Current</i>	15A
<i>Max. Power</i>	115 Watts
<i>G3 LiPo Light</i>	CX 450
<i>G3 LiPo Duration</i>	CX 850
<i>Atlas ESC Suggested</i>	12A



Untuk menggerakkan brushless DC motor perlu 6 buah mosfet yang dirangkai seperti Gambar 3.9. Nomor 3, 4, dan 5 pada Gambar 3.9 menggunakan mosfet tipe-p dengan seri IRF9540N, sedangkan nomor 0, 1, dan 2 menggunakan mosfet tipe-n dengan seri IRF540N. Seluruh mosfet yang ada pada rangkaian tersebut bertugas sebagai saklar untuk memberikan sinyal *high* atau sinyal *low*.



Gambar 3.8 Mosfet tipe-n IRF540N (kiri) dan mosfet tipe-p IRF9540N (kanan)



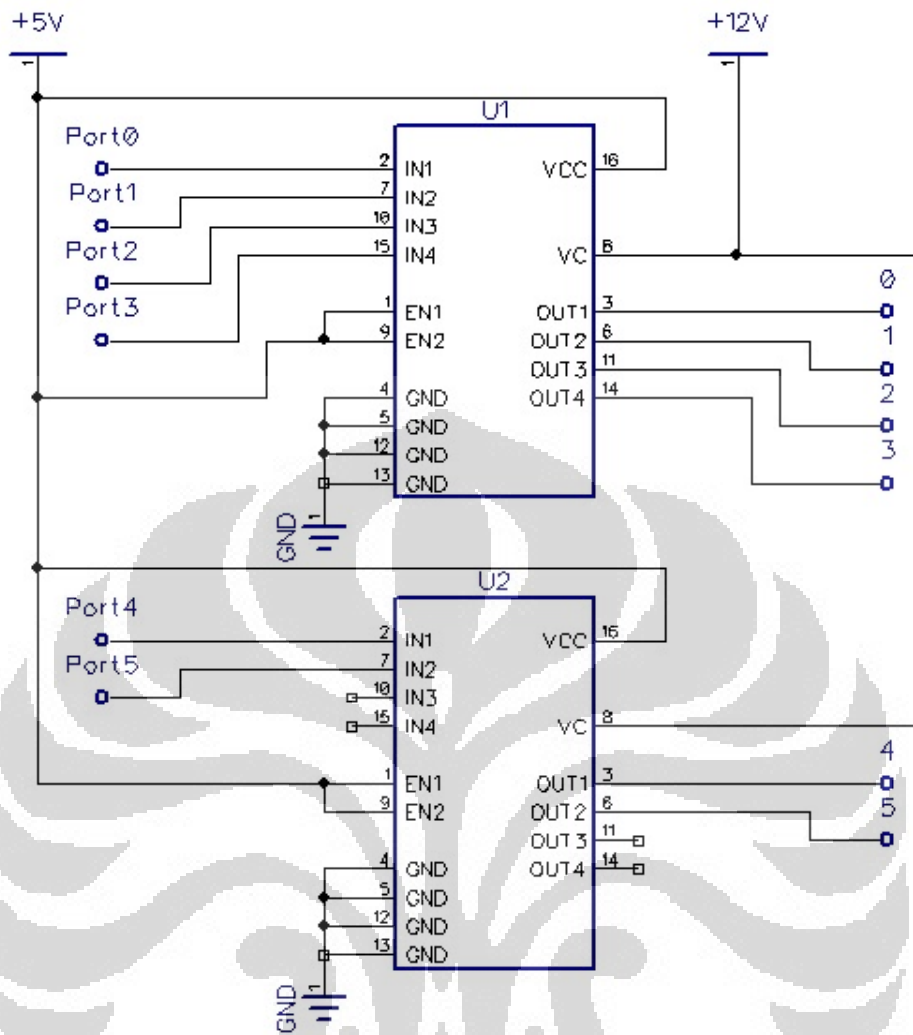
Gambar 3.9 Skema rangkaian driver brushless DC motor dengan 6 buah mosfet (3 mosfet tipe-p dan 3 mosfet tipe-n)

Dengan fungsi sebagai saklar, maka Gambar 3.9 dapat dianggap sebagai saklar terbuka dan akan tertutup jika *gatenya* dikendalikan. Pada saat saklar 3, 4, dan 5 tertutup, maka tegangan sebesar sumber atau sinyal *high* akan mengalir ke motor, sedangkan saat saklar 0, 1, dan 2 tertutup, maka sinyal *low* akan mengalir ke motor.

Pemberian sinyal pada brushless DC motor dilakukan berurutan dari step pertama hingga step keenam secara kontinyu untuk membuatnya berputar. Untuk membalikkan arah putarannya, cukup dengan membalikkan urutan stepnya, yaitu dimulai dari step keenam menuju step pertama secara kontinyu.

Agar tegangan yang mengalir pada mosfet optimal atau sesuai dengan tegangan sumber, maka gate mosfet diberikan tegangan 12V sebagai logika '1'. Karena keluaran dari mikrokontroler hanya 5V, maka dibutuhkan driver tambahan untuk mengubah logika '1' yang 5V menjadi 12V. Dengan menggunakan driver L293D yang berupa gerbang buffer, jika diberikan logika '1' yang berasal dari mikrokontroler pada masukan L293D, maka hasil keluaran L293D akan sama dengan tegangan masukan yang diberikan ( $V_c$ ).

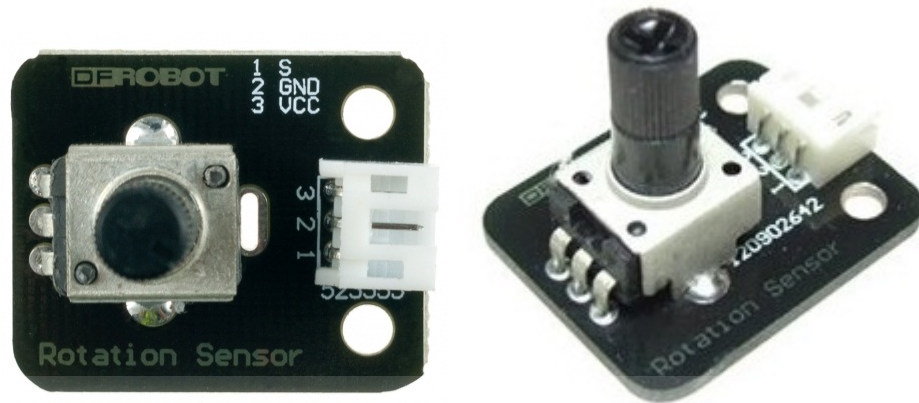
Karena L293D hanya memiliki 4 buah gerbang, maka dibutuhkan 2 buah L293D untuk memberikan 6 keluaran yang berbeda ke driver mosfet. Skema rangkaian L293D dapat dilihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Skema rangkaian L293D

### 3.5 Umpan Balik pada Pergerakan Sirip

Sensor untuk mengukur besarnya simpangan sudut yang terjadi akibat pergerakan sirip menggunakan DFRobot yang dapat diputar hingga  $300^\circ$ . Prinsip kerja DFRobot sama dengan potensiometer, yaitu nilai resistansinya akan berubah secara linear jika diputar.



Gambar 3.11 *Rotation sensor*, tampak atas (kiri) dan tampak samping (kanan)

Gambar di atas merupakan komponen untuk mengukur besarnya sudut yang terjadi dengan spesifikasi:

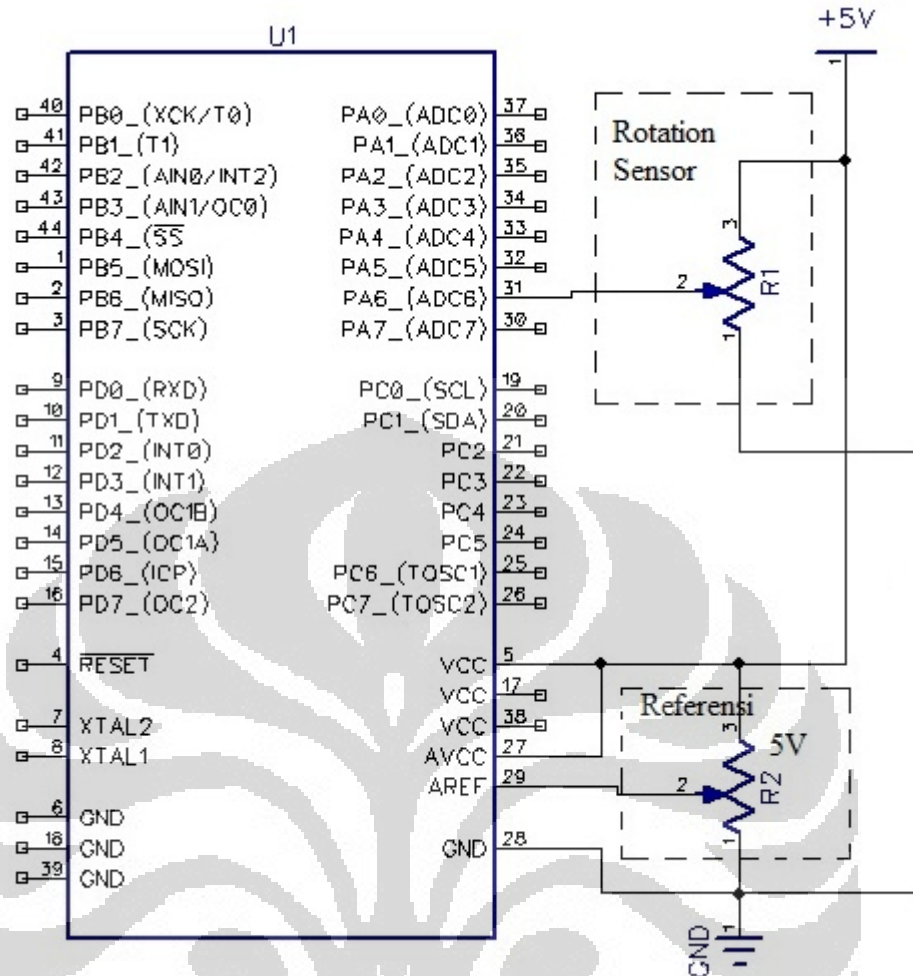
1. Tipe antarmuka analog.
2. Sudut putar 300°.

Konfigurasi pin:

1. Sinyal output.
2. GND.
3. VCC +5V.

$A_{ref}$  pada modul mikrokontroler diatur dalam posisi maksimum atau 5V. Apabila tegangan referensi diatur 5V, maka skala pembagian 10 bit yang dikonversikan pada ADC akan sama besar, karena tegangan pada *rotation sensor* pun diberikan sebesar 5V, sehingga perputaran pada *rotation sensor* sebesar 1° akan menghasilkan data yang berbeda dalam jarak antara -10° sampai 10°.

Skema rangkaian *rotation sensor* untuk masukan ADC dapat dilihat pada Gambar 3.12.

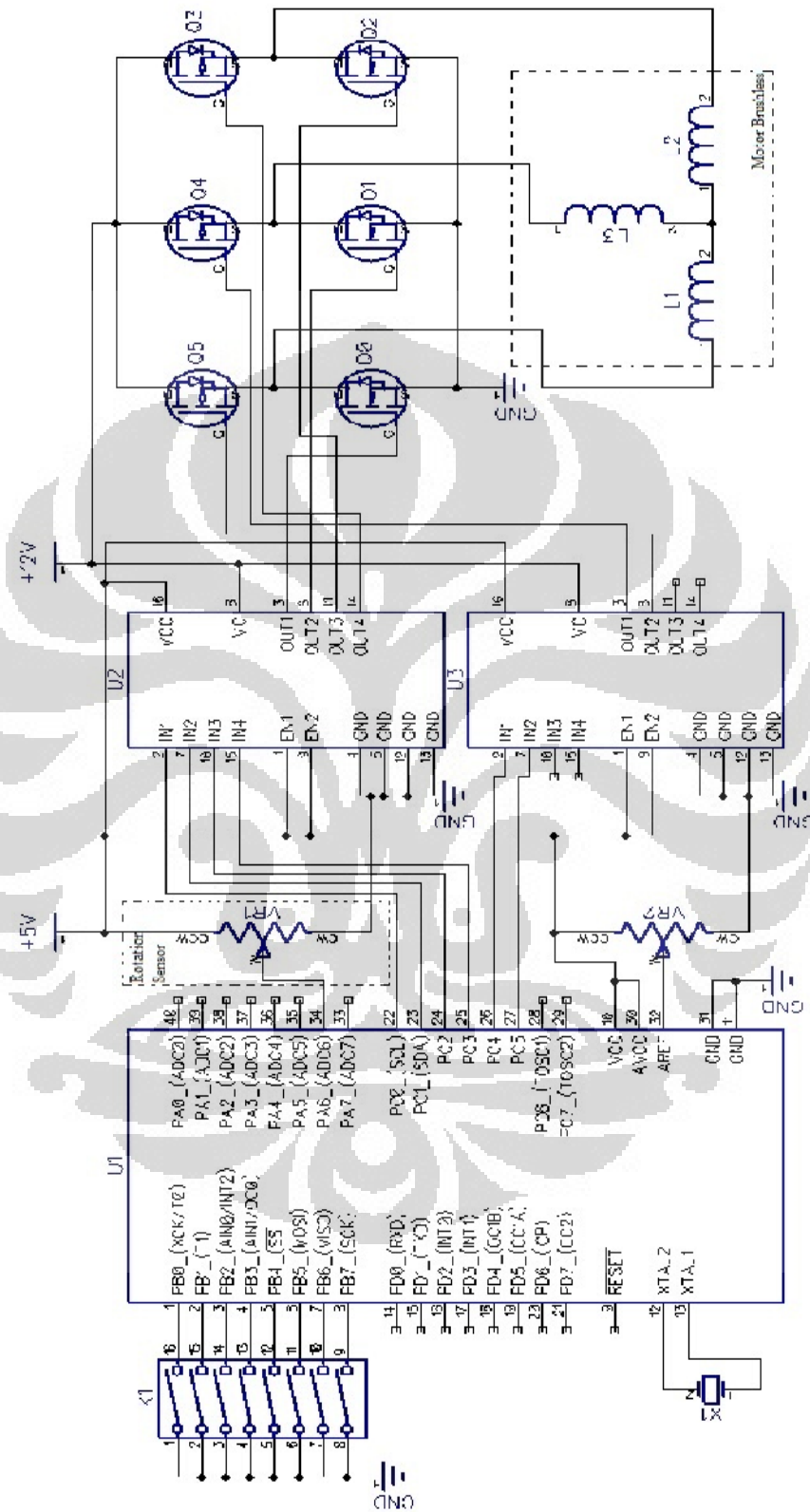


Gambar 3.12 *Rotation sensor* dihubungkan ke mikrokontroler sebagai masukan ADC di Port A

### 3.6 Roda Cacing

Roda gigi yang digunakan untuk mengubah arah gerakan dengan menggunakan roda cacing yang ada dipasaran. Roda cacing memiliki dua bagian, yaitu bagian yang berputar dan bagian yang terputar. Bagian yang berputar melekat pada brushless DC motor dengan panjang total  $\pm 6$  cm, jarak *pitch*  $\pm 25$  mm, dan jarak yang berhubungan dengan bagian yang terputar  $\pm 1$  cm. Bagian yang terputar merupakan roda gigi cacing dengan jumlah mata sebanyak 75 buah dan diameter sebesar  $\pm 5,5$  cm. Satu putaran roda cacing mampu menghasilkan 90 kali putaran roda gigi cacing, sehingga rasio yang didapat sebesar 1:90.

Skema Rangkaian



Gambar 3.13 Skema rangkaian penggerak sirip

## BAB 4

### PENGUJIAN DAN ANALISIS HASIL

Bab ini membahas mengenai hasil pengujian terhadap kendali sirip tanpa pembebanan, hanya menentukan posisi sudut sesuai dengan *setpoint* yang diberikan. Sirip tidak hanya digunakan pada kendali roket saja. Pergerakan sirip dengan sudut tertentu dapat juga diaplikasikan pada kapal laut, pesawat terbang, ataupun pada alat transportasi darat. Jika sirip diaplikasikan pada pengendalian roket, maka pergerakan sirip tidak lebih dari  $10^\circ$ , karena pergerakan  $1^\circ$  sudah dapat mengubah arah roket dan jika lebih dari  $10^\circ$ , roket dapat berbelok, sedangkan roket tidak dirancang untuk berbelok karena target tidak bergerak.

Pergerakan sudut sirip diatur menggunakan brushless DC motor. *Delay six-step* diatur untuk menggerakkan brushless DC motor. Semakin kecil *delay* yang diberikan pada *six-step*, maka putarannya pun akan semakin cepat.

Proses pengujian yang pertama menjalankan brushless DC motor dengan sistem *open loop*, untuk memastikan brushless DC motor dapat bergerak *clockwise* dan *counterclockwise*. Kedua, jika sudah dapat bergerak *clockwise* dan *counterclockwise*, diberikan umpan balik menggunakan *rotation sensor* untuk mendapatkan pergerakan sudut yang sesuai dengan *setpoint* yang diberikan.

#### 4.1 Alat Ukur yang Digunakan

Pada kendali sirip menggunakan tiga alat ukur yang digunakan. Pertama, untuk mengukur tegangan dengan menggunakan multimeter digital HELES UX37.



Gambar 4.1 Heles UX-37

Kedua, untuk mendapatkan nilai yang telah dikonversikan oleh mikrokontroler dari umpan balik *rotation sensor* menggunakan aplikasi *hyperterminal*, yang berkomunikasi secara serial dengan komputer, maka dapat diperoleh nilai yang dicetak (*print*) dalam program mikrokontroler ke dalam *hyperterminal*.



