



**RANCANG BANGUN KONTROL KECEPATAN MOTOR
BLDC MENGGUNAKAN PID CONTROLLER PADA
WIND TUNNEL SEBAGAI PROTOTIPE
PENGUJIAN TURBIN ANGIN**

SKRIPSI

Oleh

**Faesol Syafaul Said
NIM 121910201051**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2017**



**RANCANG BANGUN KONTROL KECEPATAN MOTOR
BLDC MENGGUNAKAN PID CONTROLLER PADA
WIND TUNNEL SEBAGAI PROTOTIPE
PENGUJIAN TURBIN ANGIN**

SKRIPSI

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

Oleh

**Faesol Syafaul Said
NIM 121910201051**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2017**

PERSEMBAHAN

Dengan mengharap Ridho dari Allah SWT skripsi ini saya persembahkan kepada :

1. Allah SWT atas pertolongan, petunjuk serta berkah rahmat-Nya dalam menyelesaikan tugas akhir ini serta Rasul Muhammad SAW atas ajaran, syafaat dan cinta kepada umatnya;
2. Kedua orang tua saya M.Taslim dan Jumaroh yang telah memberikan dan berusaha memenuhi segala keperluan dan kebutuhan saya, serta memberikan kasih sayang, motivasi sehingga saya dapat menyelesaikan studi ini. Adikku Dini Putri Hidayah yang slalu menjadi motivasi untuk segera menyelesaikan studi ini;
3. Keluarga besar ku Emak (Binti), Bapak (Juremi), kakak ku Syaiful Mifdar dan Sholekhan yang juga sangat berperan selama proses studi ini.

MOTTO

“Man Jadda Wa Jadda ”

-Barang Siapa Yang Bersungguh-Sungguh dia Akan Berhasil-

“Sebaik-baik Manusia Adalah Manusia yang Bermanfaat Bagi Manusia Lainnya“

“Jangan Pernah Berputus Asa dari Rahmat Allah SWT”

“Ikhlaslah Dalam Beramal (kebaikan)”

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama: Faesol Syafaul Said

NIM : 121910201051

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul ” Rancang Bangun Kontrol Kecepatan Motor BLDC Menggunakan PID *Controller* Pada *Wind Tunnel* Sebagai Prototipe Pengujian Turbin Angin” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab penuh atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

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

Jember, 30 Mei 2017

Yang menyatakan,

Faesol Syafaul Said

NIM 121910201051

SKRIPSI

**RANCANG BANGUN KONTROL KECEPATAN MOTOR
BLDC MENGGUNAKAN PID CONTROLLER PADA
WIND TUNNEL SEBAGAI PROTOTIPE
PENGUJIAN TURBIN ANGIN**

Oleh

Faesol Syafaul Said
NIM 121910201051

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Dedy Kurnia Setiawan, S.T., M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Rancang Bangun Kontrol Kecepatan Motor BLDC Menggunakan PID *Controller* Pada *Wind Tunnel* Sebagai Prototipe Pengujian Turbin Angin” karya Faesol Syafaul Said telah diuji dan disahkan pada :

Hari, tanggal : Selasa, 30 Mei 2017

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji:

Ketua,

Anggota I,

Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T.
NIP 19700826 199702 1 001

Dedy Kurnia Setiawan, S.T., M.T.
NIP 19800610 200501 1 003

Anggota II,

Anggota III,

Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T.
NIP 19700404 199601 1 001

H. R. B. Moch Gozali, S.T., M.T.
NIP 19690608 199903 1 002

Mengesahkan
Dekan Fakultas Teknik,

Dr. Ir. Entin Hidayah, M.U.M.
NIP 19661215 199503 2 001

RINGKASAN

Rancang Bangun Kontrol Kecepatan Motor BLDC Menggunakan PID Controller pada Wind Tunnel Sebagai Prototipe Pengujian Turbin Angin; Faesol Syafaul Said; 121910201051; 2017: 64 halaman; Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Kebutuhan energi listrik kian hari semakin meningkat sehingga membutuhkan pasokan energi listrik yang cukup untuk memenuhinya. Salah satu upaya untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah pemanfaatan sumber energi terbarukan diantaranya pembangkit listrik tenaga angin. Untuk mendapatkan sebuah desain pembangkit listrik tenaga angin yang baik serta efektif maka perlu mengetahui karakteristik serta melakukan pengujian terlebih dahulu terhadap sebuah turbin angin namun pada kenyataanya di lapangan sulit untuk mendapatkan data-data suatu turbin angin tanpa melakukan tes secara langsung pada turbin angin tersebut. Oleh karena itu perlu dibuatnya sebuah *prototipe* alat yang dapat digunakan untuk mengetahui *performance* suatu turbin angin. Salah satu *prototipe* tersebut adalah penggunaan sebuah *wind tunnel*. Untuk mendapatkan hasil pengujian yang optimal maka turbin angin perlu diuji dengan beberapa kondisi kecepatan angin oleh karena itu maka kecepatan angin yang dihasilkan oleh sebuah *wind tunnel* harus bervariasi, sehingga untuk mendapatkan kecepatan angin yang bervariasi perlu diterapkannya sebuah kontrol kecepatan motor yang menggerakkan kipas yang ada pada *wind tunnel* tersebut. Pada tugas akhir ini akan dibahas mengenai kontrol kecepatan motor BLDC menggunakan PID *Controller*, dengan penggunaan kontrol PID ini akan memberikan pengaruh terhadap kualitas serta tingkat keamanan dan keawetan terhadap *hardware* sistem.

Dari hasil penelitian yang dilakukan ini dapat diambil beberapa data diantaranya Semakin besar nilai arus maka akan semakin besar nilai putaran motor yang didapat. Hal terlihat saat nilai arus sebesar 0,52 A maka nilai putaran motor yang didapat sebesar 960 RPM kemudian saat nilai arus 1,26 A maka nilai putaran motor yang didapat sebesar 1070 RPM serta semakin tinggi pula kecepatan angin yang diperoleh tentunya diiringi semakin tinggi pula nilai putaran motor yang diperoleh. Terbukti pada saat nilai arus sebesar 0,11 A maka kecepatan angin sebesar 1,36 m/s dengan putaran motor sebesar 480 RPM sedangkan pada saat arus sebesar 0,84 A kecepatan angin yang diperoleh sebesar 3,04 m/s dengan nilai putaran motor sebesar 1060 RPM. Ketika menggunakan kontrol PID untuk mencapai *set point* yang ditentukan membutuhkan waktu sedikit lebih lama dibandingkan tanpa menggunakan kontrol PID, hal ini dapat terlihat untuk mencapai putaran motor 1060 RPM membutuhkan waktu 4,8 detik sedangkan ketika tidak menggunakan kontrol PID untuk mencapai *set point* tersebut membutuhkan waktu 1,2 detik.

Saat menggunakan kontrol PID setelah mencapai *set point* yang ditentukan kecepatan motor mengalami sedikit perubahan namun tidak terlalu jauh dari *set point* sedangkan ketika tanpa menggunakan kontrol PID setelah mencapai *set point* kecepatan mengalami perubahan yang cenderung *fluktuatif* dan cenderung menjauhi *set point*, hal ini dapat terlihat saat menggunakan kontrol PID setelah mencapai *set point* putaran 1060 RPM kecepatan mengalami perubahan secara berturut-turut 1040 RPM, 1060 RPM dan 1040 RPM akan tetapi saat tidak menggunakan kontrol PID setelah mencapai *set point* 1060 RPM kecepatan motor mengalami perubahan secara berturut-turut 1070 RPM, 1040 RPM, 1020 RPM, 1090 RPM, dan 1100 RPM.