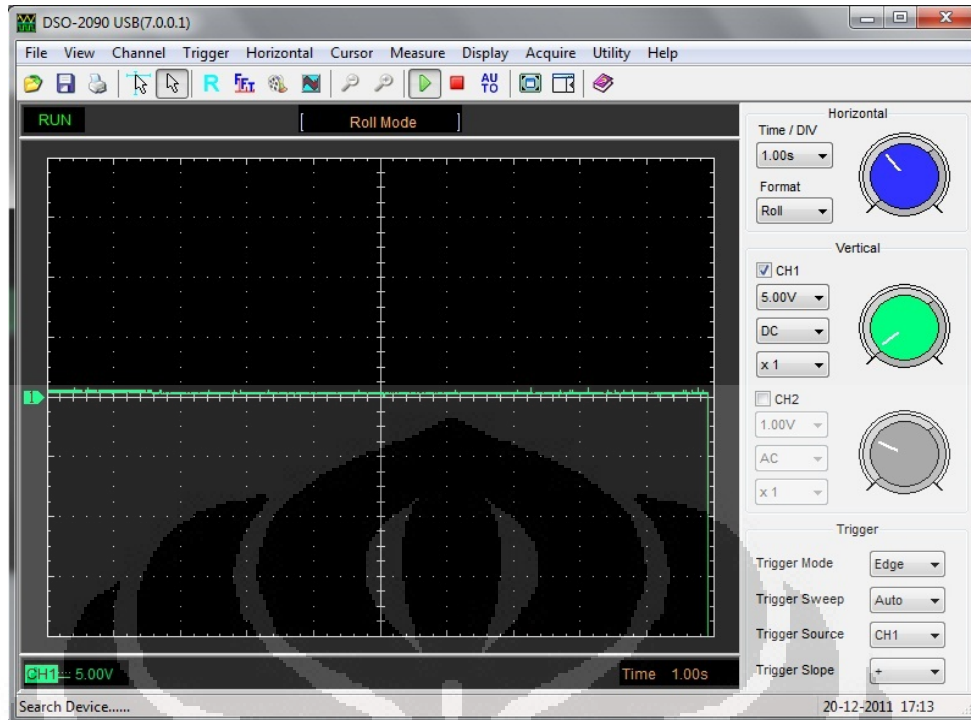
Gambar 4.2 Tampilan *hyperterminal*

Ketiga, dengan menggunakan oscilloscope portable yang terhubung dengan port USB komputer, untuk mendapatkan sinyal dari keluaran driver mosfet.



Gambar 4.3 Oscilloscope portable DSO-2090 USB

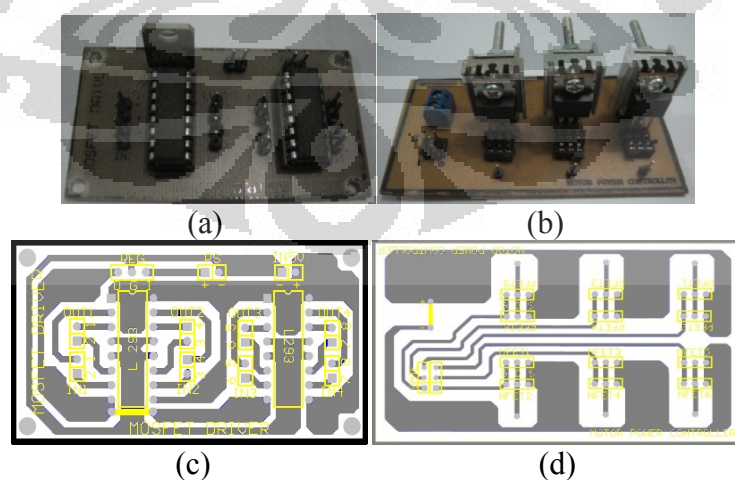




Gambar 4.4 Tampilan *software* dari masukan oscilloscope portable DSO-2090 USB

#### 4.2 Kerja Brushless DC Motor

Pembuatan driver mosfet dan L293D sesuai skema yang telah dirancang (Gambar 3.9 dan Gambar 3.10) pada sebuah PCB, dengan hasil seperti Gambar 4.5 di bawah ini.



Gambar 4.5 (a) Driver L293D, (b) Driver mosfet, (c) *Layout* PCB driver L293D, dan (d) *Layout* PCB driver mosfet

Selanjutnya, seluruh komponen disatukan dan dites untuk menjalankan brushless DC motor sesuai blok diagram pada Gambar 4.6. Dengan menggunakan mosfet sebagai saklar dan kendali *six-step* seperti pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2, maka dibuatlah program pada BASCOM AVR yang nantinya akan *download* ke mikrokontroler untuk menghasilkan keluaran *six-step*.



Gambar 4.6 Blok diagram *open loop* aktuator sirip

Pada tahap pertama dilakukan seperti pada blok diagram Gambar 4.6, kemudian, inisialisasi Port C pada mikrokontroler sebagai keluaran (Config Portc = Output), lalu *download* program di bawah ini dengan *speed* = 200 (*delay six-step* sebesar 200 ms).

Pemrograman diawali dengan menyesuaikan data pada modul mikrokontroler. \$regfile = "m8535.dat" untuk inisialisasi IC mikrokontroler yang digunakan dan \$crystal = 11059200 untuk inisialisasi kristal yang digunakan pada IC mikrokontroler.

Motor brushless berputar searah jarum jam (*clockwise*).

```

Do
Portc = &B00_110_010
Waitms Speed
Portc = &B00_110_001
Waitms Speed
Portc = &B00_101_001
Waitms Speed
Portc = &B00_101_100
Waitms Speed
Portc = &B00_011_100
Waitms Speed
Portc = &B00_011_010
Waitms Speed
Loop
End
  
```

Motor brushless berputar berlawanan arah jarum jam (*counterclockwise*).

```

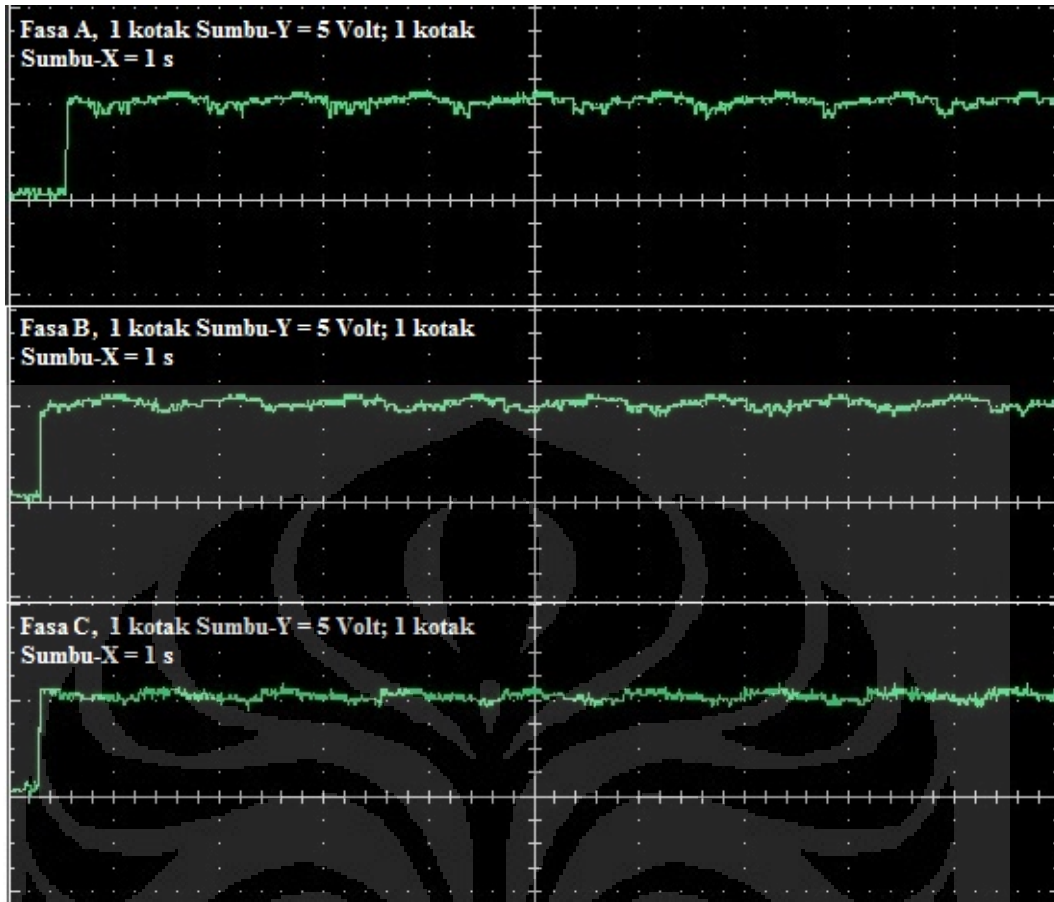
Do
Portc = &B00_011_010
Waitms Speed
Portc = &B00_011_100
Waitms Speed
Portc = &B00_101_100
Waitms Speed
Portc = &B00_101_001
Waitms Speed
Portc = &B00_110_001
Waitms Speed
Portc = &B00_110_010
Waitms Speed
Loop
End

```

Tabel 4.1 Posisi on/off mosfet untuk *clockwise* brushless DC motor

Mosfet Tipe-p			Mosfet Tipe-n			Fasa A	Fasa B	Fasa C
A+	B+	C+	C-	B-	A-			
Q5	Q4	Q3	Q2	Q1	Q0			
Off	off	ON	off	ON	off	OFF	Lo	Hi
Off	off	ON	off	off	ON	Lo	OFF	Hi
Off	ON	off	off	off	ON	Lo	Hi	OFF
Off	ON	off	ON	off	off	OFF	Hi	Lo
ON	off	off	ON	off	off	Hi	OFF	Lo
ON	off	off	off	ON	off	Hi	Lo	OFF

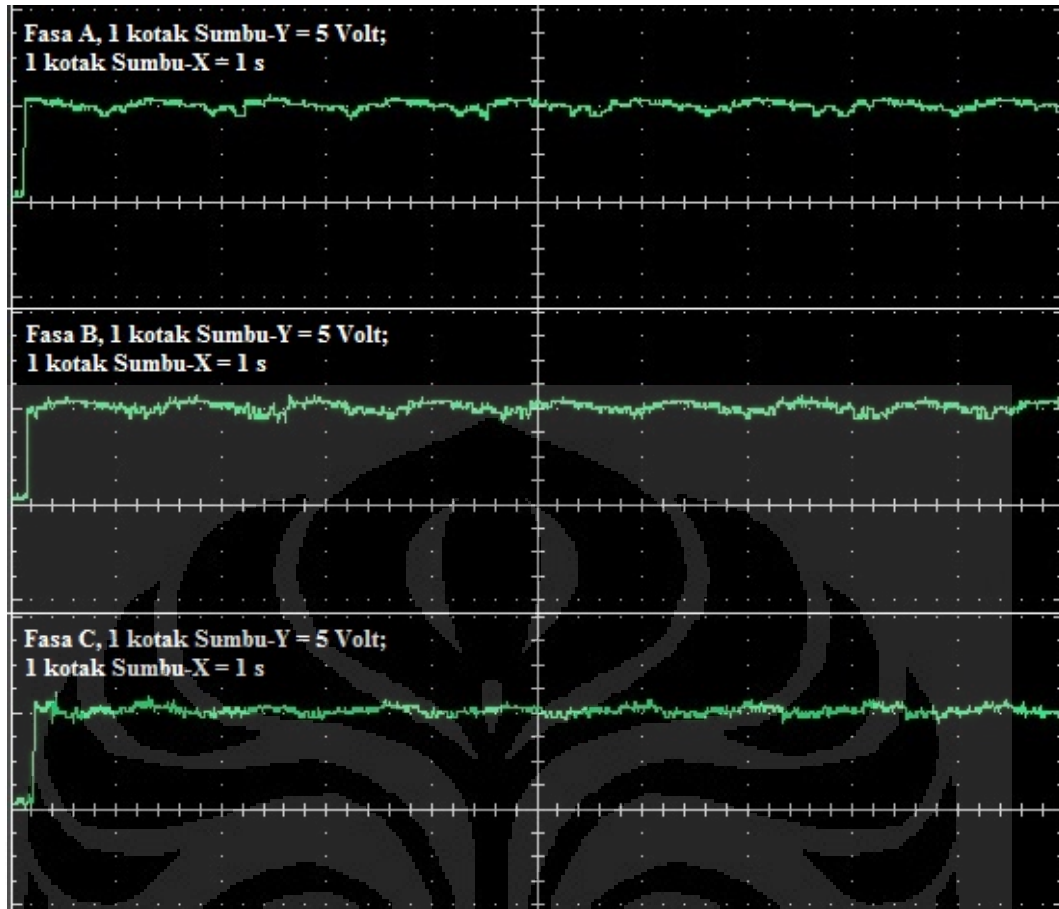
Proses pengukuran dengan oscilloscope diatur AUTO pada *softwarena*, kemudian diukur pada tiap-tiap fasa. Hasil yang didapat dari oscilloscope tersebut pada tiap fasa dapat dilihat pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8.



Gambar 4.7 Gelombang yang dihasilkan oleh driver mosfet pada tiap fasa untuk menjalankan brushless DC motor (*clockwise*)

Tabel 4.2 Posisi on/off mosfet untuk *counterclockwise* brushless DC motor

Mosfet Tipe-p			Mosfet Tipe-n			Fasa A	Fasa B	Fasa C
A+	B+	C+	C-	B-	A-			
Q5	Q4	Q3	Q2	Q1	Q0			
ON	off	off	off	ON	Off	Hi	Lo	OFF
ON	off	off	ON	off	Off	Hi	OFF	Lo
Off	ON	off	ON	off	Off	OFF	Hi	Lo
Off	ON	off	off	off	ON	Lo	Hi	OFF
off	off	ON	off	off	ON	Lo	OFF	Hi
off	off	ON	off	ON	Off	OFF	Lo	Hi



Gambar 4.8 Gelombang yang dihasilkan oleh driver mosfet pada tiap fasa untuk menjalankan brushless DC motor (*counterclockwise*)

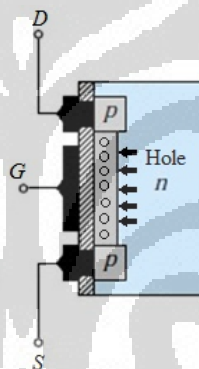
Berdasarkan hasil pengujian, dalam 1 putaran brushless DC motor ini bergerak sebanyak 42 kali, sehingga motor brushless ini membutuhkan 7 kali proses *six-step*. Untuk mengetahui besar sudut putar yang dihasilkan dalam setiap stepnya, digunakan perhitungan sebagai berikut,  $\frac{360}{42} = 8,57$ . Hasil yang sama didapat dengan menggunakan Persamaan 2.1 dan 2.2 dengan banyaknya magnet pada rotor adalah 14 dan fasa yang diberikan adalah 3 fasa, maka akan didapat besarnya sudut dalam satu step gerakan motor brushless.

$$SA = \frac{360}{14 \times 3} = 8,57$$

#### 4.2.1 Keadaan Aktif Mosfet Tipe-p dan Mosfet Tipe-n

Mosfet tipe-p aktif jika diberikan logika '0' pada gate-nya. Hal ini dikarenakan *hole* yang berada pada *channel* merupakan substrat berbahan semikonduktor tipe-n bergerak ke arah gate. Namun, karena dibatasi oleh silikon dioksida, maka *hole* akan terperangkap selama pemberian logika '0' terjadi dan akan menjadi penghubung antara source dengan drain (lihat Gambar 4.9).

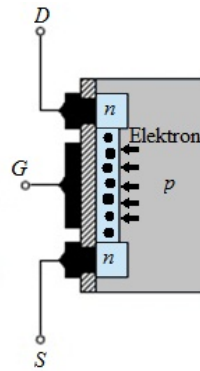
Jika source pada mosfet tersebut diberikan sinyal *high* (12V), maka dapat mengalir dengan baik menuju drain. Oleh karena itu, dalam rangkaian, mosfet tipe-p ini bertugas untuk memberikan sinyal *high* pada brushless DC motor.



Gambar 4.9 Pergerakan *hole* pada mosfet tipe-p

Untuk mosfet tipe-n, dengan prinsip kerja yang sama, elektron akan tertarik jika gate-nya diberikan logika '1'. Lalu, akan terperangkap dan menjadi penghubung antara source dengan drain (lihat Gambar 4.10).

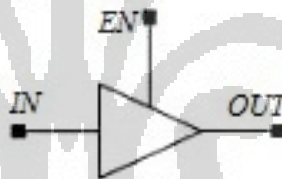
Source akan diberikan sinyal *low*, sehingga saat mosfet tipe-n aktif, sinyal *low* (0V) akan mengalir dari source ke drain lalu menuju ke motor brushless. Dengan urutan pemberian sinyal sesuai dengan Tabel 4.1 dan Tabel 4.2 dihasilkan keluaran berupa gelombang sinusoidal pada masing-masing drain dengan sudut fasa yang berbeda.



Gambar 4.10 Pergerakan elektron pada mosfet tipe-n

#### 4.2.2 Driver L293D sebagai Gerbang Buffer yang Meneruskan Sinyal dari Keluaran Mikrokontroler untuk Mengaktifkan Mosfet

Gerbang buffer terdiri dari tiga pin, yaitu masukan, keluaran, dan *enable*. Hasil dari pengukuran yang dilakukan dapat dilihat pada Tabel 4.3 dengan tegangan sumber sebesar 11,27 V.