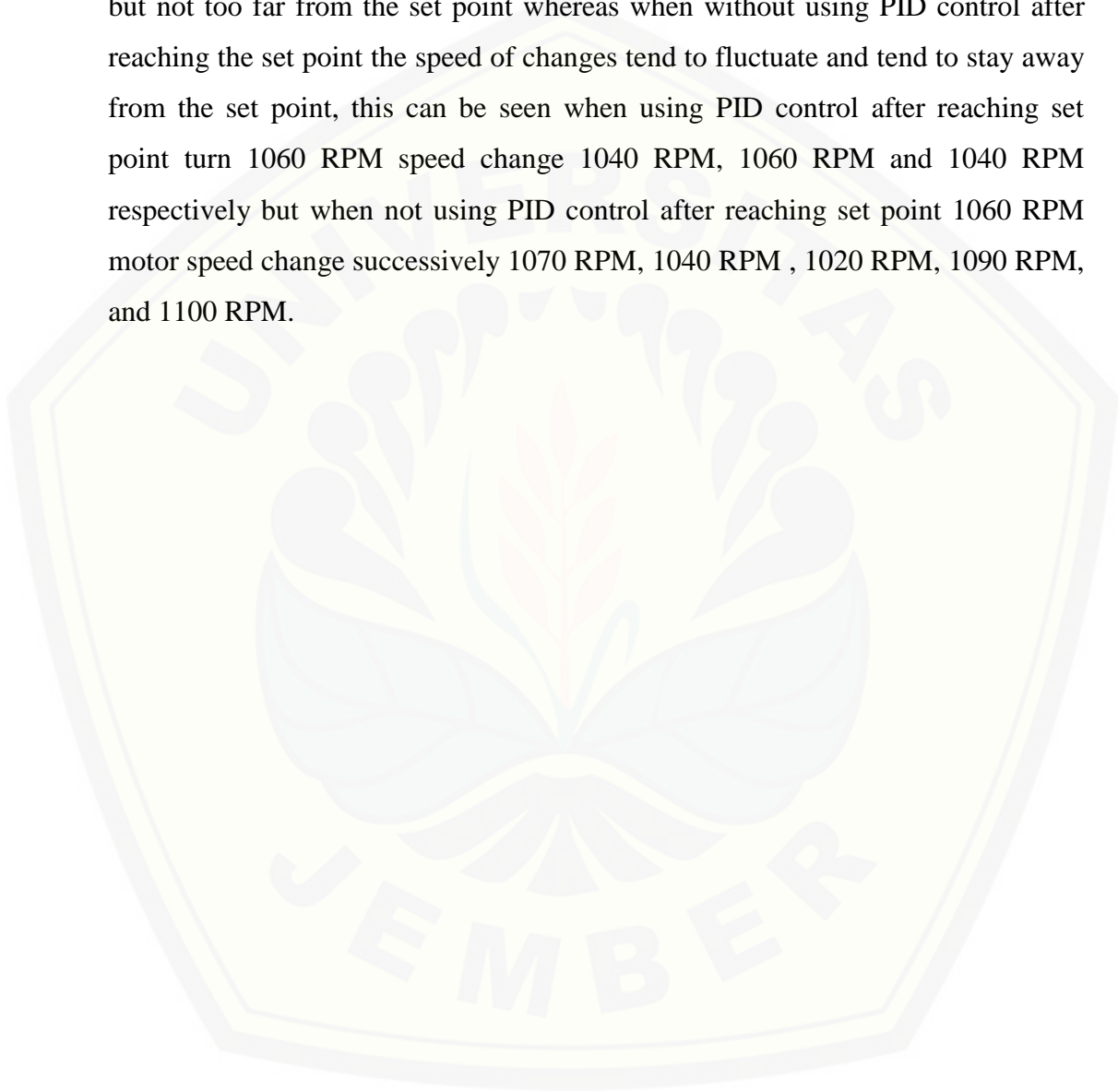
SUMMARY

Design and Build Of BLDC Motor Speed Control Using PID Controller on Wind Tunnel as Wind Turbine Testing Protoype; Faesol Syafaul Said; 121910201051; 2017; 64 pages; Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, Jember University.

The need for electrical energy is increasingly increasing, requiring the supply of sufficient electrical energy to fulfill it. One effort to overcome these problems is the utilization of renewable energy sources such as wind power plants. To get a good and effective wind power generator design it is necessary to know the characteristics as well as to test first on a wind turbine but in fact in the field it is difficult to get the data of a wind turbine without conducting the test directly on the wind turbine. Therefore it is necessary to make a prototype tool that can be used to determine the performance of a wind turbine. One such prototype is the use of a wind tunnel. To obtain optimal test results then wind turbines need to be tested with some wind velocity conditions therefore wind velocity generated by a wind tunnel must vary, so to obtain varied wind speeds it is necessary to apply a motor speed control that drives the existing fan on The wind tunnel. In this final project will be discussed about BLDC motor speed control using PID Controller, with the use of PID control will give influence to quality and level of security and durability to system hardware.

From the results of research conducted this can be taken some data such as The greater the value of the current then the greater the value of motor rotation obtained. It is seen when the current value of 0.52 A then the motor rotation value obtained sebsar 960 RPM then when the current value of 1.26 A then the motor rotation value obtained for 1070 RPM and the higher wind speed obtained is also accompanied by higher values Motor output obtained. Evident at the current value of 0.11 A the wind velocity of 1.36 m / s with motor rotation of 480 RPM while at current flow of 0.84 A wind speed obtained at 3.04 m / s with the value of motor rotation Amounting to 1060 RPM. When using the PID control to achieve the

specified set point takes slightly longer time than without using PID control, it can be seen to achieve motor rotation of 1060 RPM takes 4.8 seconds while when not using PID control to reach the set point it takes time 1.2 seconds. When using the PID control after reaching the set point the speed of the motor is slightly changed but not too far from the set point whereas when without using PID control after reaching the set point the speed of changes tend to fluctuate and tend to stay away from the set point, this can be seen when using PID control after reaching set point turn 1060 RPM speed change 1040 RPM, 1060 RPM and 1040 RPM respectively but when not using PID control after reaching set point 1060 RPM motor speed change successively 1070 RPM, 1040 RPM , 1020 RPM, 1090 RPM, and 1100 RPM.



PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi berjudul “Rancang Bangun Kontrol Kecepatan Motor BLDC Menggunakan PID *Controller* Pada *Wind Tunnel* Sebagai *Prototipe* Pengujian Turbin Angin ”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Selama penyusunan skripsi ini penulis mendapat bantuan berbagai pihak, untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ibu Dr. Ir. Entin Hidayah M.UM, selaku dekan Fakultas Teknik Universitas Jember;
2. Bapak Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember;
3. Bapak Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Utama dan Bapak Dedy Kurnia Setiawan, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, tenaga dan memberikan dukungan materi dalam kelancaran penyusunan skripsi;
4. Bapak Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T., selaku Dosen penguji I serta Bapak H. R. B. Moch. Gozali, S.T., M.T., selaku dosen penguji II;
5. Bapak Widjonarko, S.T., M.T. yang telah memperbolehkan bengkelnya digunakan sebagai tempat pengerjaan mekanik *hardware*.
6. Seluruh Dosen Teknik Elektro yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan dan bimbingan selama mengikuti pendidikan di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember
7. Para staf karyawan dan karyawan serta teknisi Fakultas teknik Universitas jember yang telah memberikan bantuan selama mengikuti pendidikan di Fakultas teknik Universitas Jember;
8. Kedua orang tuaku terkasih M. taslim dan Jumaroh yang telah memberikan segalanya, yang selalu mendoakan, mencurahkan kasih sayang, memberikan

perhatian, memberi semangat yang tiada hentinya dan telah memberikan dukungan materi untuk menyelesaikan skripsi ini;

9. Keluarga besar saya Mak Bin, Pak Juremi, kakak ku Syaiful Mifdar dan Sholekhan yang juga sangat berperan selama proses studi ini.
10. Teman-teman kontrakan Mas Tauhid, Mas Tris, Mas Nur, Dwi, Fery serta Iqbal yang Slalu Memberikan Hiburan Tersendiri selama di kota perantauan.
11. *Partner* Skripsi Mahfud, Yudha Herdiansyah, Arif Puguh, Mas Yoga serta Mas Arwani yang telah membantu dalam proses pengerjaan alat skripsi ini;
12. *Zong group* (firdaus, wisnu, serta syahrizal) terimakasih kalian telah menjadi partner yang menghibur selama perkuliahan ini
13. Teman-teman seperjuangan, SATE UJ 2012 yang telah menjadi keluarga kedua selama penulis merantau;
14. Teman-teman KKN 127 Faiq, Imam, Yohan, Alif, Dara, Rizha, MbK Dewi, Ayu, serta Adek Siti yang memberikan kenangan tersendiri selama mengabdikan dimasyarakat Dawuhan Mangli kabupaten Jember, *I love you full guys*.
15. Para pendekar, Njir (Imam), pak-des (Faiq) yang selalu memberikan petuah-petuah luar biasa.
16. Serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah mendukung dalam penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini jauh dari kesempurnaan, untuk itu penulis menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat berguna bagi pembaca dan bagi penulis sendiri pada khususnya semoga Allah SWT memberikan yang terbaik untuk kita semua. Amin

Jember, 30 Mei 2017

Penulis

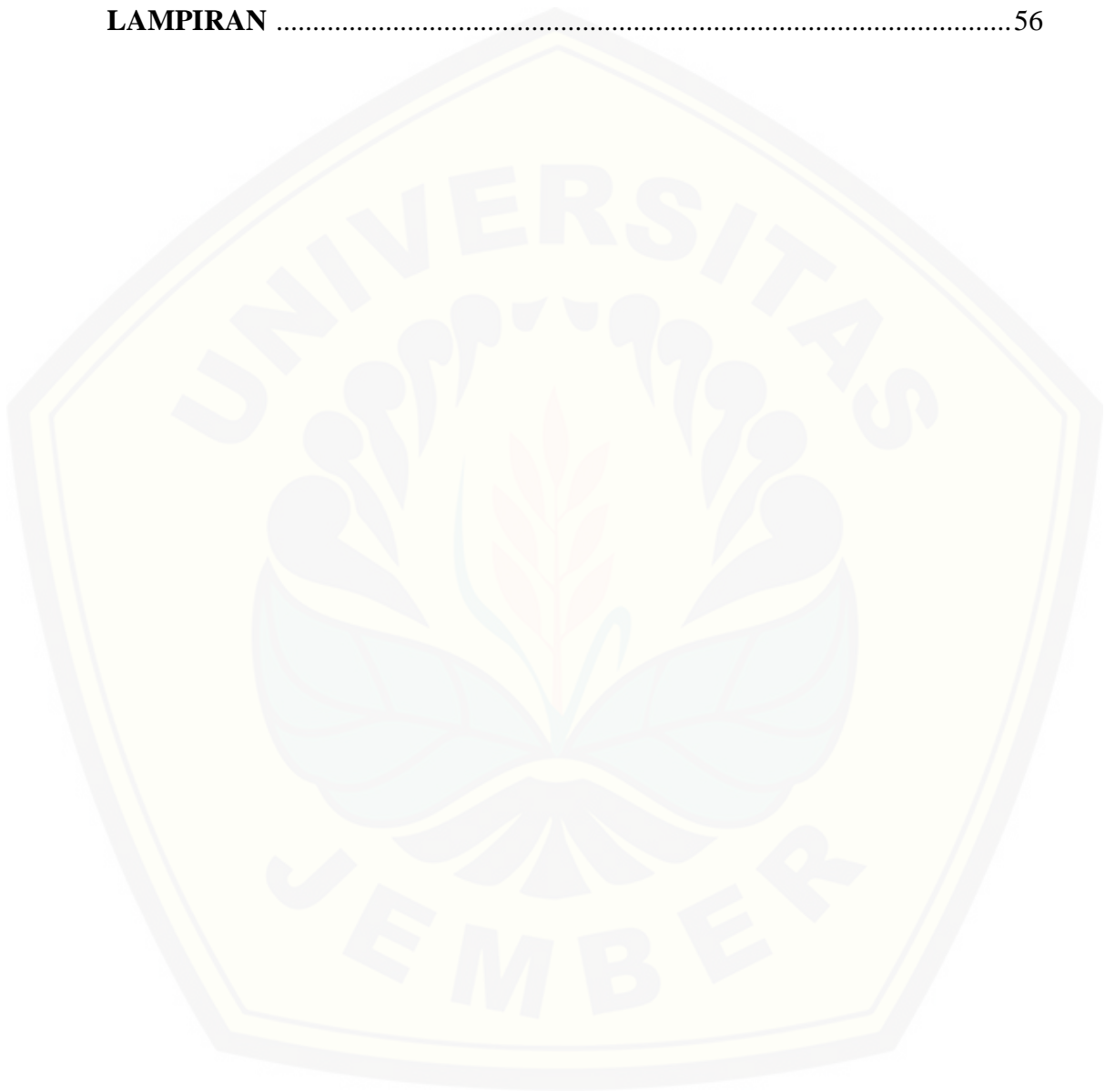
DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN SAMPUL.....	i
HALAMAN JUDUL	ii
PERSEMBAHAN	iii
MOTTO	iv
PERNYATAAN	v
HALAMAN PEMBIMBING	vi
PENGESAHAN	vii
RINGKASAN	viii
SUMMARY	x
PRAKATA	xii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR GAMBAR	xix
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan dan Manfaat Penelitian	3
1.4.1 Tujuan Penelitian	3
1.4.2 Manfaat Penelitian	3
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Wind Tunnel	4
2.1.1 Pengertian <i>Wind Tunnel</i>	4
2.1.2 Kegunaan <i>Wind Tunnel</i>	4
2.1.3 Struktur <i>Wind Tunnel</i>	4
2.1.4 Jalur Rangkaian <i>Wind Tunnel</i>	7
2.2 Brushless DC Motor (BLDC)	9
2.2.1 Prinsip Kerja Motor BLDC.....	10

2.3 Inverter 3 Fasa	11
2.4 Pengendalian Motor BLDC	12
2.4.1 Metode <i>Six Step</i>	12
2.4.2 Metode PWM <i>Sinusoidal</i>	13
2.4.3 Perbandingan Metode <i>Six Step</i> dan PWM <i>Sinusoidal</i>	16
2.4.4 Metode Pendeteksian Perubahan Komutasi.....	17
2.4.5 <i>Back EMF</i> dan <i>Zero crossing</i>	18
2.5 Encoder	18
2.5.1 Sensor <i>Hall</i>	19
2.6 Pulse Width Modulation	20
2.6.1 Dasar Pembangkitan PWM.....	20
2.6.2 Pengaturan Kecepatan dengan Kontrol PWM	20
2.7 PID Controller	21
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	23
3.2 Metode Penelitian	23
3.2.1 Perancangan Alat dan Pembuatan <i>Hardware</i>	23
3.2.2 Uji Coba dan Pengamatan	24
3.2.3 Analisis Data dan Pembahasan	24
3.2.4 Penulisan Laporan	24
3.3 Alat dan Bahan	25
3.3.1 Perangkat Lunak	25
3.3.2 Alat dan Bahan	25
3.4 Diagram Alir	26
3.4.1 Diagram Alir Sistem Secara Keseluruhan	26
3.4.2 Diagram Alir <i>PID Controller</i>	27
3.4.3 Metode Penentuan Nilai K_p , K_i dan K_d	28
3.5 Sistem Mikroprocessor	29
3.6 Inverter 3 Fasa	29
3.7 Rangkaian Driver Mosfet	31

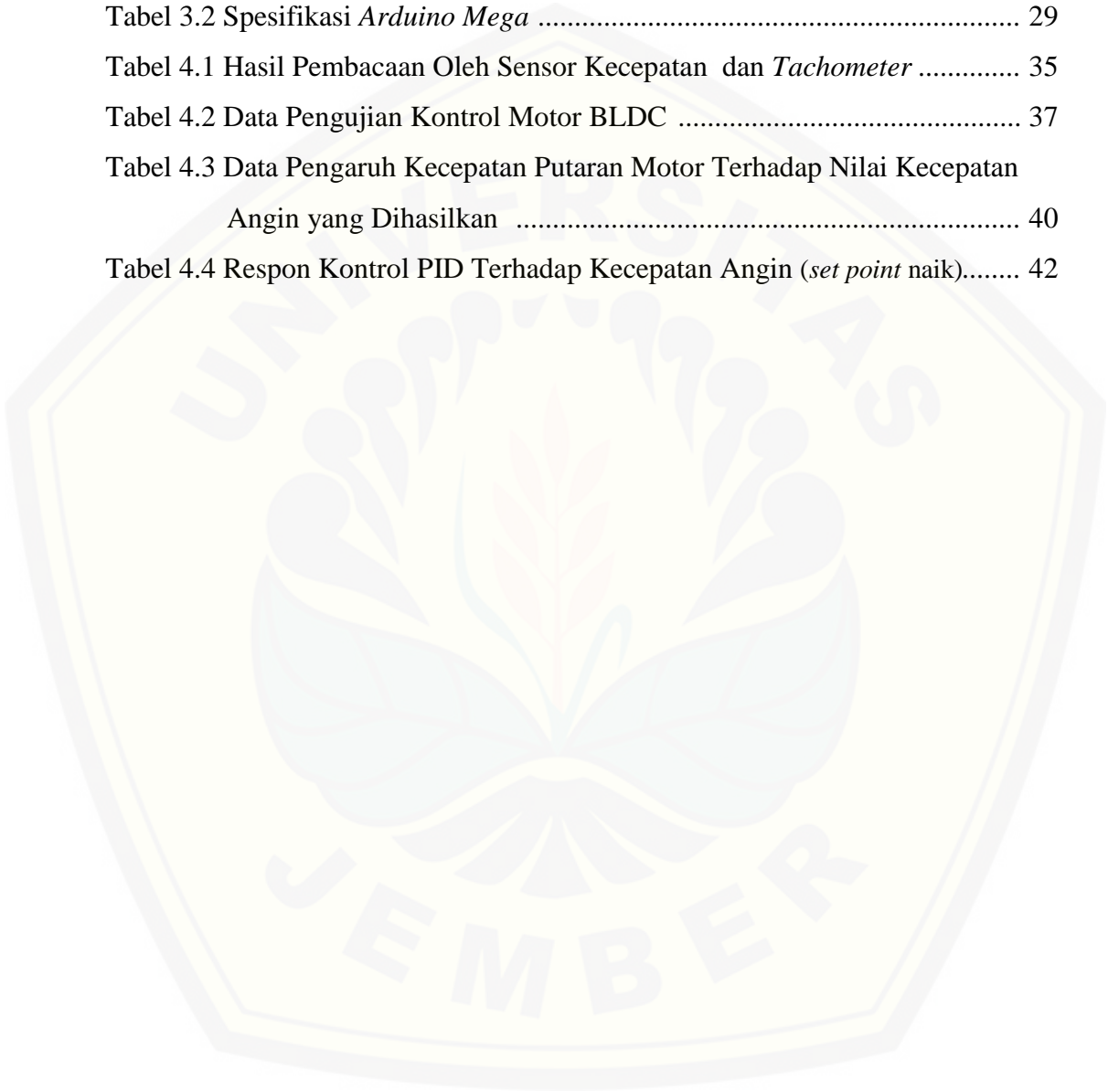
3.8 Pengkonversian Putaran Besaran Kecepatan Motor Terhadap Kecepatan Angin	32
3.10 Perencanaan Desain <i>Wind Tunnel</i>	33
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1 Pengujian Sistem	34
4.2 Pengujian Kontrol Kecepatan Motor	34
4.2.1 Pengujian Sensor Kecepatan Motor	34
4.2.2 Pengujian Kontrol Motor BLDC	37
4.2.3 Pengaruh Kecepatan Motor Terhadap Nilai Kecepatan Angin Yang Dihasilkan	40
4.3 Pengujian Kecepatan Motor Saat Menggunakan Kontrol PID dan Saat Tidak Menggunakan Kontrol PID	41
4.3.1 Respon Ketika Menggunakan Kontrol PID Serta Tanpa Menggunakan Kontrol PID Terhadap Kecepatan Angin (<i>set point</i> naik).....	42
4.3.2 Respon Ketika Menggunakan Kontrol PID Serta Tanpa Menggunakan Kontrol PID Terhadap Kecepatan Angin (<i>set point</i> fluktuatif).....	44
4.3.3 Respon Ketika Menggunakan Kontrol PID Serta Tanpa Menggunakan Kontrol PID Terhadap Arus <i>Transien</i> (<i>set point</i> naik).....	45
4.3.4 Respon Ketika Menggunakan Kontrol PID Serta Tanpa Menggunakan Kontrol PID Terhadap Arus <i>Transien</i> (<i>set point</i> fluktuatif).....	46
4.3.5 Respon Ketika Menggunakan Kontrol PID Serta Tanpa Menggunakan Kontrol PID Terhadap Tegangan <i>Transien</i> (<i>set point</i> naik).....	48
4.3.6 Respon Ketika Menggunakan Kontrol PID Serta Tanpa Menggunakan Kontrol PID Terhadap Tegangan <i>Transien</i> (<i>set point</i> fluktuatif).....	49