Gambar 4.11 Gerbang buffer tiga pin

Tabel 4.3 Hasil Pengukuran Masukan dan Keluaran L293D

Logika Masukan L293D	<i>Enable</i>	Tegangan Masukan (Volt)	Tegangan Keluaran (Volt)
0	1	0,04	0,11
1	1	4,41	9,96

#### 4.3 Umpan Balik yang Diberikan oleh *Rotation Sensor* ke Mikrokontroler Menggunakan ADC

Nilai resistansi pada *rotation sensor* akan berubah sampai 49 k $\Omega$  (dari hasil pengukuran) pada nilai maksimum. Untuk mengendalikan motor brushless agar putarannya dapat mencapai sudut yang diinginkan, dapat ditentukan dari perubahan tiap sudutnya sebagai parameter yang nantinya akan digunakan sebagai umpan balik dan dengan blok diagram sesuai pada Gambar 3.1.

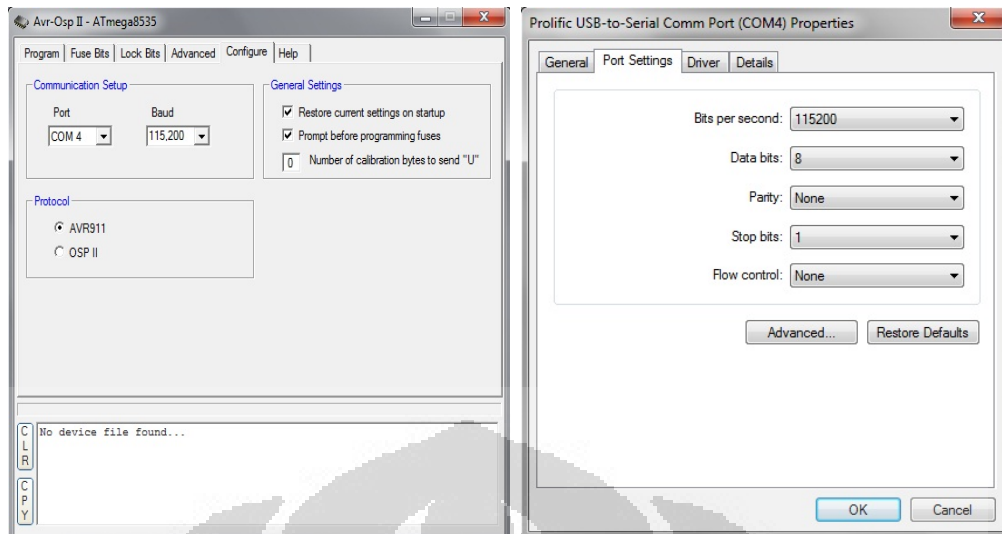
Sebelumnya, untuk mendapatkan nilai pada mikrokontroler perlu ada konfigurasi pada programnya. Konfigurasi beserta programnya dapat dilihat pada program di bawah ini.

```
$baud = 115200
Config ADC = Single , Prescaler = Auto
Start ADC
Rotation = GetaDC(6)
Print "Channel 6 " ; "Value " ; Rotation
```

Keluaran dari *rotation sensor* dihubungkan ke Port A.6 untuk kemudian dikonversi menjadi nilai digital. Untuk melihat nilai yang didapat atau dihasilkan oleh mikrokontroler, dapat menggunakan program *hyperterminal* yang telah disediakan oleh *windows*. Mikrokontroler dihubungkan dengan komputer melalui port USB dan antarmuka secara serial. Port komunikasi dan *baudrate* yang digunakan pada mikrokontroler disamakan pada *hyperterminal*.

*Baudrate* telah diatur di program dengan nilai 115200, sehingga konfigurasi dilakukan pada komputer dengan menggunakan COM4 dan *baudrate* 115200 bits per second (Gambar 4.12b). Kemudian disamakan konfigurasi tersebut dengan aplikasi *downloader AVR-OspII* yang digunakan untuk mendownload program yang telah dituliskan pada BASCOM AVR (Gambar 4.12a).



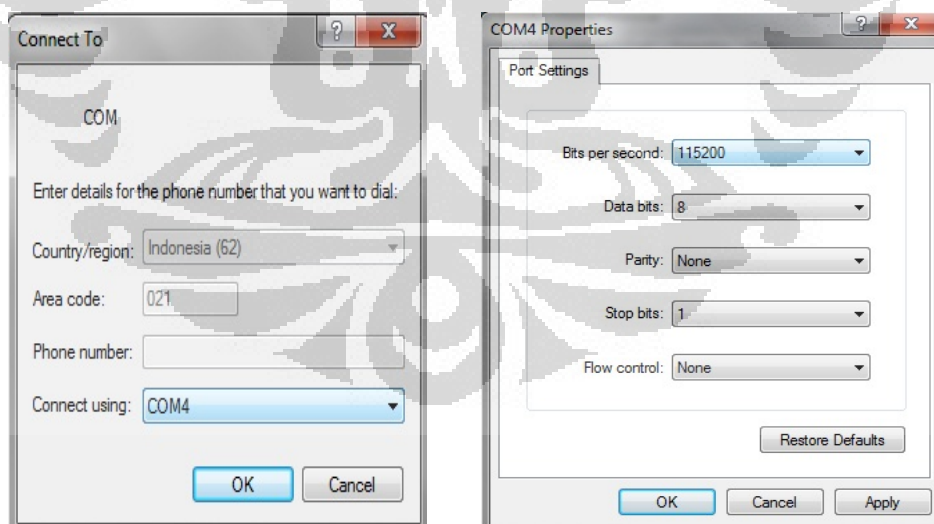


(a)

(b)

Gambar 4.12 Konfigurasi (a) pada AVR-OspII dan (b) pada komputer

Pada *hyperterminal*, konfigurasi dilakukan seperti pada Gambar 4.13, dengan *baudrate* yang sama yaitu 115200 bits per second. Atur port komunikasi yang digunakan, dalam hal ini menggunakan COM4 (gambar 4.13a). Lalu, atur *baudrate* seperti pada gambar 4.13b.

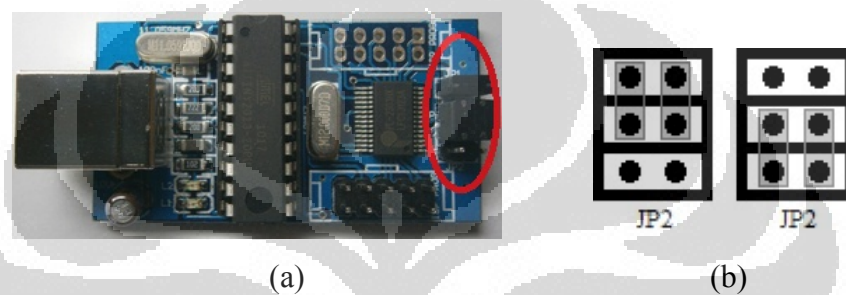


(a)

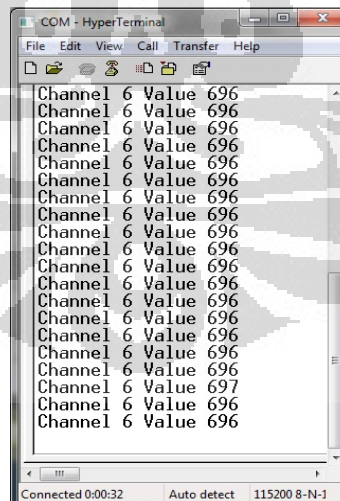
(b)

Gambar 4.13 Konfigurasi pada *hyperterminal*, (a) port komunikasi yang digunakan dan (b) *baudrate* yang digunakan

Setelah seluruh konfigurasi diatur, kemudian pindahkan *jumper* JP2 pada mikrokontroler ke posisi komunikasi serial (Gambar 4.14), maka dapat terhubung antara port komunikasi pada komputer dengan mikrokontroler melalui *hyperterminal*. Hasil yang didapat pada *hyperterminal* dapat dilihat pada Gambar 4.15. Dari gambar tersebut didapat nilai yang telah dikonversikan oleh mikrokontroler pada sudut tertentu. Untuk tiap perubahan sudut, *rotation sensor* menghasilkan nilai dengan toleransi pada tiap perubahannya sebesar  $\pm 1$ , hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.4.



Gambar 4.14 (a) DI-USB AVR ISP V2, JP1 dan JP2 dilingkari merah, (b) posisi *jumper* untuk mendownload program (kiri) dan posisi *jumper* untuk komunikasi serial (kanan)



Gambar 4.15 Tampilan hasil nilai ADC mikrokontroler pada Port A *channel* 6

Tabel 4.4 Nilai yang dihasilkan pada mikrokontroler tiap pergerakan 1°

Sudut	Tegangan Input ADC (Volt)	Nilai pada Mikrokontroler	Hasil Perhitungan (Volt)
10°	2,99	646	3,00
9°	3,02	651	3,02
8°	3,03	656	3,04
7°	3,06	661	3,07
6°	3,08	666	3,09
5°	3,11	671	3,11
4°	3,14	676	3,14
3°	3,16	681	3,16
2°	3,18	686	3,18
1°	3,20	691	3,21
0°	3,22	696	3,23
-1°	3,25	701	3,25
-2°	3,27	706	3,27
-3°	3,29	710	3,29
-4°	3,31	716	3,32
-5°	3,34	720	3,34
-6°	3,37	726	3,37
-7°	3,39	731	3,39
-8°	3,41	736	3,41
-9°	3,43	741	3,44
-10°	3,45	746	3,46

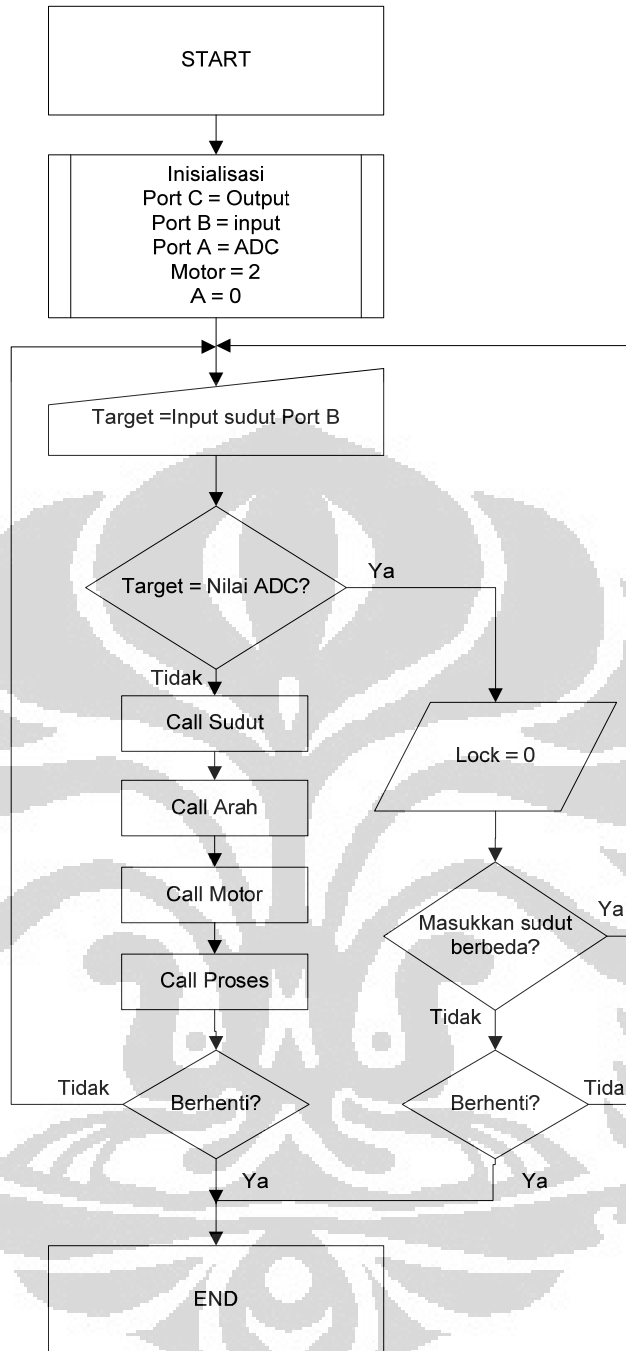
Dengan menggunakan rumus pada Persamaan 2.4, maka akan didapat nilai dengan perhitungan sebagai berikut:

$V_{ref} = 4,75$  V, sudut 0° dengan nilai ADC sebesar 696

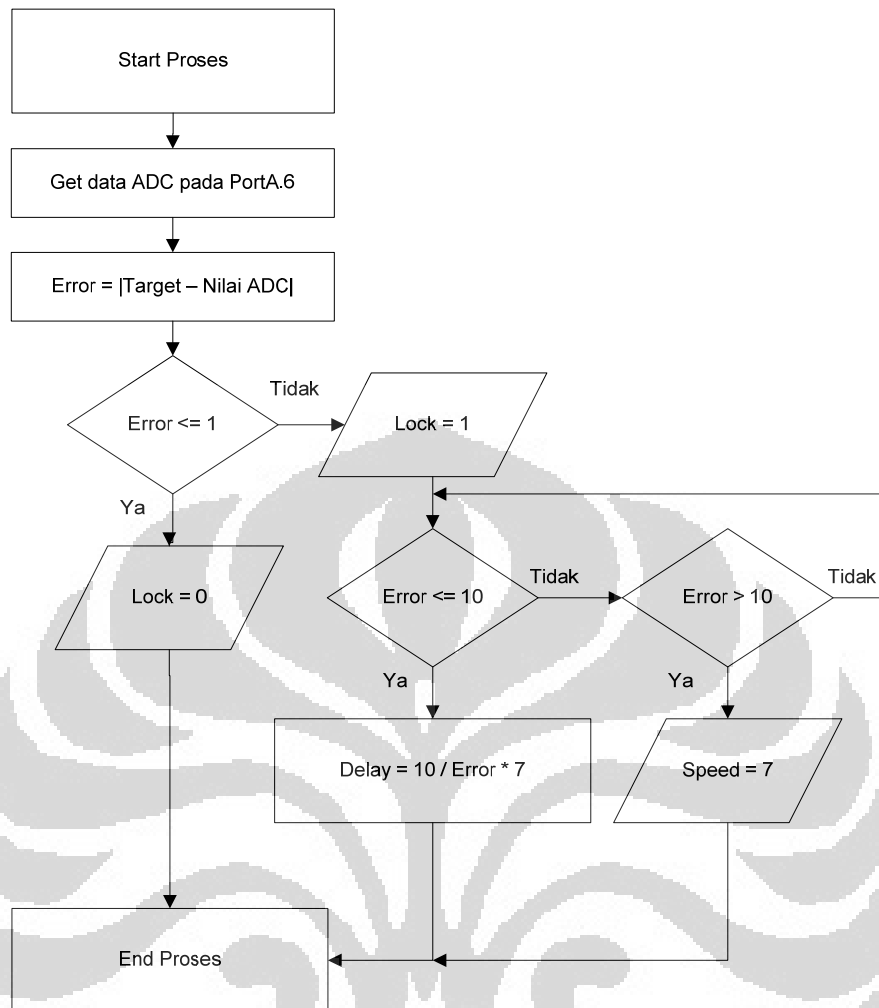
$$ADC = \frac{V_{in}}{V_{ref}} \times 1024; 696 = \frac{V_{in}}{4,75} \times 1024; V_{in} = 3,23$$

#### 4.4 Diagram Alir pada Pemrograman Sistem Pergerakan Sirip

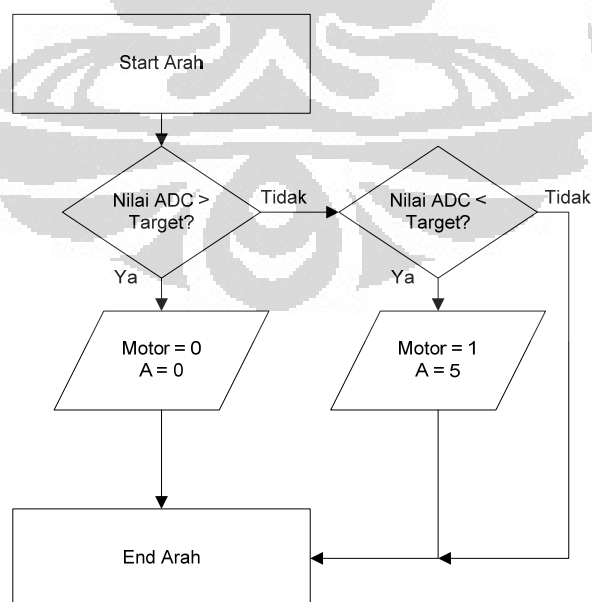
Pada proses pemrograman, mikrokontroler yang menggunakan bahasa basic dibuat diagram alir yang mengacu pada Gambar 3.3, sehingga dapat diperoleh diagram alir pemrograman seperti pada gambar di bawah ini.