BAB 5. PENUTUP	51
5.1 Kesimpulan	51
5.2 Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	54
LAMPIRAN	56



DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian	23
Tabel 3.2 Spesifikasi <i>Arduino Mega</i>	29
Tabel 4.1 Hasil Pembacaan Oleh Sensor Kecepatan dan <i>Tachometer</i>	35
Tabel 4.2 Data Pengujian Kontrol Motor BLDC	37
Tabel 4.3 Data Pengaruh Kecepatan Putaran Motor Terhadap Nilai Kecepatan Angin yang Dihasilkan	40
Tabel 4.4 Respon Kontrol PID Terhadap Kecepatan Angin (<i>set point</i> naik).....	42



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Motor penggerak <i>Blade</i> pada <i>Wind Tunnel</i>	5
Gambar 2.2 <i>Blade Wind Tunnel</i>	5
Gambar 2.3 <i>Settling Chamber</i>	6
Gambar 2.4 Nosel <i>Wind Tunnel</i>	6
Gambar 2.5 Konstruksi <i>Diffuser Wind Tunnel</i>	7
Gambar 2.6 Terowongan Angin Sirkuit Terbuka	8
Gambar 2.7 Terowongan Angin Sirkuit Tertutup	8
Gambar 2.8 Tegangan Stator BLDC	10
Gambar 2.9 <i>Inverter</i> 3 Fasa	12
Gambar 2.10 Metode PWM <i>Six Step</i>	13
Gambar 2.11 Pembentukan Sinyal PWM <i>Sinusoidal</i>	14
Gambar 2.12 Implementasi PWM Sinusoidal.	15
Gambar 2.13 BLDC Motor dengan Encoder	19
Gambar 2.14 Penempatan Sensor Hall pada Stator BLDC	20
Gambar 3.1 Blok Sistem Secara Keseluruhan	26
Gambar 3.2 Diagram Alir <i>PID Controller</i>	27
Gambar 3.3 Rangkaian <i>Inverter</i> 3 Fasa	30
Gambar 3.4 Skematik <i>Driver Mosfet</i>	31
Gambar 3.5 Dimensi Perancangan Konstruksi <i>Wind Tunnel</i>	33
Gambar 3.6 Hasil Implementasi <i>Wind Tunnel</i>	33
Gambar 4.1 Grafik Hubungan Nilai <i>Set Point</i> Terhadap Kecepatan Putaran Motor	35
Gambar 4.2 Grafik Hubungan Arus (A) Terhadap Kecepatan Motor (RPM) ...	37
Gambar 4.3 Grafik Hubungan Kecepatan Putaran Motor (RPM) Dengan Tegangan (V)	38
Gambar 4.4 Grafik Hubungan Putaran Kecepatan Motor (RPM) Dengan Daya (W)	39

Gambar 4.5 Grafik Hubungan Antara Arus Dengan Kecepatan Angin Yang Dihasilkan	40
Gambar 4.6 Respon Kontrol PID Serta Tanpa Kontrol PID Terhadap Kecepatan Angin Yang Dihasilkan (<i>set point</i> naik)	42
Gambar 4.7 Respon Kecepatan Motor Saat Menggunakan Kontrol PID Dan Saat Tidak Menggunakan Kontrol PID	43
Gambar 4.8 Respon Kecepatan Angin Saat Menggunakan Kontrol PID dan Saat Tidak Menggunakan Kontrol PID (<i>set point</i> fluktuatif)	44
Gambar 4.9 Respon Ketika Menggunakan Kontrol PID Serta Tanpa Menggunakan Kontrol PID Terhadap Arus <i>Transien</i> (<i>set point</i> naik) .	45
Gambar 4.10 Respon Ketika Menggunakan Kontrol PID Terhadap Arus <i>Transien</i> (<i>set point</i> fluktuatif)	46
Gambar 4.11 Respon Ketika Tanpa Menggunakan Kontrol PID Terhadap Arus <i>Transien</i> (<i>set point</i> fluktuatif)	46
Gambar 4.12 Respon Ketika Menggunakan Kontrol PID Serta Tanpa Kontrol PID Terhadap Tegangan <i>Transien</i> (<i>set point</i> naik).....	48
Gambar 4.13 Respon Ketika Menggunakan Kontrol PID Terhadap Tegangan <i>Transien</i> (<i>set point</i> fluktuatif).....	49
Gambar 4.14 Respon Ketika Tanpa Menggunakan Kontrol PID Terhadap Tegangan <i>Transien</i> (<i>set point</i> fluktuatif).....	49

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini penggunaan energi listrik semakin tinggi, sehingga kebutuhan akan pasokan energi listrik pun juga semakin besar. Seiring dengan kondisi tersebut maka perlu adanya sebuah terobosan yang dilakukan sehingga dapat menjawab tantangan yang ada. Sejauh ini produksi energi listrik menggunakan bahan bakar berupa fosil, selain mahal harganya bahan bakar tersebut juga menyumbang polusi udara yang berdampak buruk terhadap kondisi lingkungan. Oleh karena itu perlu dilakukan pemanfaatan sumber daya alam yang aman, murah, serta ramah lingkungan. Salah satu sumber daya alam tersebut adalah penggunaan energi angin yang bersifat energi terbarukan yang digunakan untuk memutar turbin untuk menghasilkan energi listrik.

Untuk mendapatkan sebuah desain pembangkit listrik tenaga angin yang baik serta efektif maka perlu mengetahui karakteristik serta melakukan pengujian terlebih dahulu terhadap sebuah turbin angin. Namun pada kenyataannya di lapangan sulit untuk mendapatkan data-data suatu turbin angin tanpa melakukan tes secara langsung pada turbin angin tersebut seperti halnya untuk mendapatkan jejak algoritma puncak kekuatan, manajemen daya, strategi konversi serta kinerja aerodinamika suatu turbin angin memerlukan pengujian secara langsung terhadap turbin angin tersebut. Oleh karena itu perlu dibuatnya sebuah *prototipe* alat yang dapat digunakan untuk mengetahui *performance* suatu turbin angin. Salah satu *prototipe* tersebut adalah penggunaan sebuah *wind tunnel*. *Wind tunnel* merupakan sebuah alat riset yang dikembangkan untuk membantu dalam menganalisis efek angin yang bergerak atau berada di sekitar objek benda padat. Pada umumnya, perancangan *wind tunnel* menggunakan motor listrik dengan beberapa jumlah *blade* untuk menghasilkan hembusan angin di dalam *wind tunnel* itu sendiri. Untuk mendapatkan hasil pengujian yang optimal maka turbin angin perlu diuji dengan beberapa kondisi kecepatan angin oleh karena itu maka kecepatan angin yang dihasilkan oleh sebuah *wind tunnel* harus bervariasi, sehingga untuk mendapatkan kecepatan angin yang bervariasi perlu diterapkannya sebuah kontrol

kecepatan motor yang menggerakkan kipas yang ada pada *wind tunnel* tersebut. Pada penelitian sebelumnya yaitu pada tugas akhir yang berjudul analisis pengaruh pembebanan terhadap kinerja kincir angin tipe *propeller* pada *wind tunnel* sederhana yang dilakukan oleh Ikhwanul Ikhsan dan M. Akbar Hipi (2011) tidak dibahas mengenai kontrol yang digunakan untuk mengatur kecepatan putar motor pada *wind tunnel* sehingga pada tugas akhir ini akan dibahas mengenai kontrol kecepatan motor BLDC menggunakan PID *Controller*, dengan penggunaan kontrol PID ini akan memberikan pengaruh terhadap kualitas serta tingkat keamanan dan keawetan terhadap *hardware* sistem, hal ini terjadi yaitu ketika tanpa menggunakan kontrol PID untuk mencapai kecepatan motor tertentu maka kontrol akan langsung menuju pada *set point* yang ditentukan yang berimbas pada kenaikan arus secara cepat yang dapat menimbulkan resiko kerusakan pada motor karena terjadi peningkatan arus yang cepat, sedangkan ketika menggunakan kontrol PID untuk menuju pada *set point* yang ditentukan sistem akan secara *smooth* menuju *set point* yang ditentukan sehingga lonjakan arus dapat dihindari. Diharapkan dari hasil tugas akhir ini didapatkan sebuah kontrol kecepatan motor yang dapat diterapkan pada motor penggerak *blade wind tunnel* sehingga kecepatan angin yang dihasilkan oleh *wind tunnel* dapat bervariasi seperti kondisi angin yang ada di alam bebas.

1.2 Rumusan Masalah

Bagaimana merancang kontrol kecepatan motor BLDC menggunakan PID *controller* sebagai penggerak *blade* pada *wind tunnel* sehingga dapat menghasilkan variasi kecepatan angin yang bervariasi seperti kondisi angin yang ada di alam bebas.