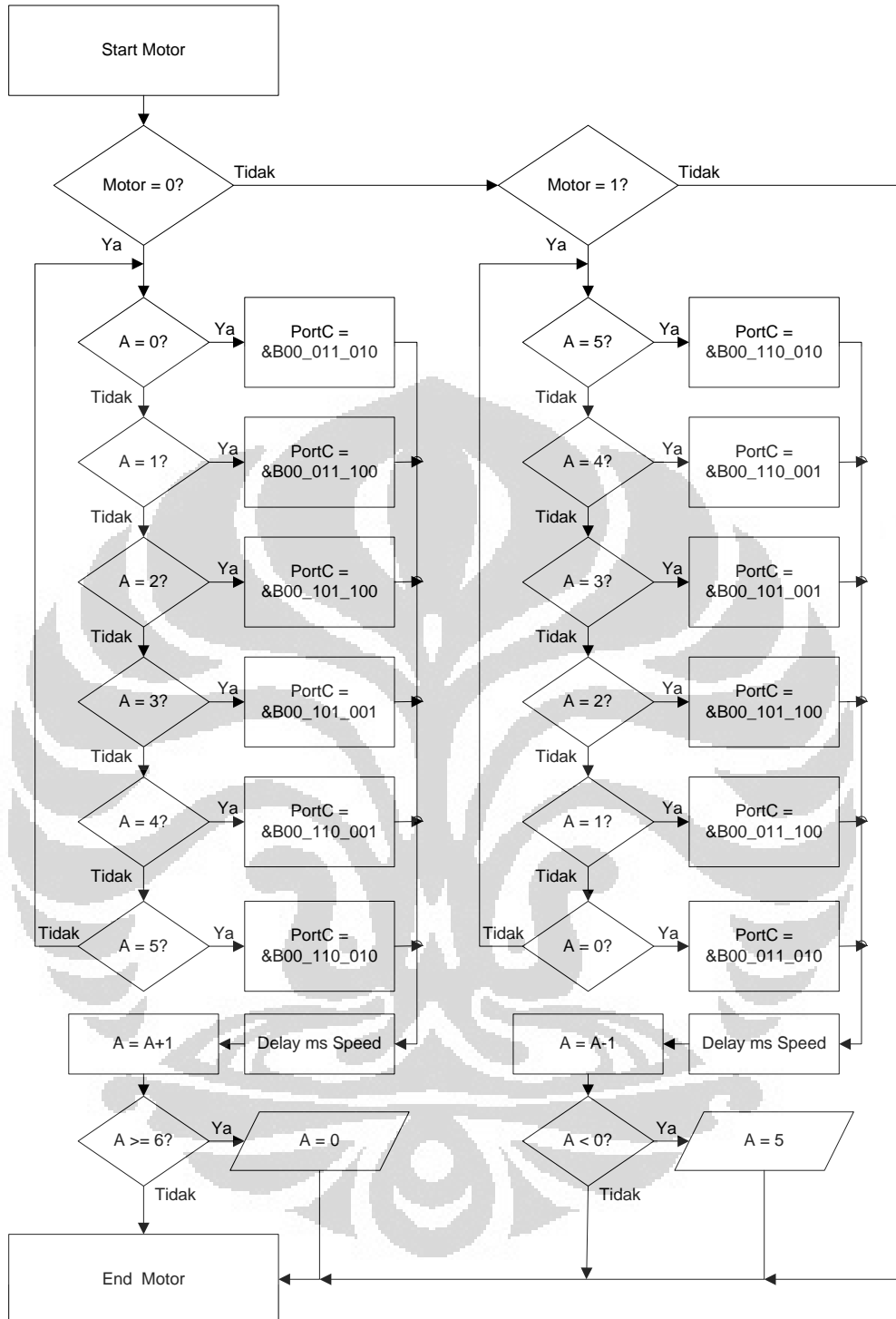
Gambar 4.16 Diagram alir 1



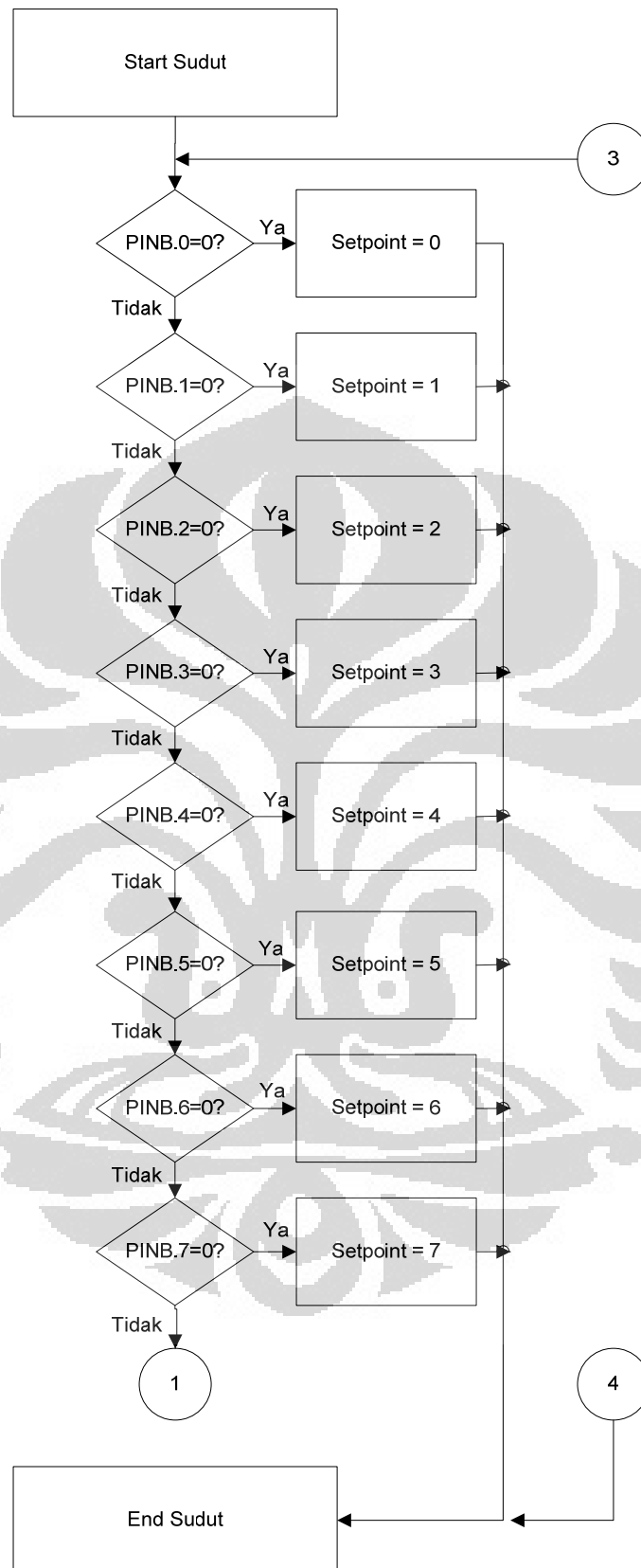
Gambar 4.17 Diagram alir 2



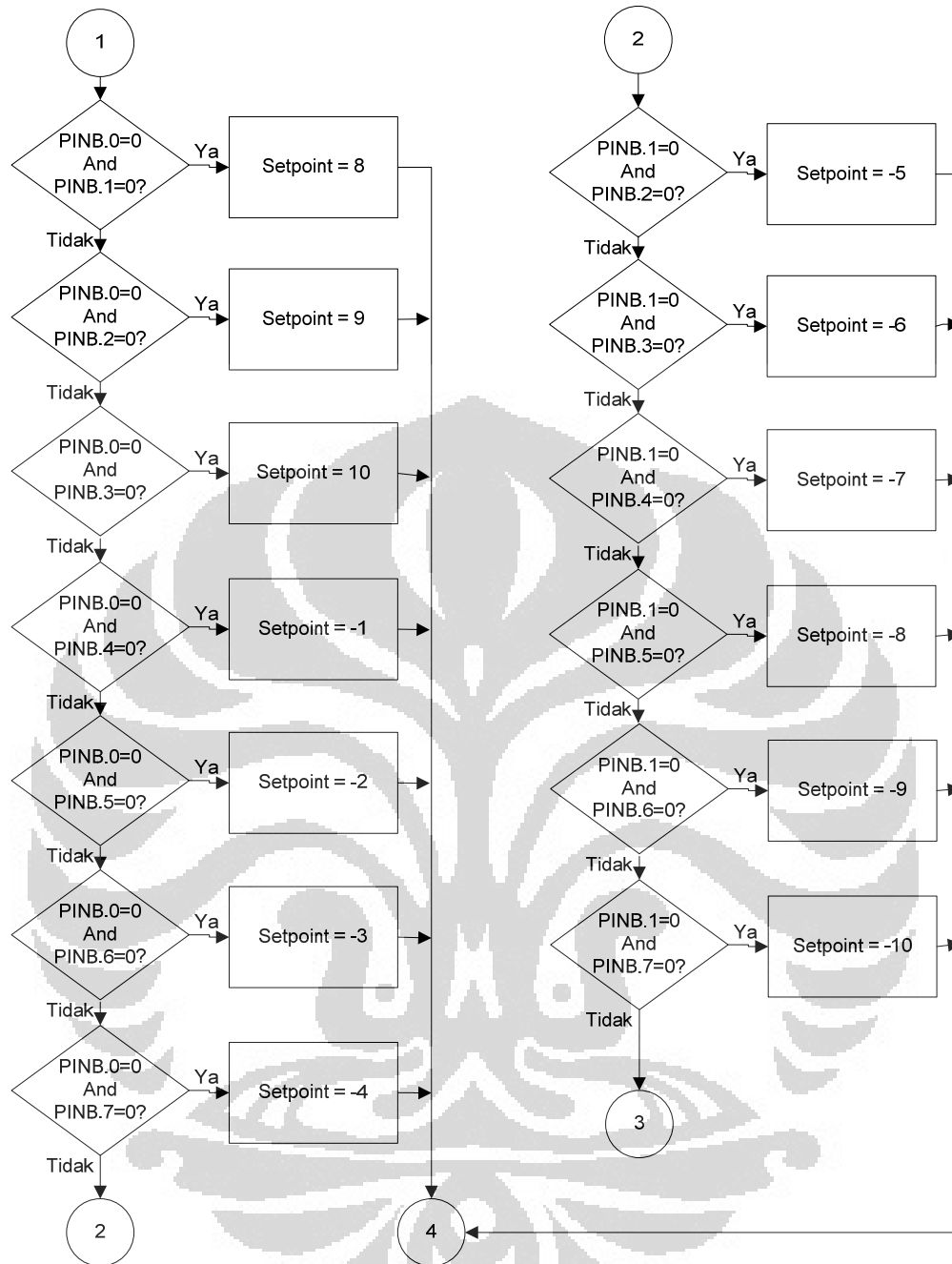
Gambar 4.18 Diagram alir 3



Gambar 4.19 Diagram alir 4



Gambar 4.20. Diagram alir 5a.



Gambar 4.21. Diagram alir 5b.

#### 4.5 Pemrograman

Berdasarkan diagram alir pada Subbab 4.4, maka dapat dilakukan pemrograman untuk mengendalikan sirip. Pemrograman dibuat dengan satu program utama yang berisi pemberian nilai *setpoint* sudut dan 4 subprogram



untuk memudahkan analisis jika terjadi kesalahan pada jalannya sistem. Keempat subprogram itu adalah:

1. Subprogram untuk menentukan sudut yang ingin dicapai.
2. Subprogram untuk menjalankan brushless DC motor.
3. Subprogram untuk proses perhitungan.
4. Subprogram untuk menentukan arah putaran brushless DC motor.

#### 4.5.1 *Setpoint* Sudut dengan Masukan dari Kombinasi Port B

Port B digunakan sebagai masukan *setpoint* sudut. Port B.0-B.7 diatur untuk memberikan nilai *setpoint* -10 sampai 10 dengan maksud -10 adalah  $-10^\circ$  dan 10 adalah  $+10^\circ$ . Port B diberikan sinyal *low* sebagai masukan. Di bawah ini merupakan kombinasi pemberian sinyal *low* pada Port B sebagai *setpoint* sudut.

1. Pinb.0 = 0, *Setpoint* = 0.
2. Pinb.1 = 0, *Setpoint* = 1.
3. Pinb.2 = 0, *Setpoint* = 2.
4. Pinb.3 = 0, *Setpoint* = 3.
5. Pinb.4 = 0, *Setpoint* = 4.
6. Pinb.5 = 0, *Setpoint* = 5.
7. Pinb.6 = 0, *Setpoint* = 6.
8. Pinb.7 = 0, *Setpoint* = 7.
9. Pinb.0 = 0 dan Pinb.1 = 0, *Setpoint* = 8.
10. Pinb.0 = 0 dan Pinb.2 = 0, *Setpoint* = 9.
11. Pinb.0 = 0 dan Pinb.3 = 0, *Setpoint* = 10.
12. Pinb.0 = 0 dan Pinb.4 = 0, *Setpoint* = -1.
13. Pinb.0 = 0 dan Pinb.5 = 0, *Setpoint* = -2.
14. Pinb.0 = 0 dan Pinb.6 = 0, *Setpoint* = -3.
15. Pinb.0 = 0 dan Pinb.7 = 0, *Setpoint* = -4.
16. Pinb.1 = 0 dan Pinb.2 = 0, *Setpoint* = -5.
17. Pinb.1 = 0 dan Pinb.3 = 0, *Setpoint* = -6.
18. Pinb.1 = 0 dan Pinb.4 = 0, *Setpoint* = -7.
19. Pinb.1 = 0 dan Pinb.5 = 0, *Setpoint* = -8.

20. Pinb.1 = 0 dan Pinb.6 = 0, *Setpoint* = -9.
21. Pinb.1 = 0 dan Pinb.7 = 0, *Setpoint* = -10.

#### 4.5.2 Pemrograman pada Pemberian Sinyal Brushless DC Motor

Pemrograman pertama kali dilakukan dengan pemberian *six-step* secara berurutan dan kontinyu dengan mengatur *delay* pada *six-step* sebagai pengatur cepat atau lambatnya putaran brushless DC motor. Permasalahan yang timbul jika menggunakan program seperti itu adalah harus menunggu keenam urutan tersebut selesai baru dapat melanjutkan program selanjutnya. Jika nilai *error* yang dihasilkan telah mencapai data yang diinginkan, pergerakan brushless DC motor akibat umpan balik tidak dapat diproses oleh program.

Program diubah menjadi enam bagian. Setelah urutan pertama selesai dijalankan, program tidak akan langsung membaca program pada urutan kedua, tetapi membaca nilai *error* terlebih dahulu kemudian melanjutkan ke urutan berikutnya. Brushless DC motor dapat berhenti atau berputar ke arah yang berlawanan tanpa harus menunggu proses *six-step* selesai dijalankan.

Program pada urutan pemberian sinyal brushless DC motor menggunakan instruksi pada BASCOM AVR seperti di bawah ini.

```
For A = ... To ... Step ...
...
Next
```

Program akan berjalan dengan memberikan nilai awal dan nilai akhir dengan perubahan step yang diberikan, dan akan terus berjalan sampai nilai akhir tercapai, lalu melanjutkan program selanjutnya.

#### *Counterclockwise*

```
For A = 0 To 5 Step 1
  If A = 0 Then
    Portc = &B00_011_010
  End If
  If A = 1 Then
    Portc = &B00_011_100
```

```

End If
If A = 2 Then
Portc = &B00_101_100
End If
If A = 3 Then
Portc = &B00_101_001
End If
If A = 4 Then
Portc = &B00_110_001
End If
If A = 5 Then
Portc = &B00_110_010
End If
Waitms Speed
Call Proses
Next

```

*Clockwise*

```

For A = 5 To 0 Step -1
If A = 5 Then
Portc = &B00_110_010
End If
If A = 4 Then
Portc = &B00_110_001
End If
If A = 3 Then
Portc = &B00_101_001
End If
If A = 2 Then
Portc = &B00_101_100
End If
If A = 1 Then
Portc = &B00_011_100
End If
If A = 0 Then
Portc = &B00_011_010
End If
Waitms Speed
Call Proses
Next

```

#### 4.5.3 Perhitungan Nilai *Error* dari Umpan Balik untuk Mengatur Brushless DC Motor

Proses perhitungan merupakan pengambilan nilai ADC yang akan dibandingkan dengan *setpoint* yang diinginkan, disebut *error*. Nilai *error* digunakan sebagai parameter untuk menentukan besar kecilnya *delay* yang diberikan untuk mengatur kecepatan brushless DC motor.

$$error = target - rotation \quad (4.1)$$

Keterangan:

Error : Selisih nilai ADC dengan *setpoint*

Target : Nilai *setpoint* ADC

Rotation : Nilai aktual ADC

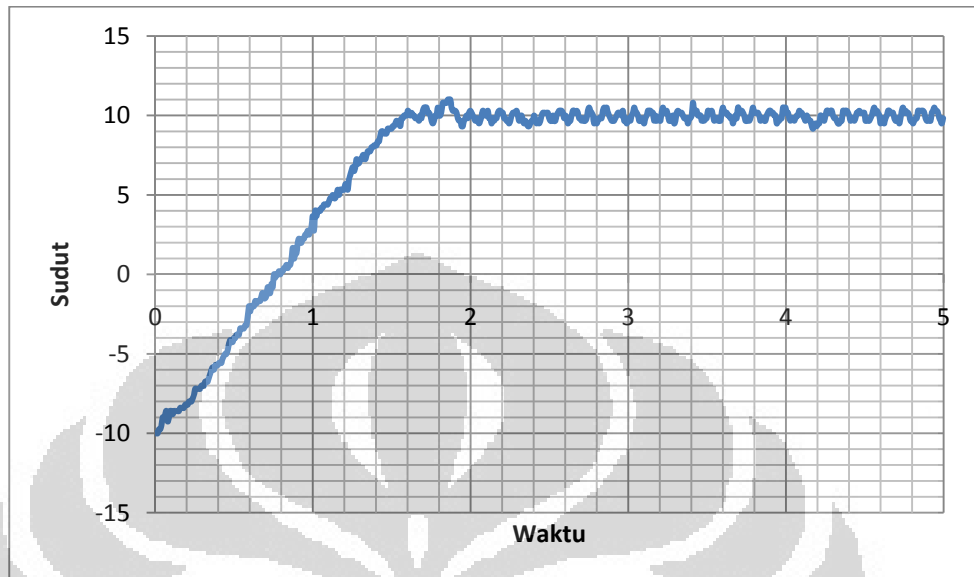
Semakin jauh simpangan sudut sirip dari nilai *setpoint* yang ditentukan, maka nilai *error* akan semakin besar. Putaran motor akan dipercepat dengan memasukkan nilai *error* tersebut ke perhitungan untuk menentukan *delay* pada tiap step brushless DC motor.

Data dari nilai ADC diambil melalui *hyperterminal* kemudian diolah pada *microsoft excel* untuk mendapatkan hasil seperti Gambar 4.22. Gambar tersebut merupakan respon yang didapat pada *setpoint* 10°, dengan nilai ADC pada 10° adalah 646. Brushless DC motor bergerak dari posisi -10° dengan nilai ADC 746 menuju *setpoint*. *Delay* yang diberikan adalah konstan dengan nilai 7 ms tiap urutan *six-step*.

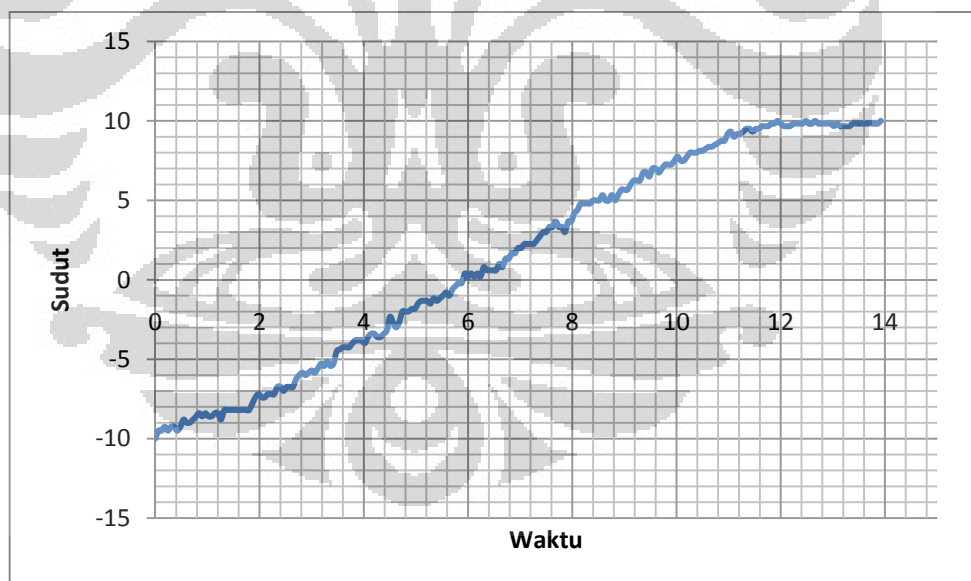
Pemberian *delay* pada *six-step* lebih kecil dari 7 ms dapat membuat brushless DC motor tidak bergerak sesuai dengan urutan stepnya, sehingga tidak dapat membuatnya berputar. Hal tersebut terjadi karena, keluaran dari driver 3 fasa dengan metode *six-step* yang terlalu cepat, membuat magnet pada rotor tidak dapat menerima gelombang 3 fasa dengan baik dan hanya membuat brushless DC motor tersebut hanya bergetar.

Pada Gambar 4.22 nilai akhirnya terus beresilasi, karena hanya menggunakan nilai *error* = 0 untuk menghentikan jalannya motor yang relatif cepat dengan perubahan tiap step sebesar 7 ms. Oleh karena itu,

digunakan perbandingan terbalik untuk mengatur lebar pulsa yang diberikan serta mendapatkan kecepatan yang semakin lambat saat menuju *setpoint*.



Gambar 4.22 Pergerakan brushless DC motor dari posisi  $-10^{\circ}$  menuju  $10^{\circ}$  dengan *delay* 7 ms



Gambar 4.23 Respon dari  $-10^{\circ}$  menuju  $10^{\circ}$  semakin mendekati *setpoint*, *delay* semakin lambat

Gambar 4.23 didapat menggunakan nilai interval terjauh dari -10 menuju 10, yaitu sebesar 100 ke dalam perhitungan. Karena nilai yang diberikan dari *rotation sensor* adalah  $\pm 1$  yang terbaca dalam keadaan diam,

maka proses dihentikan bila telah mencapai nilai *error* kurang dari sama dengan 1, sehingga tidak menyebabkan osilasi, seperti pada Gambar 4.22.

$$delay = \frac{100}{error} \times 7 \quad (4.2)$$

Keterangan:

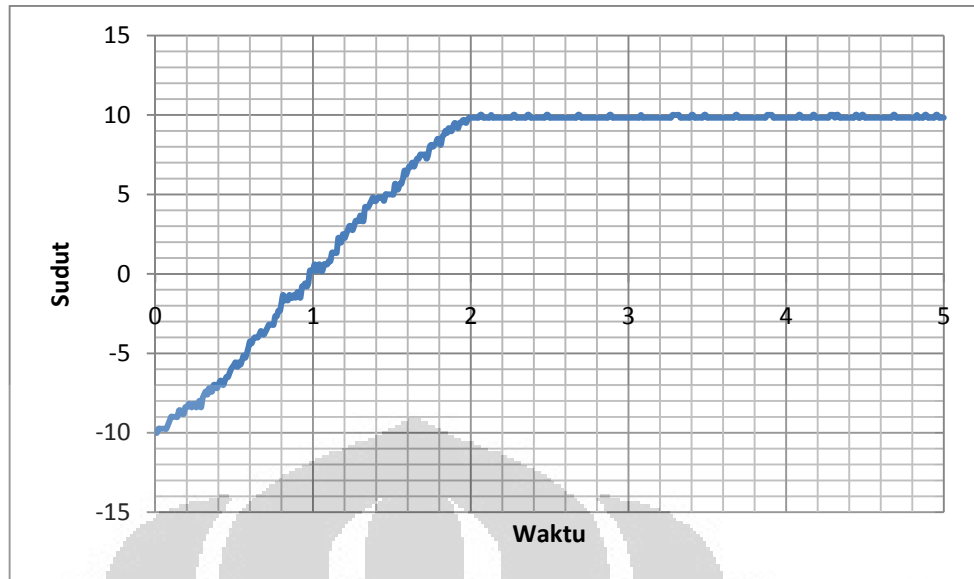
*Delay* : *delay* yang diberikan antara urutan sinyal (ms)

*Error* : Selisih nilai ADC dengan *setpoint*

Perhitungan tersebut dimasukkan ke dalam bahasa pemrograman, sehingga hasilnya seperti Gambar 4.23. Namun, membutuhkan repon yang lama, sekitar 12 detik untuk mencapai sudut  $10^\circ$  dari posisi  $-10^\circ$ . Oleh sebab itu, nilai 100 diubah menjadi 10 agar lebih cepat responnya dan perhitungan itu hanya dilakukan ketika sudah mencapai *error* sebesar 10.

Nilai sebesar 10 diambil karena proses perlambatan diharapkan terjadi ketika mencapai kurang dari  $2^\circ$  dari sudut yang diinginkan. Dari data yang didapat rata-rata nilainya tidak lebih dari 10. Pada Persamaan 4.3 tidak digunakan dari awal saat pengujian interval terjauh -10 ke 10, karena jika perhitungan digunakan, maka nilai *delay* akan menjadi  $\frac{10}{100} \times 7 = 0,7$ . Nilai tersebut terlalu kecil untuk diberikan pada *delay* antarstep brushless DC motor. Jadi, dengan menggunakan Persamaan 4.3 setelah mencapai keadaan *error* kurang dari sama dengan 10, brushless DC motor akan melambat dan mencapai *setpoint* dengan akurat.

$$delay = \frac{10}{error} \times 7 \quad (4.3)$$



Gambar 4.24 Hasil respon dari  $-10^\circ$  menuju  $10^\circ$  dengan  $delay$  7 ms saat  $error > 10$  dan  $delay = 70/error$  ms saat  $error \leq 10$

Tabel 4.5 Perbandingan respon dari  $-10^\circ$  menuju  $10^\circ$

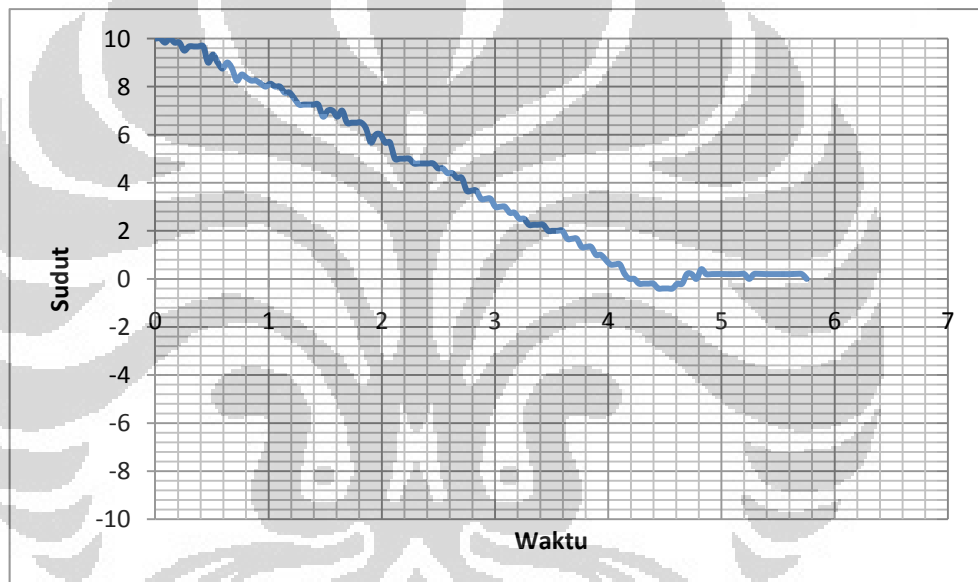
	Peak Time, $T_p$ (s)	Settling Time, $T_s$ (s)	Rise Time, $T_r$ (s)	Overshoot, OS (%)
Motor stop $error = 0$ , $delay = 7$ ms	1,79	~	1,13	5
Motor stop $error \leq 1$ , $delay = 700/error$ ms	-	13,02	8,4	0
Motor stop $error \leq 1$ , $error > 10$ $delay = 7$ ms, $error \leq 10$ $delay = 70/error$ ms	-	1,95	1,14	0

*Peak time* adalah waktu yang dibutuhkan untuk pertama kali mencapai nilai maksimum. *Settling time* adalah waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai  $\pm 2\%$  dari nilai *steady-state*. *Rise time* adalah waktu naik yang diperoleh saat nilai antara 10%-90% dari nilai *steady-state*. *Overshoot*

adalah persentase dari nilai puncak terhadap nilai *steady-state*,  $\%OS = \frac{\text{Nilai puncak} - \text{Nilai akhir}}{\text{Nilai akhir}} \times 100\%$ .

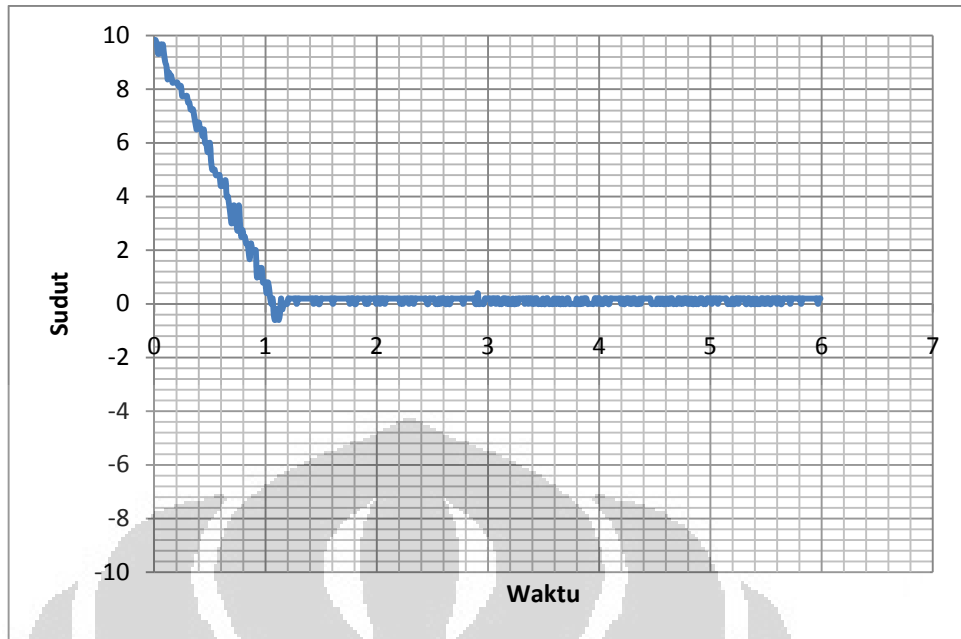
Tidak ada nilai pada *peak time*, karena model respon yang dihasilkan saat menggunakan Persamaan 4.2 adalah *overdamped*, sedangkan saat menggunakan Persamaan 4.3 merupakan *critically damped*. Nilai langsung mencapai keadaan *steady-state*.

Pergerakan lain dari  $10^\circ$  menuju  $0^\circ$  dengan Persamaan 4.2 (Gambar 4.25) dan dengan Persamaan 4.3 (Gambar 4.26). Respon yang dihasilkan pada gambar 4.26 lebih cepat dengan nilai akhir yang dicapai sama.



Gambar 4.25 Respon dari  $10^\circ$  menuju  $0^\circ$  dengan  $delay = 700/error$  ms





Gambar 4.26 Respon dari  $10^\circ$  menuju  $0^\circ$  dengan  $delay = 7$  ms saat  $error > 10$  dan  $delay = 70/error$  ms saat  $error \leq 10$

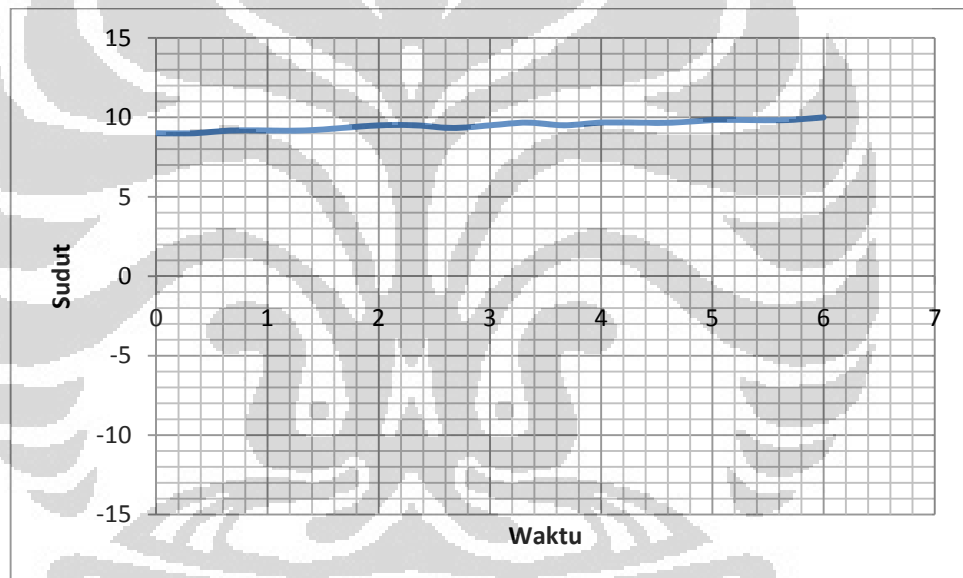
Tabel 4.6 Perbandingan respon dari  $10^\circ$  menuju  $0^\circ$

	Peak Time, $T_p$ (s)	Settling Time, $T_s$ (s)	Rise Time, $T_r$ (s)	Undershoot (%)
Motor stop $error \leq 1$ , $delay = 700/error$ ms	4,44	4,82	3,9	4
Motor stop $error \leq 1$ , $error > 10$ $delay = 7$ ms, $error \leq 10$ $delay = 70/error$ ms	1,08	1,2	0,94	6

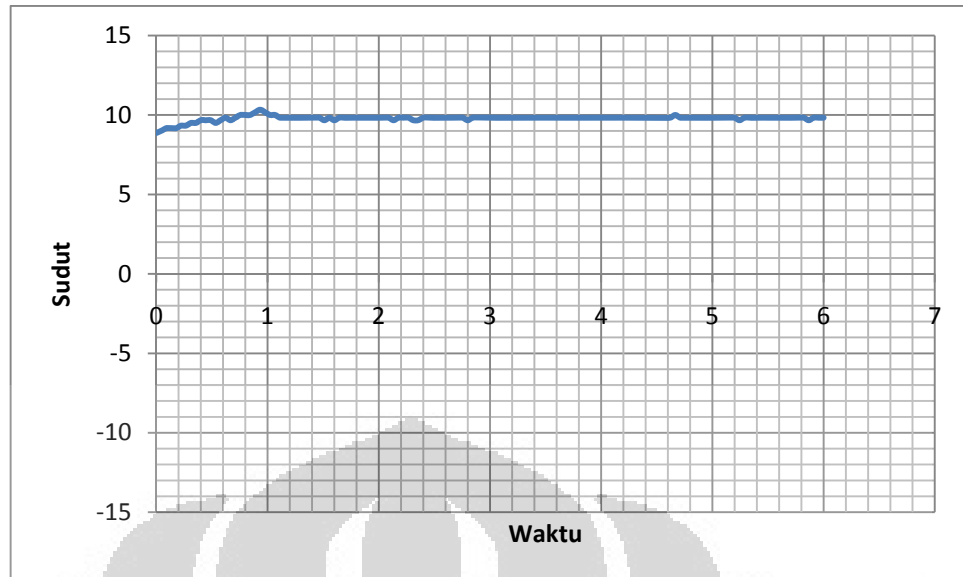
Pada perubahan jarak terkecil (beda  $1^\circ$ ) dari  $9^\circ$  ke  $10^\circ$ . Nilai ADC berubah 651 sampai 646. Tabel 4.7 merupakan hasil perbandingan  $delay$  yang dihasilkan dengan menggunakan Persamaan 4.2 dan 4.3 pada sudut  $9^\circ$  menuju  $10^\circ$ . Perbedaan  $delay$  yang dihasilkan 10 kali lipat.