1.3 Batasan Masalah

1. Kontrol yang digunakan adalah *PID controller*
2. Desain *wind tunnel* mengikuti spesifikasi desain yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya (Ikhwanul Ikhsan & M. Akbar Hipi, 2011).
3. Kecepatan angin yang digunakan untuk analisis data sebesar 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s.
4. *Blade* yang digunakan pada *wind tunnel* adalah *blade* tipe *propeller* 3 daun.
5. Beban dari luar seperti adanya hembusan angin dari luar diabaikan.

1.4 Tujuan dan Manfaat Penelitian

1.4.1 Tujuan Penelitian

Dari hasil penelitian yang dilakukan ini diharapkan mampu:

Merancang kontrol kecepatan motor BLDC 3 fasa menggunakan *PID controller* sebagai penggerak *blade* pada *wind tunnel* sehingga dapat menghasilkan kecepatan angin yang bervariasi seperti kondisi angin yang ada di alam bebas.

1.4.2 Manfaat Penelitian

Hasil desain kontrol kecepatan motor BLDC 3 fasa serta desain mekanis dari *wind tunnel* dapat dipergunakan untuk keperluan labaratorium serta kebutuhan yang bersifat akademis maupun non akademis.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini dijelaskan mengenai landasan teori yang digunakan dalam penelitian RANCANG BANGUN KONTROL KECEPATAN MOTOR BLDC MENGGUNAKAN PID *CONTROLLER* PADA *WIND TUNNEL* SEBAGAI *PROTOTIPE* PENGUJIAN TURBIN ANGIN

2.1 *Wind Tunnel*

2.1.1 Pengertian *Wind Tunnel*

Wind tunnel atau terowongan angin adalah alat riset dikembangkan untuk membantu dalam menganalisa efek angin yang bergerak atau berada di sekitar objek benda padat.

2.1.2 Kegunaan *Wind Tunnel*

Wind tunnel digunakan untuk mensimulasikan keadaan sebenarnya pada suatu benda yang berada dalam pengaruh gaya-gaya aerodinamik dalam bidang aeronautika kinerja mekanika terbang (*flight mechanic*) dari suatu benda terbang.

2.1.3 Struktur *Wind Tunnel*

Ada beberapa komponen penting yang terdapat pada suatu *wind tunnel* yaitu sebagai berikut:

a. Motor penggerak

Komponen ini merupakan bagian yang berfungsi untuk menggerakkan *blade* pada *wind tunnel* yang nantinya akan menghasilkan hembusan angin. Cara kerja dari motor penggerak ini sendiri yaitu motor dikopel dengan sebuah *fan belt* yang terpasang pada *blade/ kipas wind tunnel* sehingga ketika motor berputar maka *blade* juga akan berputar dan menghasilkan sebuah angin yang akan digunakan untuk memutar turbin angin yang akan diuji.



Gambar 2.1 Motor penggerak *blade* pada *wind tunnel*
(www.tokopedia.com)

b. *Blade*

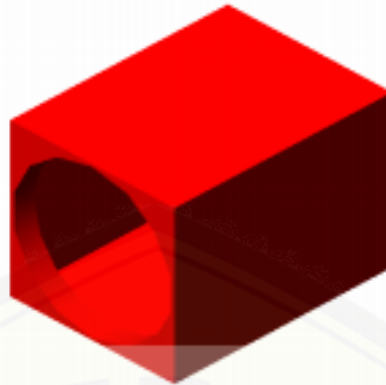
Merupakan komponen yang berputar dan berfungsi menghasilkan angin untuk memutar turbin angin yang akan akan diuji.



Gambar 2.2 *Blade wind tunnel*
(Taufik *et al*, 2011)

c. Ruang penenang (*settling chamber*)

Merupakan sebuah ruang pada terowongan angin yang berfungsi untuk mengurangi turbulensi aliran di dalam terowongan. Pada *settling chamber* diletakkan sarang lebah (*honey combs*) dan saringan kawat (*screen*)



Gambar 2.3 *Settling chamber*
(Fariduzzaman, 2008)

d. Saringan kawat (*Screen*)

Merupakan bagian yang berfungsi untuk mengurangi turbulensi aliran.

e. Nosel (*nozzel*)

Merupakan bagian yang sangat menentukan dalam pembentukan keseragaman kecepatan aliran udara pada seksi uji (*test section*)



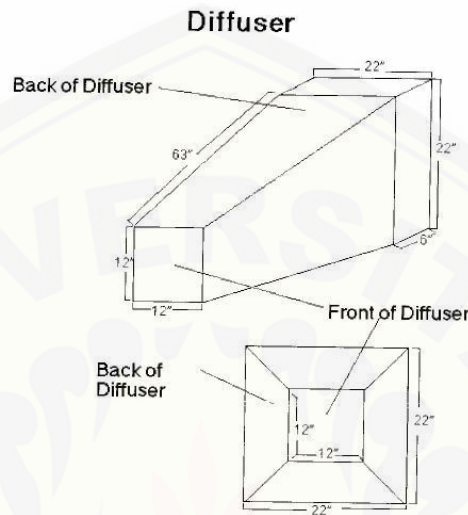
Gambar 2.4 Nosel *wind tunnel*
(Fariduzzaman, 2008)

f. Seksi Uji (*test section*)

Merupakan ruang pada terowongan angin yang berfungsi untuk meletakkan model yang akan dilakukan pengujian, misalnya turbin angin.

g. Difuser (*diffuser*)

Merupakan bagian yang berfungsi untuk mengkonversikan energi kinetik menjadi energi potensial.



Gambar 2.5 Konstruksi *diffuser wind tunnel*
(Fariduzzaman, 2008)

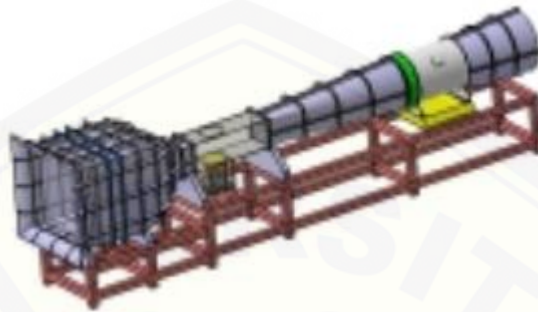
2.1.4 Jalur Rangkaian *Wind Tunnel*

Yang dimaksud jalur rangkaian adalah jalur lintasan udara yang melalui terowongan. Ada beberapa jalur rangkaian yang digunakan pada *wind tunnel* diantaranya (Fariduzzaman, 2008):

a. Rangkaian Terbuka (*open circuit tunnel*)

Pada tipe terowongan ini udara mengikuti jalur lurus dari jalur masuk melalui kontraksi keseksi uji, diikuti *diffuser*, rumah *fan*, dan saluran keluar ke udara. Ada beberapa keuntungan serta kerugian yang dimiliki oleh terowongan tipe ini, keuntungan yang diberikan diantaranya biaya konstruksi rendah, serta tidak ada masalah jika menggunakan motor pembakaran sebagai penggerak *blade* pada *fan wind tunnel* jika *inlet* dan *outlet* keduanya terbuka ke atmosfer. Sedangkan kerugian yang dihasilkan diantaranya membutuhkan penyaringan jika terowongan diletakkan didalam ruangan serta ketika *inlet/outlet* terbuka ke

atmosfer adanya angin dan cuaca dingin mempengaruhi kerja operasi dari *wind tunnel* itu sendiri. Kerugian berikutnya yaitu menghasilkan suara yang berisik sehingga mengakibatkan masalah lingkungan dan membatasi jam operasi.



Gambar 2.6 Terowongan angin sirkuit terbuka
(Fariduzzaman, 2008)

b. Rangkaian tertutup (*close circuit tunnel*)

Terowongan ini mempunyai jalur yang kontinyu untuk udara. Sebagian besar tipe ini adalah jalur tunggal (*single return*). Ada beberapa keuntungan serta kerugian yang dimiliki terowongan angin dengan tipe rangkaian tertutup diantara keuntungan tersebut adalah dengan kegunaan *corner turning vanes*, kualitas dari aliran dapat dengan mudah dikontrol, memerlukan energi yang lebih sedikit untuk ukuran dan kecepatan seksi uji tertentu hal ini penting untuk terowongan yang digunakan pengujian pengembangan dengan penggunaan yang tinggi, kemudian tidak terlalu menghasilkan suara yang berisik seperti pada terowongan angin tipe terbuka



Gambar 2.7 Terowongan angin sirkuit tertutup
(Fariduzzaman, 2008)

2.2 Brushless DC Motor (BLDC)

BLDC motor atau dapat disebut juga dengan BLAC motor merupakan motor listrik *synchronous* AC 3 fasa. Perbedaan pemberian nama ini terjadi karena BLDC memiliki BEMF berbentuk *trapezoid* sedangkan BLAC memiliki BEMF berbentuk *sinusoidal*. Keduanya memiliki struktur yang sama dan dapat dikendalikan dengan metode *six-step* maupun metode PWM *sinusoidal*. Jika dibandingkan dengan motor DC, BLDC memiliki biaya perawatan yang lebih rendah karena tidak menggunakan *brush* akan tetapi BLDC memiliki kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan motor DC. Dari segi efisiensi BLDC memiliki tingkat efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan motor induksi karena rotor dan torsi awal yang lebih tinggi serta rotor terbuat dari bahan permanen.

Secara umum motor BLDC terdiri dari dua bagian yakni, *rotor* merupakan bagian yang bergerak yang terbuat dari permanen magnet dan *stator* yaitu bagian yang tidak bergerak yang terbuat dari kumparan 3 fasa. Walaupun merupakan motor listrik *synchronous* AC 3 fasa, motor ini tetap disebut dengan BLDC karena pada penggunaannya BLDC menggunakan sumber DC sebagai sumber energi utama yang kemudian diubah menjadi tegangan AC dengan menggunakan *inverter* 3 fasa yang bertujuan untuk menciptakan medan magnet putar *stator* untuk menarik magnet rotor (Dharmawan, 2009).

Oleh karena tidak adanya *brush* pada motor BLDC, untuk menentukan *timing* komutasi yang tepat pada motor sehingga didapatkan torsi dan kecepatan yang konstan, diperlukan 3 buah sensor *hall* dan atau *encoder*. Pada sensor *hall*, *timing* komutasi ditentukan dengan cara mendeteksi medan magnet rotor dengan menggunakan 3 buah sensor *hall* untuk mendapatkan 6 kombinasi *timing* yang berbeda, sedangkan pada *encoder*, *timing* komutasi ditentukan dengan cara menghitung jumlah pola yang ada pada *encoder* (Dharmawan, 2009).

2.2.1 Prinsip Kerja Motor BLDC

Motor BLDC bekerja ketika *stator* yang terbuat dari kumparan diberikan arus 3 fasa sehingga mengakibatkan arus yang melewati kumparan pada *stator* timbul medan magnet (B):

$$B = \frac{\mu Ni}{2l} \quad (2.1)$$

Berdasarkan persamaan 2.1, N merupakan jumlah lilitan, I merupakan arus, l merupakan panjang lilitan dan μ merupakan permeabilitas bahan. Dikarenakan arus yang diberikan berupa arus AC 3 fasa *sinusoidal*, nilai medan magnet dan polarisasi setiap kumparan akan berubah-ubah setiap saat. Dengan adanya perubahan polarisasi dan besar medan magnet tiap kumparan mengakibatkan terciptanya medan magnet dengan kecepatan

$$N_s = \frac{120f}{p} \quad (2.2)$$

Dimana f merupakan frekuensi arus *input* dan p merupakan jumlah *pole rotor*. Motor BLDC berputar sebagai akibat dari interaksi magnet permanen pada *rotor* dengan medan magnet yang dihasilkan ketika tegangan DC terhubung pada satu kumparan *stator*. Untuk menjaga rotasi, orientasi dari medan magnet di *stator* harus diputar secara berurutan. Hal ini dilakukan dengan menghubungkan tegangan DC pada kumparan *stator* berikutnya agar *rotor* berputar (NEC Electronic corporation, 2006). Pada gambar 2.x berikut ditunjukkan bentuk sinyal pada tegangan *stator* motor BLDC yang berupa sinyal tiga fasa.

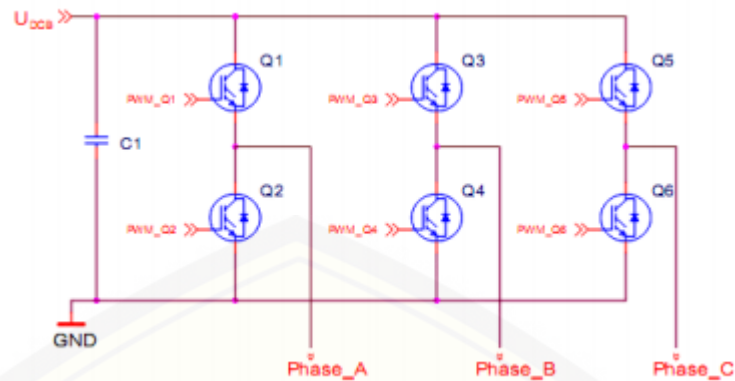


Gambar 2.8 Tegangan stator BLDC
(Miftachul, 2014)

Cara kerja sinyal diatas yaitu ketika *stator* A diberikan tegangan negatif maka akan timbul medan magnet dengan polaritas negatif sedangkan B dan C yang diberikan tegangan positif maka akan memiliki polaritas positif. Akibat adanya perbedaan polaritas antara medan magnet kumparan *stator* dan magnet *rotor*, maka sisi positif magnet *rotor* akan berputar mendekati medan magnet *stator* A, sedangkan sisi negatifnya akan berputar mengikuti medan magnet *stator* B dan C. akibat tegangan yang digunakan berupa tegangan AC *sinusoidal*, medan magnet *stator* A, B dan C akan berubah-ubah polaritasnya dan besarnya mengikuti perubahan tegangan *sinusoidal* AC. Ketika A dan B memiliki medan magnet negatif akibat mendapatkan tegangan negatif dan C memiliki medan magnet positif akibat tegangan positif, maka magnet permanen *rotor* akan berputar menuju ke polaritas yang bersesuaian yakni bagian negatif akan berputar menuju medan magnet *stator* C dan sebaliknya bagian positif akan berputar menuju medan magnet *stator* A dan B. Kemudian ketika B memiliki medan magnet negatif dan A serta C memiliki medan magnet positif, bagian positif magnet permanen akan berputar menuju B dan bagian negatif akan menuju A dari kumparan C. karena tegangan AC *sinusoidal* yang digunakan berlangsung secara kontinu, proses perubahan polaritas tegangan pada *stator* ini akan terjadi secara terus menerus sehingga menciptakan medan putar magnet *stator* dan magnet permanen *rotor* akan berputar mengikuti medan putar magnet *stator* ini. Hal inilah yang menyebabkan *rotor* pada BLDC dapat berputar (Dharmawan, Abe, 2009).

2.3 Inverter 3 Fasa

Definisi secara umum dari *inverter* adalah peralatan elektronika daya yang berfungsi mengubah tegangan searah (DC) menjadi tegangan bolak-balik (AC). Untuk dapat menjalankan motor BLDC diperlukan *inverter* 3 fasa yang terdiri dari 6 komponen *switching*. Pada perancangan alat ini menggunakan mosfet IRF 50N60. Susunan dari keenam komponen *switching inverter* 3 fasa ditunjukkan pada gambar 2.9 berikut



Gambar 2.9 *Inverter 3 fasa*
(Freescale, 2005)

Cara kerja *inverter* jenis ini ada 2 jenis, yaitu mode konduksi 120° dan mode konduksi 180° . Agar dapat berputar, kumparan *stator* motor BLDC yang aktif pada setiap *step*nya hanya dua buah dan satu buah kumparan lainnya *off* atau tidak teraliri listrik. Hal ini menyebabkan tiap *step*nya hanya diperbolehkan dua buah *switch* saja yang aktif secara bergantian sehingga mode konduksi 120° yang digunakan. Pada *inverter* 3 fasa dengan mode konduksi 120° memungkinkan setiap komponen pensakleran akan mengalami konduksi selama 120° dengan pasangan konduksi yang berbeda.

2.4 Pengendalian Motor BLDC

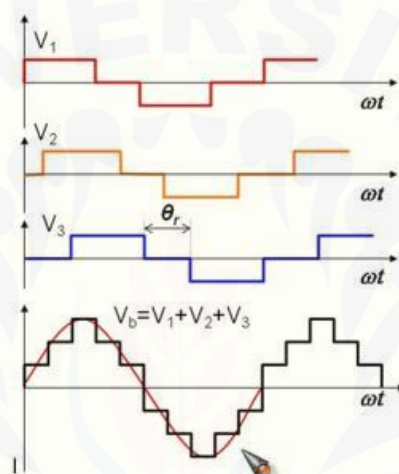
Terdapat dua metode yang dapat digunakan dalam pengendalian BLDC yakni metode konvensional atau metode *six-step* dan metode *sinusoidal*.

2.4.1 Metode *six step*

Metode *six step* merupakan metode yang paling sering digunakan dalam pengendalian BLDC komersial. Hal ini terjadi karena metode ini sederhana sehingga mudah diterapkan. Kelemahan dari metode ini ialah arus rms yang tinggi, rugi-rugi daya yang tinggi, dan bising. Hal ini terjadi sebagai akibat karena PWM yang digunakan dalam metode ini merupakan PWM *square* dengan frekuensi tertentu sehingga menciptakan gelombang AC yang berbentuk *trapezoid* atau *square*. Akibat dari gelombang yang berbentuk *square* ini timbul gelombang

harmonik. Gelombang harmonik inilah yang menyebabkan motor menjadi bising ketika berputar.

Metode ini disebut *six-step* karena agar mampu menciptakan gelombang *trapezoid* atau *square* yang menyerupai gelombang sinusoidal, digunakan PWM *square* yang terdiri dari 6 bagian yaitu 2 bagian positif, 2 bagian negatif, dan 2 bagian *floating*. Masing-masing bagian memiliki besar sudut penyalan 60° gelombang *sinusoidal*. Kondisi *floating* pada algoritma ini adalah ketika gelombang *sinusoidal* berpotongan pada titik 0.