Tabel 4.7 Perbandingan dengan menggunakan Persamaan 4.2 dan 4.3 dari sudut  $9^\circ$  (nilai 651) sampai  $10^\circ$  (nilai 646)

Nilai ADC	Hasil dengan Persamaan 4.2	Hasil dengan Persamaan 4.3
651	140	14
650	175	17,5
649	233,33	23,33
648	350	35
647	700	70
646	Tak terdefinisi	Tak terdefinisi



Gambar 4.27 Respon dari  $9^\circ$  menuju  $10^\circ$  dengan  $delay = 700/error$  ms



Gambar 4.28 Perubahan dari  $9^\circ$  menuju  $10^\circ$  dengan  $delay$  7 ms saat  $error > 10$  dan  $delay = 70/error$  ms saat  $error \leq 10$

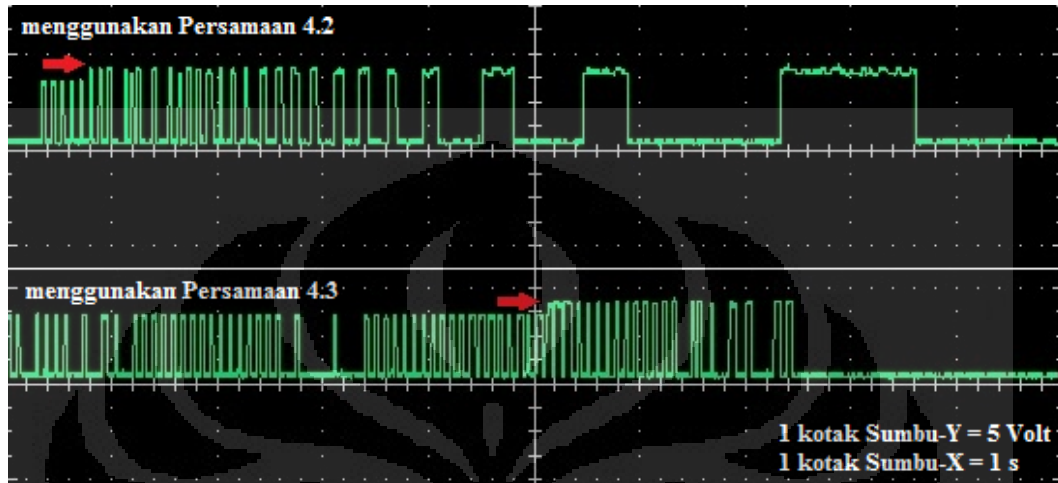
Tabel 4.8 Perbandingan respon dari  $9^\circ$  menuju  $10^\circ$

	Peak Time, $T_p$ (s)	Settling Time, $T_s$ (s)	Rise Time, $T_r$ (s)	Overshoot, OS (%)
Motor stop $error \leq 1$ , $delay = 700/error$ ms	-	5,6	5,33	0
Motor stop $error \leq 1$ , $error > 10$ $delay = 7$ ms, $error \leq 10$ $delay = 70/error$ ms	0,93	0,97	0,63	3,3

Pada Gambar 4.29 merupakan perbandingan lebar pulsa yang terjadi dengan menggunakan Persamaan 4.2 dengan Persamaan 4.3. Hasil pada oscilloscope didapat dengan menghubungkan probe pada sinyal *low* Fasa A (mosfet tipe-n yang pertama, Q0). Pergerakan sirip dari  $-10^\circ$  ke  $10^\circ$ .

Pulsa yang didapat dimulai dari panah berwarna merah. Di sebelah kiri panah tersebut adalah kondisi *idle* atau belum ada sumber tegangan yang diberikan pada source dan drain mosfet tersebut, sehingga brushless

DC motor belum berputar. Dalam satu proses *six-step*, 1 mosfet aktif dua kali. Jadi, ketika diberikan *delay* 7 ms waktu on 1 mosfet adalah 14ms dalam periode 42ms. Satu pulsa yang didapat pada Gambar 4.29 sudah termasuk dua sinyal yang diberikan pada *gate* mosfet.



Gambar 4.29 Perubahan lebar pulsa yang terjadi pada *gate* mosfet

#### 4.5.4 Pemrograman Menentukan Arah Putaran Motor Brushless DC

Brushless DC motor akan bergerak *counterclockwise* jika nilai *setpoint* lebih besar daripada nilai aktual ADC. Sebaliknya, motor brushless akan bergerak *clockwise* jika nilai *setpoint* lebih kecil daripada nilai aktual ADC.

Program yang digunakan untuk menentukan arah putaran adalah sebagai berikut.

```

If Rotation > Target Then
Motor = 0
Elseif Rotation < Target Then
Motor = 1
End If

```

Nilai motor = 0 untuk menjalankan brushless DC motor *counterclockwise* dan motor = 1 untuk menjalankan brushless DC motor *clockwise*.

## BAB 5 PENUTUP

Bab ini menyimpulkan hasil pengujian yang didapat dari prototipe kendali sirip. Dari hasil pengujian tersebut diharapkan dapat menjadi acuan dalam memperbaiki kinerja dari sirip tersebut.

### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan beberapa hal, yaitu:

1. Sirip ini dapat dikendalikan oleh mikrokontroler AVR ATmega8535 sebesar  $1^\circ$  dengan jarak antara  $-10^\circ$  sampai  $10^\circ$ . Perubahan sudut dapat dilihat melalui *pitch gauge*.
2. Komponen yang digunakan adalah *pitch gauge*, AVR ATmega8535, driver L293D, driver mosfet, brushless DC motor, dan roda gigi cacing.
3. Driver mosfet terdiri dari mosfet tipe-p sebagai pemberi sinyal *high* dan mosfet tipe-n sebagai pemberi sinyal *low*.
4. Kendali brushless DC motor menggunakan metode *six-step*.
5. *Six-step* diberikan ke brushless DC motor dari driver mosfet tersebut. Untuk menjalankan motor *clockwise* dan *counterclockwise* hanya dengan membalikkan urutan stepnya.
6. Pengaturan *delay* tiap step dilakukan dengan menggunakan persamaan  $delay = \frac{10}{error} \times 7$  setelah mencapai nilai  $error \leq 10$  ( $error > 10$  tetap menggunakan *delay* sebesar 7 ms).
7. Jika menghentikan aktuator hanya dengan nilai  $error = 0$ , maka sirip akan terus berosilasi sampai waktu yang tak terhingga. Oleh karena itu,  $error \leq 1$  digunakan sebagai parameter untuk menghentikan aktuator.
8. Respon yang dihasilkan dengan menggunakan *delay* tersebut mendapatkan pergerakan yang akurat pada  $-10^\circ$  menuju  $10^\circ$ , dengan *rise time* yang diperoleh sebesar 1,14 detik, *settling time* 1,95 detik, tidak ada *overshoot*, dan mencapai *steady-state* hanya dengan waktu 1,99 detik.

9. Pada pengujian kedua pergerakan  $10^\circ$  menuju  $0^\circ$  terdapat nilai *undershoot* sebesar 6% pada 1,08 detik. Walaupun ada nilai *undershoot*, waktu yang dicapai untuk mencapai *steady-state* hanya membutuhkan waktu 1,28 detik dengan nilai *settling time* sebesar 1,2 detik dan *rise time* sebesar 0,94 detik.
10. Nilai ADC tiap perubahan sudut sebesar  $1^\circ$  tidak linear, karena dipengaruhi oleh struktur mekanik dan *rotation sensor*. Namun, data *setpoint* yang didapat tetap valid. Dalam 3 kali pengujian pengambilan nilai ADC pada tiap sudut hasil *setpoint* tetap sama.

## 5.2 Saran

Dari proses pengujian alat pengendali sirip dengan menggunakan brushless DC motor ini ada beberapa hal yang perlu dikaji ulang untuk pengembangan selanjutnya, diantaranya:

1. Ukuran driver brushless DC motor yang bisa dikatakan cukup besar dimensinya, diharapkan di kemudian hari dapat diperoleh komponen yang lebih kecil.
2. Kendali brushless DC motor menggunakan metode *six-step* kurang optimal saat diberikan *delay* yang sangat kecil. Oleh karena itu, kendali brushless DC motor lebih diutamakan menggunakan metode PWM sinusoidal karena keluarannya dapat menghasilkan gelombang sinusoidal 3 fasa yang dibutuhkan oleh brushless DC motor dengan baik dibandingkan metode *six-step* yang keluarannya berupa sinusoidal kotak.
3. Susunan mekanik yang masih jauh dari sempurna, terutama dari segi roda gigi belum kuat jika diberi beban karena posisi *worm gear* belum ada *housing* atau tempat mengikatnya dan juga belum presisi dalam menggerakkan sirip. Untuk selanjutnya, perancangan mekanik sirip diharapkan dapat lebih baik, sehingga dapat dilakukan uji beban pada sirip tersebut.
4. *Rotation sensor* dalam keadaan sirip diam menghasilkan nilai yang terus berosilasi sebesar  $\pm 1$  terhadap nilai aktualnya dan nilai pada tiap

sudutnya belum linear. Hal tersebut dapat mempengaruhi pemrograman dan juga terhadap respon yang terjadi. Diharapkan menggunakan sensor yang lebih presisi dan stabil seperti enkoder.



## DAFTAR REFERENSI

- [1] Kubota et al. *Rocket Flight Direction Control System*. United States Patent Number 4.913.379. 1990.
- [2] Milan Ristanovic, Dragan Lazic, dan Ivica Indin. *Experimental Validation of Improved Performances of an Electromechanical Aero-fin Control System With a PWM Controlled DC Motor*. FME Transactions 34, hlm. 15-20. 2006.
- [3] <http://id.wikipedia.org/wiki/March>. Akses tanggal 19 Januari 2012 jam 21.00 WIB.
- [4] <http://www.lapan.go.id>. Akses tanggal 19 Januari 2012 jam 20.00 WIB.
- [5] Astrid Wahyuni. *Aspek-Aspek Terkait dalam Merancang Roket Kendali RKK pada Tahap Awal*. LAPAN. 2010.
- [6] Iswanto. *Design dan Implementasi Sistem Embedded Mikrokontroler ATmega8535 dengan Bahasa Basic*. Gava Media. 2008.
- [7] Padmaraja Yedamale. *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. Microchip Technology Inc. AN885. 2003.
- [8] Infineon Technologies. *Driving of a Brushless DC Motor without Sensors*. Application Note, v1.0. 2005.
- [9] NXP Semiconductors. *Brushless DC motor control using the LPC2141*. Application Note, AN10661 rev. 01. 2007.
- [10] Applied Motion Products. *Introduction to Step Motors*.
- [11] Philips Semiconductor. *Motor Control*. Power Semiconductor Applications. 1994.
- [12] Gui-Jia Su dan Donald J. Adams. *Multilevel DC Link Inverter for Brushless Permanent Magnet Motors with Very Low Inductance*. IEEE IAS Annual Meeting. 2001.
- [13] Robert Boylestad dan Louis Nashelsky. *Electronic Devices and Circuit Theory*. Prentice Hall.
- [14] Neil H. E. Weste dan Kamran Eshraghian. *Principles of CMOS VLSI Design*. Addison-Wesley. 1988.



- [15] Texas Instruments. *L293, L293D Quadruple Half-H Drivers*. SLRS008B. 2002.
- [16] Abe Dharmawan. *Pengendalian Motor Brushless DC dengan Metode PWM Sinusoidal Menggunakan ATmega16*. Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. 2008.
- [17] Libor Prokop. *3-phase BLDC Motor Control with Sensorless Back-EMF ADC Zero Crossing Detection Using the 56F805*. Freescale Semiconductor, Inc. 2003.
- [18] <http://EzineArticles.com/5635418>. Akses tanggal 19 Januari 2012 jam 08.00 WIB.
- [19] <http://EzineArticles.com/6129354>. Akses tanggal 19 Januari 2012 jam 08.00 WIB.
- [20] [http://en.wikipedia.org/wiki/Helical\\_gear#Helical](http://en.wikipedia.org/wiki/Helical_gear#Helical). Akses tanggal 19 Januari 2012 jam 08.00 WIB.
- [21] [http://www.societyofrobots.com/mechanics\\_gears.shtml](http://www.societyofrobots.com/mechanics_gears.shtml). Akses tanggal 19 Januari 2012 jam 08.00 WIB.
- [22] [http://en.wikipedia.org/wiki/Bevel\\_gear](http://en.wikipedia.org/wiki/Bevel_gear). Akses tanggal 19 Januari 2012 jam 08.00 WIB.
- [23] <http://EzineArticles.com/5674966>. Akses tanggal 19 Januari 2012 jam 08.00 WIB.
- [24] David E. Johnson, Johnny R. Johnson, John L. Hilburn, dan Peter D. Scott. *Electric Circuit Analysis 3rd Edition*. Prentice Hall International, Inc. 1997.



## Listing Program

```
-----  
'name          : Brushless.bas  
'purpose       : Main Program  
-----  
$regfile = "m8535.dat"  
$crystal = 11059200  
$baud = 115200  
$hwstack = 32  
$swstack = 8  
$framesize = 24  
Config Portc = Output  
Config Portb = Input  
'Inisialisasi Kontrol Kecepatan Motor  
Dim Control As Single  
Dim Div As Single  
Dim Lock As Byte  
'Inisialisasi Motor  
Dim Speed As Word  
Dim Motor As Byte  
Dim A As Word  
'Inisialisasi Input  
Dim Rotation As Word  
Dim Setpoint As Integer  
Dim Target As Word  
Dim Error As Integer  
Dim Error2 As Word  
'Inisialisasi ADC  
Config Adc = Single , Prescaler = Auto  
Start Adc  
Declare Sub Proses  
Declare Sub Arah  
Declare Sub Motor  
Declare Sub Sudut  
Portb = &B11111111  
Portc = &B00_111_000  
Lock = 1  
Motor = 2  
Speed = 800  
Rotation = Getadc(6)  
  
Do  
If Pinb.0 = 0 Then  
Setpoint = 0          '0  
Call Sudut  
Call Arah  
Call Proses  
Elseif Pinb.1 = 0 Then  
Setpoint = 1          '1  
Call Sudut  
Call Arah
```

```

Call Proses
Elseif Pinb.2 = 0 Then
Setpoint = 2          '2
Call Sudut
Call Arah
Call Proses
Elseif Pinb.3 = 0 Then
Setpoint = 3          '3
Call Sudut
Call Arah
Call Proses
Elseif Pinb.4 = 0 Then
Setpoint = 4          '4
Call Sudut
Call Arah
Call Proses
Elseif Pinb.5 = 0 Then
Setpoint = 5          '5
Call Sudut
Call Arah
Call Proses
Elseif Pinb.6 = 0 Then
Setpoint = 6          '6
Call Sudut
Call Arah
Call Proses
Elseif Pinb.7 = 0 Then
Setpoint = 7          '7
Call Sudut
Call Arah
Call Proses
End If
While Pinb.0 = 0 And Pinb.1 = 0
Setpoint = 8          '8
Call Sudut
Call Arah
Call Proses
Wend
While Pinb.0 = 0 And Pinb.2 = 0
Setpoint = 9          '9
Call Sudut
Call Arah
Call Proses
Wend
While Pinb.0 = 0 And Pinb.3 = 0
Setpoint = 10         '10
Call Sudut
Call Arah
Call Proses
Wend
While Pinb.0 = 0 And Pinb.4 = 0

```

```

Setpoint = -1                                '-1
Call Sudut
Call Arah
Call Proses
Wend
While Pinb.0 = 0 And Pinb.5 = 0
Setpoint = -2                                '-2
Call Sudut
Call Arah
Call Proses
Wend
While Pinb.0 = 0 And Pinb.6 = 0
Setpoint = -3                                '-3
Call Sudut
Call Arah
Call Proses
Wend
While Pinb.0 = 0 And Pinb.7 = 0
Setpoint = -4                                '-4
Call Sudut
Call Arah
Call Proses
Wend
While Pinb.1 = 0 And Pinb.2 = 0
Setpoint = -5                                '-5
Call Sudut
Call Arah
Call Proses
Wend
While Pinb.1 = 0 And Pinb.3 = 0
Setpoint = -6                                '-6
Call Sudut
Call Arah
Call Proses
Wend
While Pinb.1 = 0 And Pinb.4 = 0
Setpoint = -7                                '-7
Call Sudut
Call Arah
Call Proses
Wend
While Pinb.1 = 0 And Pinb.5 = 0
Setpoint = -8                                '-8
Call Sudut
Call Arah
Call Proses
Wend
While Pinb.1 = 0 And Pinb.6 = 0
Setpoint = -9                                '-9
Call Sudut
Call Arah