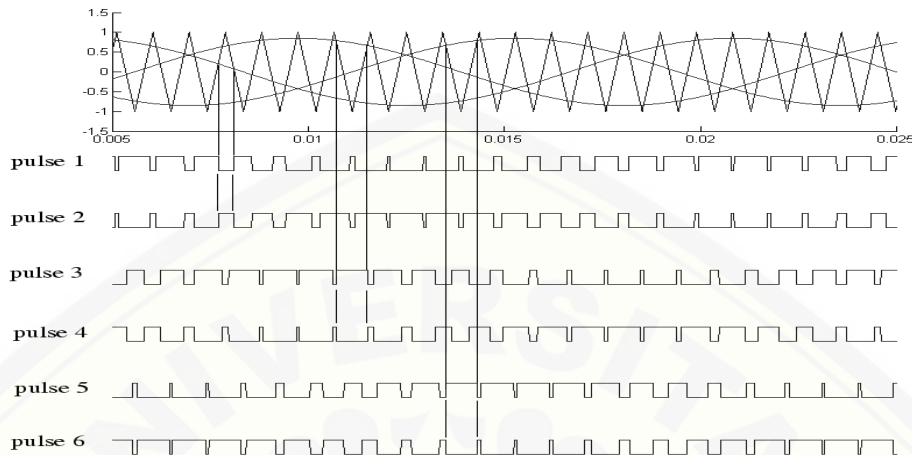
Gambar 2.10 Metode PWM *six step*
(Fendy, Kadek. 2008)

Kemudian untuk membentuk gelombang *trapezoid* atau gelombang *square* 3 fasa seperti yang ditunjukkan gambar 2.x maka digunakan 3 buah algoritma *six-step* yang masing-masing berbeda satu *step* (60°) antara satu algoritma dengan algoritma lainnya

2.4.2 Metode PWM Sinusoidal

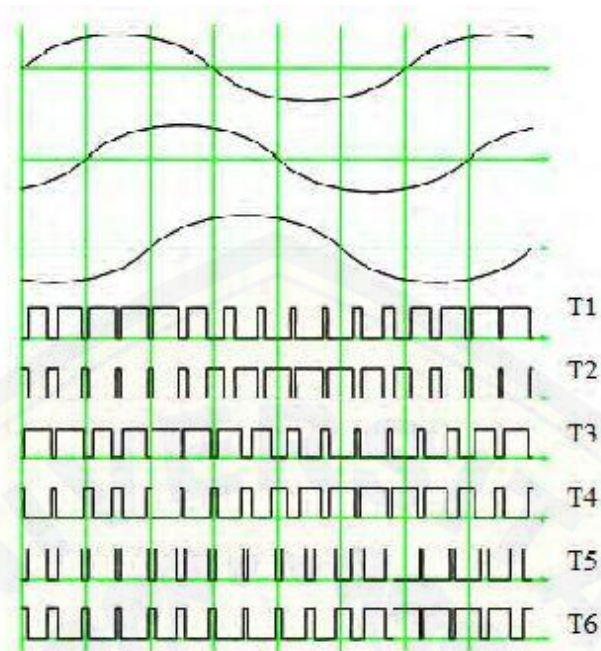
PWM sinusoidal bertujuan untuk menciptakan gelombang sinusoidal sebagai masukan motor. Kelebihan dari pengendalian ini adalah memiliki arus rms yang lebih kecil dibandingkan metode six step, rugi-rugi daya yang kecil, dan tidak bising karena pada gelombang *sinusoidal* tidak terdapat harmonik. Namun metode ini jarang digunakan karena rumit dalam pembangkitan sinyal PWM *sinusoidal*. Pembangkitan PWM *sinusoidal* dilakukan dengan cara membandingkan sinyal *sinusoidal* dengan sinyal segitiga yang memiliki frekuensi

lebih tinggi. Ketika sinyal segitiga dan sinyal *sinusoidal* ini berpotongan pada dua titik, sebuah sinyal PWM akan terbentuk.



Gambar 2.11 Pembentukan sinyal PWM sinusoidal
(www.web/help/toolbox/powersys/pwmgenerator.html)

Besar resolusi PWM yang dihasilkan sangat tergantung dari frekuensi sinyal segitiga yang digunakan. Semakin besar frekuensi sinyal segitiga yang digunakan, resolusi PWM yang dihasilkan semakin baik serta semakin tinggi resolusi PWM yang digunakan semakin sempurna gelombang *sinusoidal* yang terbentuk. Dalam penggunaannya gar dapat mengendalikan keenam transistor pada driver maka sinyal pwm sinusoidal yang didapatkan dibagi menjadi 6 bagian atau step. Masing-masing bagian atau step besarnya 60° . hal ini terjadi karena perbedaan tiap fasa dari sinyal 3 fasa adalah 120° dan tiap 60° terdapat gelombang sinusoidal yang berpotongan dengan nilai 0. Oleh karena itu sinyal pwm tersebut harus dibagi menjadi 6 bagian untuk menunjang proses komutasi pada BLDC.



Gambar 2.12 implementasi PWM sinusoidal.
(Abe, 2009)

Secara umum perangkat pembangkit sinyal PWM akan terdiri dari rangkaian pembangkit sinyal modulasi, rangkaian pembangkit sinyal *carier* dan rangkaian pembanding. Disamping itu untuk sistem tiga fasa, akan diperlukan rangkaian penggeser fasa dan rangkaian pembalik sinyal PWM untuk mengontrol saklar-saklar yang berada pada lengan *inverter* yang berlawanan. Teknik pembangkitan gelombang PWM lainnya adalah secara digital. Pembangkitan ini biasanya dilakukan menggunakan *mikrokontroler* dengan metode *time proportioning*, metode ini memanfaatkan fitur *counter* yang terdapat pada *mikrokontroler* yang akan bertambah secara periodis yang terhubung langsung dengan *clock*/pendetak rangkaian *mikrokontroler*. *Counter* akan mengalami *reset* pada akhir setiap periode dari PWM. Ketika nilai *counter* lebih dari nilai referensinya, keluaran PWM berubah dari kondisi *HIGH* ke *LOW* begitu juga sebaliknya sesuai dengan pengaturan pada program. Pertambahan nilai dari *counter* mirip dengan metode gelombang gigi gergaji. Hanya saja penggunaan *counter* adalah versi *diskret* dari metode interseksi. Tingkat ketelitian pada PWM digital sangat dipengaruhi oleh resolusi *counter*. Semakin tinggi nilai resolusinya

maka akan diperoleh hasil yang lebih baik. Prinsip pembangkitan PWM dengan menggunakan MK diperlihatkan pada gambar 2.x dari gambar tersebut dapat dilihat bahwasanya pulsa *duty-cycle* PWM dibangkitkan melalui sebuah fungsi yang disebut PWM *auto reload timer* dimana durasi *ON* dan *OFF* ditentukan dari perbandingan *duty-cycle register* dengan *auto-reload register* pada *counter*. Frekuensi sinyal PWM ditentukan oleh periode *counter*, nilai dari *auto reload register* (ARR) dan jumlah bit dari mikrokontroler seperti ditunjukkan pada persamaan berikut ini

$$F_{\text{pwm}} = \frac{1}{256 - \text{nilai ARR}} \quad (2.3)$$

Pada penggunaannya agar dapat mengendalikan keenam transistor pada driver, sinyal PWM *sinusoidal* yang didapatkan dibagi menjadi 6 bagian atau *step* dimana masing-masing bagian atau *step* besarnya 60° . Hal ini terjadi karena perbedaan tiap fasa dari sinyal 3 fasa adalah 120° dan tiap 60° terdapat gelombang *sinusoidal* yang berpotongan dengan nilai 0. Oleh karena itu sinyal PWM tersebut harus dibagi menjadi 6 bagian untuk menunjang proses komutasi pada BLDC.

2.4.3 Perbandingan Metode *Six-Step* dan Metode PWM *Sinusoidal*

Metode PWM *sinusoidal* memiliki arus rms lebih kecil dibandingkan metode *six-step*, hal ini terjadi karena metode PWM *sinusoidal* akan menghasilkan gelombang *sinusoidal* yang besar arus yang berubah terhadap waktu sedangkan PWM *six-step* sinyal yang terbentuk dari PWM ini merupakan sinyal *square* atau *trapezoid*, nilainya sebagian besar tetap setiap waktu. Besar arus yang dihasilkan oleh kedua metode tersebut pada kondisi daya *output* yang sama:

- a. PWM *six-step*

$$I_{\text{av}} = 2 \frac{i_d}{3}$$

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = 0.8165 I_d \quad (2.4)$$

b. PWM *sinusoidal*

$$I_{av} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\pi}{3} \right) I_d$$

$$I_{rms} = \left(\frac{\pi}{3\sqrt{2}} \right) I_d = 0.74 I_d \quad (2.5)$$

Dimana I_{av} merupakan arus rata-rata dan I_d merupakan arus DC *link*. Besar arus rata-rata adalah dua pertiga arus DC link karena setiap fasa hanya aktif selama 120° bukan 180° . Dengan membandingkan kedua I_{rms} dari masing-masing metode didapatkan:

$$I_{rms}(\sin) = 0.906 I_{rms}(\text{six-step}) \quad (2.6)$$

Berdasarkan persamaan (2.6) dapat dilihat bahwa arus rms dengan menggunakan PWM *sinusoidal* lebih kecil dibandingkan dengan PWM *six-step* sehingga rugi-rugi daya yang ditimbulkan lebih kecil. Pada pengendali *six-step*, ketika suara “bising” akan timbul ketika motor berputar, hal ini terjadi karena adanya harmonik pada frekuensi ganjil pada gelombang *square* atau *trapezoid* yang terbentuk. Selain itu dengan adanya harmonik timbul pula *ripple* pada torsi motor.