```

```
Call Proses
Wend
While Pinb.1 = 0 And Pinb.7 = 0
Setpoint = -10          '-10
Call Sudut
Call Arah
Call Proses
Wend
Loop
```

```
Sub Sudut
  If Setpoint = 0 Then
    Target = 695
  End If
  If Setpoint = 1 Then
    Target = 690
  End If
  If Setpoint = 2 Then
    Target = 687
  End If
  If Setpoint = 3 Then
    Target = 683
  End If
  If Setpoint = 4 Then
    Target = 680
  End If
  If Setpoint = 5 Then
    Target = 675
  End If
  If Setpoint = 6 Then
    Target = 672
  End If
  If Setpoint = 7 Then
    Target = 668
  End If
  If Setpoint = 8 Then
    Target = 664
  End If
  If Setpoint = 9 Then
    Target = 656
  End If
  If Setpoint = 10 Then
    Target = 650
  End If
  If Setpoint = -1 Then
    Target = 700
  End If
  If Setpoint = -2 Then
    Target = 706
  End If
  If Setpoint = -3 Then
```

```

    Target = 709
End If
If Setpoint = -4 Then
    Target = 714
End If
If Setpoint = -5 Then
    Target = 722
End If
If Setpoint = -6 Then
    Target = 729
End If
If Setpoint = -7 Then
    Target = 733
End If
If Setpoint = -8 Then
    Target = 738
End If
If Setpoint = -9 Then
    Target = 743
End If
If Setpoint = -10 Then
    Target = 747
End If
End Sub Sudut

```

```

Sub Arah
    If Rotation > Target Then
        Motor = 0
    ElseIf Rotation < Target Then
        Motor = 1
    End If
    Call Motor
End Sub Arah

```

```

Sub Motor
'Motor Brushless DC, CCW
If Motor = 0 And Lock = 1 Then
    For A = 0 To 5 Step 1
        If A = 0 Then
            Portc = &B00_011_010      'P1 ON N2 ON
        End If
        If A = 1 Then
            Portc = &B00_011_100      'P1 ON N3 ON
        End If
        If A = 2 Then
            Portc = &B00_101_100      'P2 ON N3 ON
        End If
        If A = 3 Then
            Portc = &B00_101_001      'P2 ON N1 ON
        End If
        If A = 4 Then

```

```

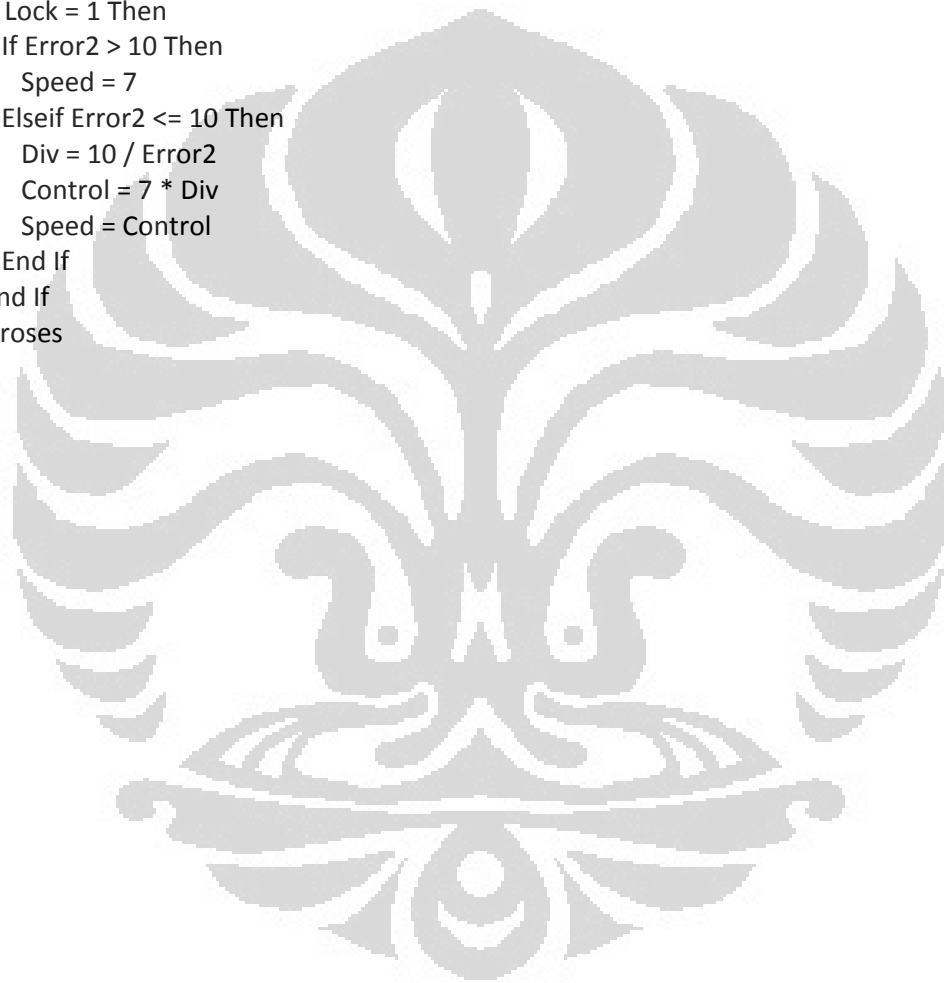
Portc = &B00_110_001          'P3 ON N1 ON
End If
If A = 5 Then
Portc = &B00_110_010          'P3 ON N2 ON
End If
Waitms Speed
Call Proses
Next
End If
'Motor Brushless DC, CW
If Motor = 1 And Lock = 1 Then
For A = 5 To 0 Step -1
If A = 5 Then
Portc = &B00_110_010          'P3 ON N2 ON
End If
If A = 4 Then
Portc = &B00_110_001          'P3 ON N1 ON
End If
If A = 3 Then
Portc = &B00_101_001          'P2 ON N1 ON
End If
If A = 2 Then
Portc = &B00_101_100          'P2 ON N3 ON
End If
If A = 1 Then
Portc = &B00_011_100          'P1 ON N3 ON
End If
If A = 0 Then
Portc = &B00_011_010          'P1 ON N2 ON
End If
Waitms Speed
Call Proses
Next
End If
End Sub Motor

Sub Proses
'ADC - Rotation Sensor
Rotation = Getadc(6)
Print "Channel 6 " ; "Value " ; Rotation
'Error
Error = Target - Rotation
If Error < 0 Then
Error2 = Error * -1
End If
If Error > 0 Then
Error2 = Error * 1
End If
'Set OFF
If Error2 <= 1 Then          'And Error2 <= 1 Then
Lock = 0

```



```
End If
If Lock = 0 Then
  Portc = &B00_111_000
  If Error2 >= 3 Then
    Lock = 1
    Waitms 5000
    If Error2 <= 1 Then      'And Error2 <= 1 Then
      Lock = 0
    End If
  End If
End If
End If
'Kontrol Motor
If Lock = 1 Then
  If Error2 > 10 Then
    Speed = 7
  ElseIf Error2 <= 10 Then
    Div = 10 / Error2
    Control = 7 * Div
    Speed = Control
  End If
End If
End Sub Proses
```



## Perangkat Keras Sistem Aktuator Kendali Sirip





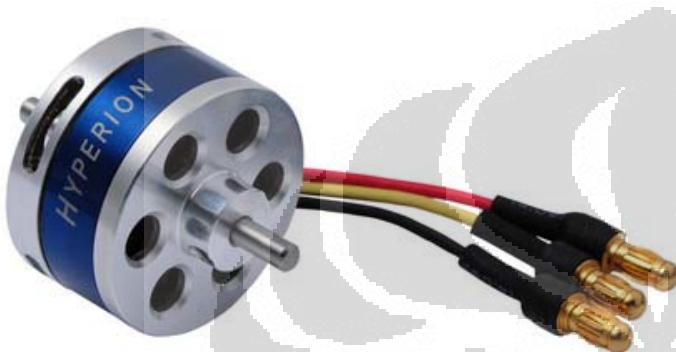
[» Europe](#) | [» Worldwide](#)

[Products](#) | [Downloads](#) | [Blog](#) | [Where to buy](#) | [Corporate](#)

HP-ZS2205-34



## Hyperion ZS 2205 34-Turn 1587Kv



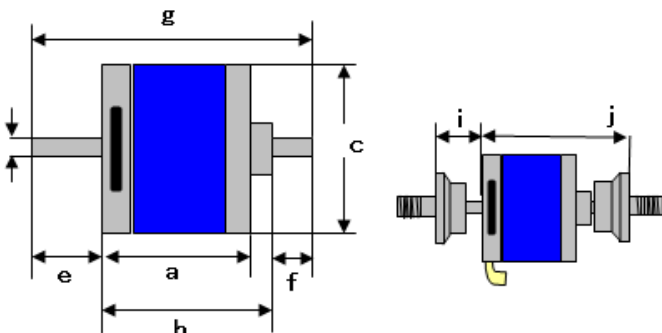
- Made of the finest materials
- Extreme efficiency and Power output
- Longest life
- Highest value

The new Hyperion Zs motor series cost more than "budget" brands, but provide much more value in the short run - and over the years. Simply everything inside and out is the very best obtainable. Japanese 0.2mm stator steel and NMB bearings, 200C magnets and coil wire (hand-wound and precision all-CNC construction); All these lay the foundation on which two years of intensive design and testing have delivered the highest efficiency motors ever produced. And stringent ISO 9001 Quality Control - plus extra care such as magnet temperature batch testing - insure maximum satisfaction, both present and future.

The Zs22 series replace our previous Z22 series airplane motors. While the Z series remain fine motors and still compete with every other high quality brand in the market, the new Zs simply blow away the competition on performance. On average, when the a Zs motor is configured to same prop at the same rpm as the "Z", it will consume 13% to 18% less power from the battery, due to large gains in efficiency. This allows you use a smaller-capacity Hyperion G3 LiPo pack to achieve the lowest possible flying weight. Or you can fly much longer on the same size pack have that pack last longer, due to reduced stress on the battery! Alternatively, you may choose to "push" the Zs series motors much harder, as can handle more power without overheating.

Zs22 motors are drop-in replacements for the previous Z22, which were recommended for many of our Hyperion ARF models. In addition, the

Zs22 come with an extensive hardware package containing everything needed to either front or back mount the motor - including a prop adapt 5mm shaft - so there are no extra costs.



**Zs22 series dimensions in millimeters (mm)**

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>	<b>e</b>	<b>f</b>	<b>g</b>	<b>i</b>	<b>j</b>
<b>ZS2205</b>	15.8	20.4	27.9	3.0	11.0	7.0	38.4	12.0	29.1
<b>ZS2209</b>	22.1	26.6	27.9	3.0	11.0	7.0	44.4	12.0	35.5
<b>ZS2213</b>	26.0	30.5	27.9	3.0	11.0	6.0	47.5	12.0	39.3

**Zs22 series technical specifications and suggestions**

	<b>ZS2205-34</b>	<b>ZS2205-38</b>	<b>ZS2209-24</b>	<b>ZS2209-30</b>	<b>ZS2213-18</b>	<b>ZS2213-24</b>
Weight	32.6 g	32.6 g	45.4 g	45.4 g	59.7 g	59.7 g
Winding	34T	38T	24T	30T	18T	22T
Resistance	0.164 Ohm	0.207 Ohm	0.122 Ohm	0.161 Ohm	0.082 Ohm	0.116 Ohm
IO (@10V)	0.46 A	0.4 A	0.5 A	0.45 A	0.58 A	0.46 A
KV	1587 rpm/V	1430 rpm/V	1165 rpm/V	950 rpm/V	1042 rpm/V	862 rpm/V
Typical Current	5A~10A	4A~9A	8A~14A	7A~13A	12A~20A	10A~17A
Max Current	15A	13A	19A	17A	25A	21A
Max Power	115 Watts	100 Watts	210 Watts	190 Watts	280 Watts	240 Watts
G3 LiPo Light	CX 450	CX 450	CX 850	CX 850	VX 1100	VX 1100
G3 LiPo Duration	CX 850	CX 850	CX 1100	CX 1100	CX 2100	CX 2100
Atlas ESC Suggested	12A	12A	12A/25A	12A/25A	25A	25A
Replaces "Z"	Z2205-34	Z2205-38	Z2209-26	Z2209-32	Z2213-16/20	Z2213-20/24

[CLICK HERE FOR PROPELLER-BATTERY TEST DATA](#)

**Tech Notes**

- **Typical Current (A)** - These indicate the usual range of amperage for the typical model in which the motor is used. This range will provide very high average efficiency, and should be safe under a wide range of conditions (summer/winter) and model setups assuming adequate airflow exists.
- **Max Current (A)** - These specs are for general guidance only and for <10 seconds continuous. Conditions particular to your situation as ambient temperature, number of cells (S) in series, airflow available to the motor, etc... - can have a profound impact on the max current you are able to safely draw from the motor. You may be able to safely exceed these specs, or not, depending on those factors. It is YOUR responsibility to check motor temperature after 10 seconds runtime and again after a short flight. If the motor feels very uncomfortable to touch (or exceeds 80C measured) you should reduce propeller size or pitch. While the ZS motors can sustain higher temperatures, a particular setup model can usually obtain tremendous performance without exceeding 80C. We strongly recommend use of the [Hyperion Emeter](#) which measures voltage, amperage, watts, temperatures, rpm and more. This empowers you to optimize your power system performance and insure that it will stay reliable.
- **Max Power (Watts)**: The same cautions as above with Max Current apply. Check temperatures to determine proper combination of motor and propeller.
- **G3 Lipo Light/Duration** - We hope you'll use [Hyperion Generation 3 \(G3\) Lithium Polymer](#) packs to power your Zs motors. They provide the highest possible performance, long life, and can be charged in as few as 10 minutes. The "light" suggestions suit models which need the lowest possible flying weight, such as 3D aerobats. The "Duration" picks allow longer flights, or multiple flights per charge, and are comparable to the average sport model. Note that "in-between" sizes may give an ideal blend. For example, Zs2213 motors may use the recommended (35C) 1100 for 3D or CX (25C) 2100 for duration, but you could also choose either VX or CX 1600 for a "middle" pick.
- **Atlas ESC Suggested** - [Hyperion ATLAS series speed controllers](#) will be available worldwide by June 1st 2009. They feature the best hardware components for lowest internal resistance and high efficiency - as well as new firmware with extremely sophisticated motor driver for best performance. Suggested ESC are typical for each motor, but you may choose a higher-rated ESC (i.e. 35A rather than 25A) as you wish.
- **Replaces "Z"** - Hyperion ARF model airplanes produced until recently show recommendations for the previous "Z" series motors. This table shows you the appropriate substitution for each of the new Zs series motors.

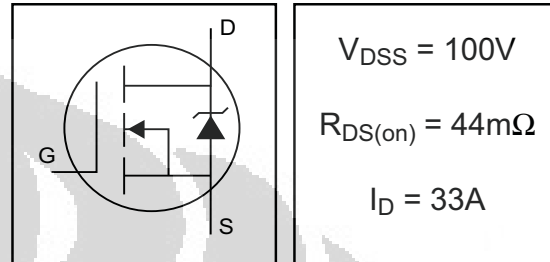
Apology - Due to an error the initial Zs2213 box label lists 47.5g motor weight (59.7g is correct)



# IRF540N

HEXFET® Power MOSFET

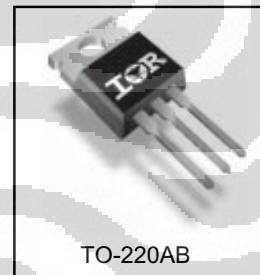
- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated



## Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



## Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D$ @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	33	A
$I_D$ @ $T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	23	
$I_{DM}$	Pulsed Drain Current ①	110	
$P_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation	130	W
	Linear Derating Factor	0.87	W/°C
$V_{GS}$	Gate-to-Source Voltage	$\pm 20$	V
$I_{AR}$	Avalanche Current ①	16	A
$E_{AR}$	Repetitive Avalanche Energy ①	13	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ②	7.0	V/ns
$T_J$ $T_{STG}$	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to + 175	°C
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case )	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1N•m)	

## Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	1.15	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

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

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	100	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.12	—	V/ $^\circ\text{C}$	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1mA$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	44	m $\Omega$	$V_{GS} = 10V, I_D = 16A$ ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
$g_{fs}$	Forward Transconductance	21	—	—	S	$V_{DS} = 50V, I_D = 16A$ ④
$I_{DSS}$	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	$\mu A$	$V_{DS} = 100V, V_{GS} = 0V$ $V_{DS} = 80V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
$I_{GSS}$	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	$V_{GS} = -20V$
$Q_g$	Total Gate Charge	—	—	71	nC	$I_D = 16A$
$Q_{gs}$	Gate-to-Source Charge	—	—	14	nC	$V_{DS} = 80V$
$Q_{gd}$	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	21	nC	$V_{GS} = 10V$ , See Fig. 6 and 13
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	11	—	ns	$V_{DD} = 50V$
$t_r$	Rise Time	—	35	—		$I_D = 16A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	39	—		$R_G = 5.1\Omega$
$t_f$	Fall Time	—	35	—		$V_{GS} = 10V$ , See Fig. 10 ④
$L_D$	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
$L_S$	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
$C_{iss}$	Input Capacitance	—	1960	—	pF	$V_{GS} = 0V$
$C_{oss}$	Output Capacitance	—	250	—		$V_{DS} = 25V$
$C_{rss}$	Reverse Transfer Capacitance	—	40	—		$f = 1.0MHz$ , See Fig. 5
$E_{AS}$	Single Pulse Avalanche Energy②	—	700⑤	185⑥		mJ

## Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$I_S$	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	33	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
$I_{SM}$	Pulsed Source Current (Body Diode)①	—	—	110		
$V_{SD}$	Diode Forward Voltage	—	—	1.2	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 16A, V_{GS} = 0V$ ④
$t_{rr}$	Reverse Recovery Time	—	115	170	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 16A$
$Q_{rr}$	Reverse Recovery Charge	—	505	760	nC	$di/dt = 100A/\mu s$ ④
$t_{on}$	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S+L_D$ )				

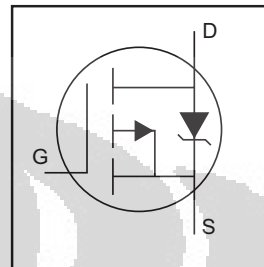
### Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)
- ② Starting  $T_J = 25^\circ\text{C}, L = 1.5mH$   
 $R_G = 25\Omega, I_{AS} = 16A$ . (See Figure 12)
- ③  $I_{SD} \leq 16A, di/dt \leq 340A/\mu s, V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}, T_J \leq 175^\circ\text{C}$
- ④ Pulse width  $\leq 400\mu s$ ; duty cycle  $\leq 2\%$ .
- ⑤ This is a typical value at device destruction and represents operation outside rated limits.
- ⑥ This is a calculated value limited to  $T_J = 175^\circ\text{C}$ .

# IRF9540N

HEXFET® Power MOSFET

- Advanced Process Technology
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- P-Channel
- Fully Avalanche Rated

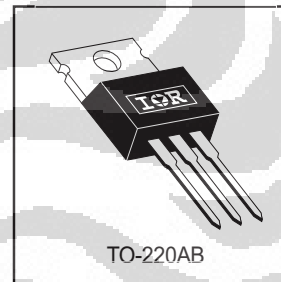


$V_{DSS} = -100V$
$R_{DS(on)} = 0.117\Omega$
$I_D = -23A$

## Description

Fifth Generation HEXFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET Power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



## Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ -10V$	-23	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ -10V$	-16	
$I_{DM}$	Pulsed Drain Current ①	-76	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	140	W
	Linear Derating Factor	0.91	W/°C
$V_{GS}$	Gate-to-Source Voltage	$\pm 20$	V
$E_{AS}$	Single Pulse Avalanche Energy②	430	mJ
$I_{AR}$	Avalanche Current①	-11	A
$E_{AR}$	Repetitive Avalanche Energy①	14	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	-5.0	V/ns
$T_J$	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to + 175	°C
$T_{STG}$			
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1N•m)	

## Thermal Resistance

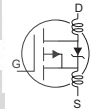
	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	1.1	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

# IRF9540N



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

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	-100	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = -250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	-0.11	—	V/ $^\circ\text{C}$	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = -1mA$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.117	$\Omega$	$V_{GS} = -10V, I_D = -11A$ ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	-2.0	—	-4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = -250\mu A$
$g_{fs}$	Forward Transconductance	5.3	—	—	S	$V_{DS} = -50V, I_D = -11A$
$I_{DSS}$	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	-25	$\mu A$	$V_{DS} = -100V, V_{GS} = 0V$
		—	—	-250	$\mu A$	$V_{DS} = -80V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
$I_{GSS}$	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	$V_{GS} = -20V$
$Q_g$	Total Gate Charge	—	—	97	nC	$I_D = -11A$
$Q_{gs}$	Gate-to-Source Charge	—	—	15	nC	$V_{DS} = -80V$
$Q_{gd}$	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	51	nC	$V_{GS} = -10V$ , See Fig. 6 and 13 ④
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	15	—	ns	$V_{DD} = -50V$
$t_r$	Rise Time	—	67	—		$I_D = -11A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	51	—		$R_G = 5.1\Omega$
$t_f$	Fall Time	—	51	—		$R_D = 4.2\Omega$ , See Fig. 10 ④
$L_D$	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
$L_S$	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
$C_{iss}$	Input Capacitance	—	1300	—	pF	$V_{GS} = 0V$
$C_{oss}$	Output Capacitance	—	400	—		$V_{DS} = -25V$
$C_{rss}$	Reverse Transfer Capacitance	—	240	—		$f = 1.0MHz$ , See Fig. 5



## Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$I_S$	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	-23	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
$I_{SM}$	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	-76		
$V_{SD}$	Diode Forward Voltage	—	—	-1.6	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = -11A, V_{GS} = 0V$ ④
$t_{rr}$	Reverse Recovery Time	—	150	220	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = -11A$
$Q_{rr}$	Reverse Recovery Charge	—	830	1200	nC	$di/dt = -100A/\mu s$ ④
$t_{on}$	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S + L_D$ )				

### Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. ( See fig. 11 )
- ② Starting  $T_J = 25^\circ\text{C}$ ,  $L = 7.1mH$   
 $R_G = 25\Omega, I_{AS} = -11A$ . (See Figure 12)
- ③  $I_{SD} \leq -11A, di/dt \leq -470A/\mu s, V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}, T_J \leq 175^\circ\text{C}$
- ④ Pulse width  $\leq 300\mu s$ ; duty cycle  $\leq 2\%$ .



# L293, L293D QUADRUPLE HALF-H DRIVERS

SLRS008B – SEPTEMBER 1986 – REVISED JUNE 2002

- Featuring Unitrode L293 and L293D Products Now From Texas Instruments
- Wide Supply-Voltage Range: 4.5 V to 36 V
- Separate Input-Logic Supply
- Internal ESD Protection
- Thermal Shutdown
- High-Noise-Immunity Inputs
- Functional Replacements for SGS L293 and SGS L293D
- Output Current 1 A Per Channel (600 mA for L293D)
- Peak Output Current 2 A Per Channel (1.2 A for L293D)
- Output Clamp Diodes for Inductive Transient Suppression (L293D)

## description

The L293 and L293D are quadruple high-current half-H drivers. The L293 is designed to provide bidirectional drive currents of up to 1 A at voltages from 4.5 V to 36 V. The L293D is designed to provide bidirectional drive currents of up to 600-mA at voltages from 4.5 V to 36 V. Both devices are designed to drive inductive loads such as relays, solenoids, dc and bipolar stepping motors, as well as other high-current/high-voltage loads in positive-supply applications.

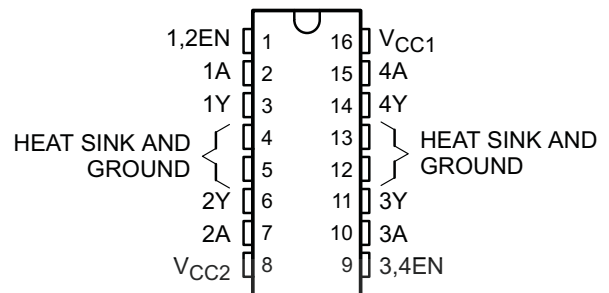
All inputs are TTL compatible. Each output is a complete totem-pole drive circuit, with a Darlington transistor sink and a pseudo-Darlington source. Drivers are enabled in pairs, with drivers 1 and 2 enabled by 1,2EN and drivers 3 and 4 enabled by 3,4EN. When an enable input is high, the associated drivers are enabled and their outputs are active and in phase with their inputs. When the enable input is low, those drivers are disabled and their outputs are off and in the high-impedance state. With the proper data inputs, each pair of drivers forms a full-H (or bridge) reversible drive suitable for solenoid or motor applications.

On the L293, external high-speed output clamp diodes should be used for inductive transient suppression.

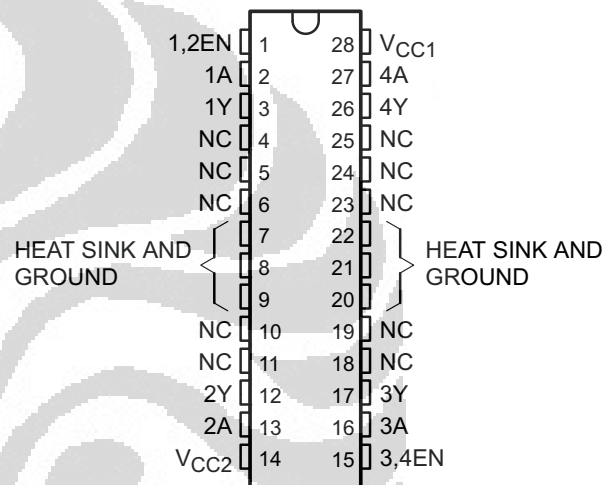
A  $V_{CC1}$  terminal, separate from  $V_{CC2}$ , is provided for the logic inputs to minimize device power dissipation.

The L293 and L293D are characterized for operation from 0°C to 70°C.

N, NE PACKAGE  
(TOP VIEW)



DWP PACKAGE  
(TOP VIEW)



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

**TEXAS  
INSTRUMENTS**

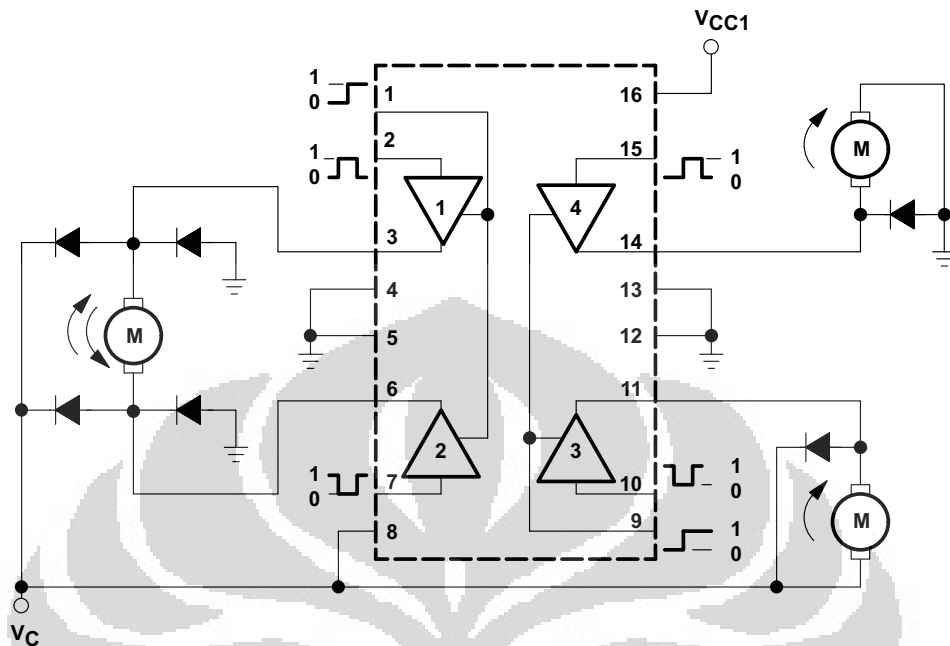
POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

Copyright © 2002, Texas Instruments Incorporated

# L293, L293D QUADRUPLE HALF-H DRIVERS

SLRS008B – SEPTEMBER 1986 – REVISED JUNE 2002

## block diagram



NOTE: Output diodes are internal in L293D.

### TEXAS INSTRUMENTS AVAILABLE OPTIONS

T <sub>A</sub>	PACKAGE
	PLASTIC DIP (NE)
0°C to 70°C	L293NE L293DNE

### Unitrode Products from Texas Instruments

#### AVAILABLE OPTIONS

T <sub>A</sub>	PACKAGED DEVICES	
	SMALL OUTLINE (DWP)	PLASTIC DIP (N)
0°C to 70°C	L293DWP L293DDWP	L293N L293DN

The DWP package is available taped and reeled. Add the suffix TR to device type (e.g., L293DWPTR).



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

# L293, L293D QUADRUPLE HALF-H DRIVERS

SLRS008B – SEPTEMBER 1986 – REVISED JUNE 2002

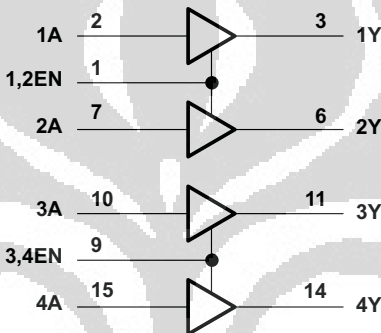
**FUNCTION TABLE**  
(each driver)

INPUTS†		OUTPUT
A	EN	Y
H	H	H
L	H	L
X	L	Z

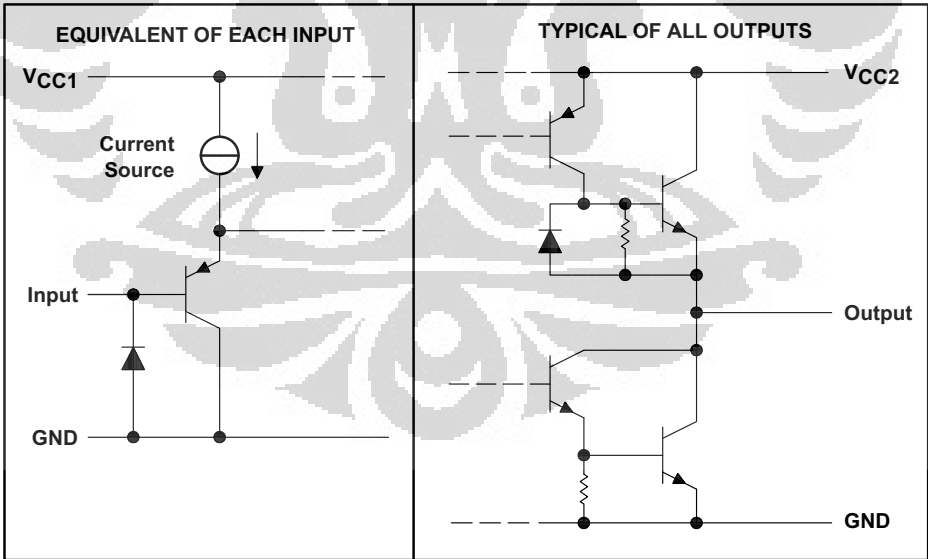
H = high level, L = low level, X = irrelevant,  
Z = high impedance (off)

† In the thermal shutdown mode, the output is in the high-impedance state, regardless of the input levels.

**logic diagram**



**schematics of inputs and outputs (L293)**

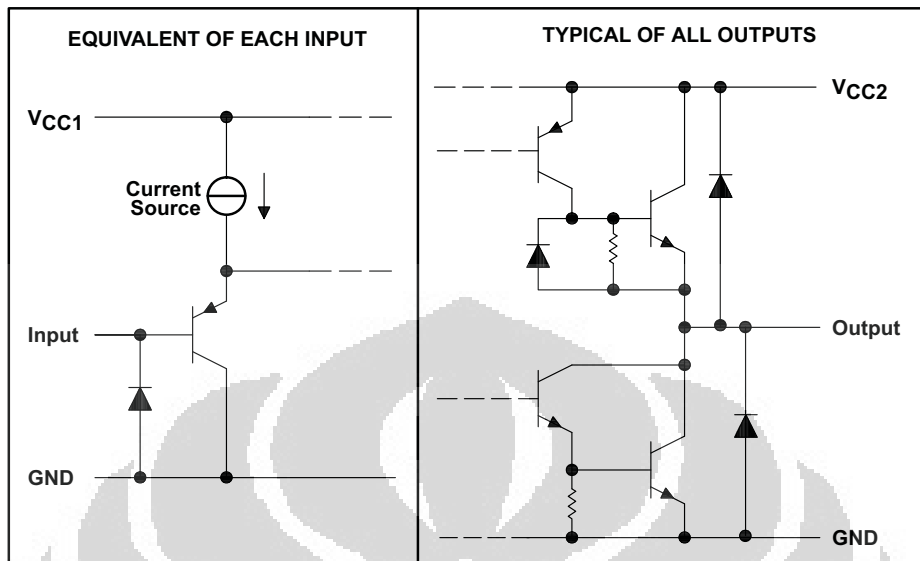


POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

# L293, L293D QUADRUPLE HALF-H DRIVERS

SLRS008B – SEPTEMBER 1986 – REVISED JUNE 2002

## schematics of inputs and outputs (L293D)



### absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)†

Supply voltage, $V_{CC1}$ (see Note 1)	36 V
Output supply voltage, $V_{CC2}$	36 V
Input voltage, $V_I$	7 V
Output voltage range, $V_O$	-3 V to $V_{CC2} + 3$ V
Peak output current, $I_O$ (nonrepetitive, $t \leq 5$ ms): L293	$\pm 2$ A
Peak output current, $I_O$ (nonrepetitive, $t \leq 100$ $\mu$ s): L293D	$\pm 1.2$ A
Continuous output current, $I_O$ : L293	$\pm 1$ A
Continuous output current, $I_O$ : L293D	$\pm 600$ mA
Continuous total dissipation at (or below) 25°C free-air temperature (see Notes 2 and 3)	2075 mW
Continuous total dissipation at 80°C case temperature (see Note 3)	5000 mW
Maximum junction temperature, $T_J$	150°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds	260°C
Storage temperature range, $T_{stg}$	-65°C to 150°C

† Stresses beyond those listed under “absolute maximum ratings” may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under “recommended operating conditions” is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

- NOTES:
- All voltage values are with respect to the network ground terminal.
  - For operation above 25°C free-air temperature, derate linearly at the rate of 16.6 mW/°C.
  - For operation above 25°C case temperature, derate linearly at the rate of 71.4 mW/°C. Due to variations in individual device electrical characteristics and thermal resistance, the built-in thermal overload protection may be activated at power levels slightly above or below the rated dissipation.