2.4.4 Metode Pendeteksian Perubahan Komutasi

Dalam pengendalian BLDC yang baik (kecepatan dan torsi konstan) maka diperlukan adanya *timing* perubahan komutasi yang tepat. Apabila *timing* perubahan komutasi tidak tepat maka motor BLDC akan mengalami slip. Akibat adanya slip adalah kecepatan dan torsi motor tidak konstan. Hal ini akan terlihat pada saat motor berada dalam kecepatan putar yang tinggi. Ketika terjadi slip, kecepatan motor akan cenderung turun dan memiliki kemungkinan motor berhenti berputar. Untuk menentukan *timing* perubahan komutasi terdapat dua metode yang digunakan yakni metode *sensorless* dan dengan menggunakan sensor. Metode *sensorless* dilakukan dengan cara mendeteksi BEMF dan *zero crossing* pada fasa motor yang mengalami kondisi *floating* (hanya terdapat pada metode *six-step*) sedangkan metode dengan menggunakan sensor adalah dengan menggunakan *encoder* dan sensor *hall*. Kedua metode ini memiliki kelebihan dan

kelemahan. Pada metode *sensorless*, metode ini tidak dapat digunakan pada kumparan yang tidak dialiri arus (*floating*) nilainya cukup kecil sehingga tidak dapat digunakan pada metode pengendalian *sinusoidal* karena pada metode ini tidak terdapat satu fasa pun yang mengalami kondisi *floating*. Kelebihan dari metode ini adalah spesifikasi motor secara fisik tidak diperlukan dan cenderung lebih murah karena tidak menggunakan alat tambahan (sensor tambahan) sedangkan penggunaan sensor memiliki kelebihan yaitu motor dapat berputar pada kecepatan yang rendah dan dapat digunakan pada kedua metode pengendalian motor. Kelemahan dari penggunaan sensor adalah fisik motor diperlukan dalam menentukan posisi sensor dan cenderung lebih mahal (Dharmawan, 2009).

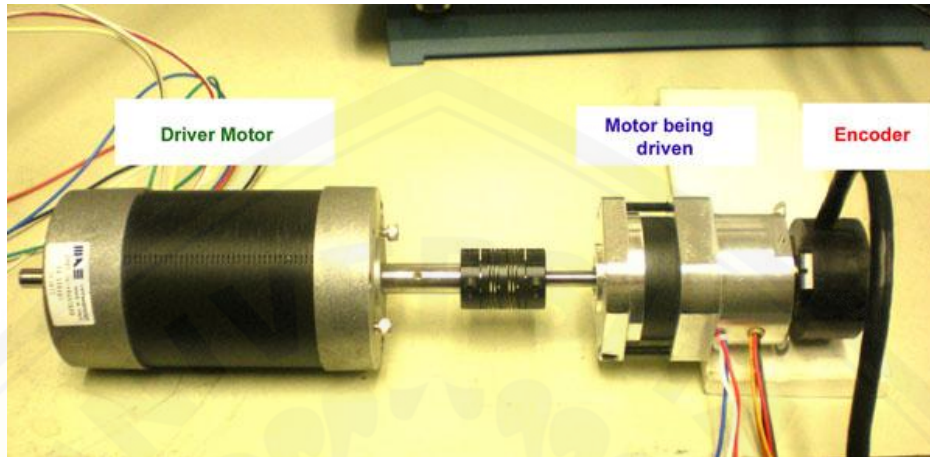
2.4.5 Back EMF dan Zero crossing

Pendeteksian dengan menggunakan *back EMF* (BEMF) dan *zero crossing* dapat disebut dengan pendeteksian *sensorless* karena pendeteksian ini dilakukan dengan cara mendeteksi tegangan yang timbul akibat induksi magnet rotor pada salah satu kumparan stator yang mengalami kondisi *floating*. Kondisi *floating* merupakan kondisi dimana suatu fasa tidak terdapat arus yang mengalir (tidak aktif) dan terjadi tiap 60° .

2.5 Encoder

Encoder sering dijumpai pada implementasi motor komersial. Hal ini karena *encoder* mampu memberikan timing komutasi yang lebih tepat dibandingkan dengan sensor hall dan lebih mudah diimplementasikan akan tetapi *encoder* memiliki kelemahan yaitu suatu *encoder* tidak dapat digunakan untuk motor dengan jumlah *pole* yang berbeda dan letak suatu kode komutasi pada *encoder* harus dipresisikan dengan letak *pole* motor. Hal ini terjadi karena kode komutasi suatu *encoder* hanya dikondisikan untuk satu jenis motor dengan jumlah *pole* tertentu dan apabila letak dari kode komutasi *encoder* tidak sesuai dengan *pole* motor, maka akan terjadi kesalahan dalam penentuan timing komutasi. Untuk

menentukan timing perubahan komutasi dengan *encoder* dapat dilakukan dengan cara membaca kode komutasi pada *disk code* dengan menggunakan sensor optik.



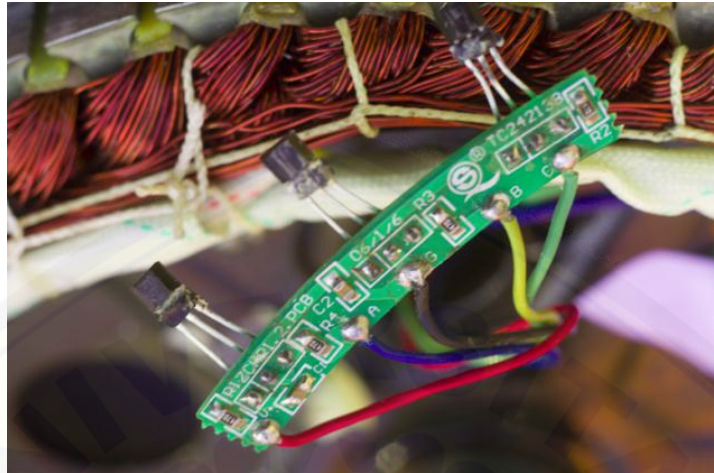
Gambar 2.13 BLDC motor dengan Encoder
(<https://quantumdevices.wordpress.com>)

2.5.1 Sensor *hall*

Salah satu cara untuk menentukan *timing* perubahan komutasi yang tepat adalah dengan menggunakan 3 buah sensor *hall*. Pada umumnya ketiga sensor *hall* terpisah 120° satu dengan lainnya walaupun pada kondisi khusus tidak. Kondisi khusus adalah pada motor BLDC yang memiliki *pole* dalam jumlah banyak (diatas 6 *pole*). Kelebihan dari penggunaan sensor *hall* ini adalah peletakkan dari sensor *hall* awal tidak perlu presisi dengan rotor selain itu untuk motor dengan *pole* yang berbeda cukup menggeser letak dari sensor *hall*. Kelemahan dari sensor *hall* adalah apabila letak sensor *hall* tidak tepat satu dengan lainnya, kesalahan dalam penentuan *timing* perubahan komutasi dapat terjadi bahkan ada kemungkinan tidak didapatkannya 6 kombinasi yang berbedea. Apabila posisi salah satu atau ketiga sensor *hall* tidak berbeda terlalu jauh dengan letak sensor *hall* yang seharusnya 120° , posisi dalam implementasi 118° , perbedaan itu dapat dikompensasi dalam algoritma pengendalian atau bahkan dapat diabaikan.

Hall sensor atau *hall effect* sensor merupakan sensor yang digunakan untuk mendeteksi medan magnet. Dalam penggunaannya pada motor BLDC kapanpun kutub magnetik rotor (*north* atau *south*) mendeteksi sensor *hall* maka

akan menghasilkan sinyal *high* atau *low* yang mana dapat digunakan untuk mendeteksi posisi rotor.



Gambar 2.14 Penempatan sensor *hall* pada stator BLDC
(<https://quantumdevices.wordpress.com>)

2.6 Pulse Width Modulation (PWM)

2.6.1 Dasar Pembangkitan PWM

Metode PWM adalah metode yang cukup efektif untuk mengendalikan kecepatan motor. Cara kerjanya adalah mengatur presentase lebar pulsa *high* terhadap periode dari suatu sinyal persegi dalam bentuk tegangan periodik yang diberikan ke motor sebagai sumber daya. Semakin besar perbandingan lama sinyal *high* dengan periode sinyal maka semakin cepat motor berputar. Sinyal PWM dapat dibangun dengan menggunakan metode analog yakni dengan rangkaian *op-amp* atau dengan menggunakan metode digital.

2.6.2 Pengaturan Kecepatan dengan Kontrol PWM

Pada penerapannya *inverter* dikontrol oleh suatu modulasi PWM, yang berarti bahwa *inverter* tersebut dapat mengubah-ubah tegangan *output* dengan *duty cycle* yang berbeda, hal inilah yang digunakan untuk mengontrol kecepatan (Sunplus, 2006).

2.7 PID Controller

Kontrol PID merupakan sebuah kontrol yang terdiri dari kombinasi beberapa kontroler yaitu *propotional*, *integral* dan *derivative*. Ketiga kontroler tersebut bekerja bersama-sama sehingga dapat menghasilkan suatu keluaran sistem kontrol yang baik dikarenakan jika berdiri sendiri maka hasil yang dicapai kurang baik.

Kontrol *proportional* adalah suatu kontroler yang berfungsi sebagai penguat linier yang dapat diatur penguatannya. Hubungan matematis antara keluaran kontroler $m(t)$ dan sinyal kesalahan $e(t)$ adalah

$$m(t) = K_p e(t) \quad (2.7)$$

dimana : K_p = gain *proportional*
 $m(t)$ = keluaran kontrol
 $e(t)$ = sinyal kesalahan (*error*)

kontrol *proportional* integral adalah suatu kontroler dimana kontroler ini merupakan perubahan dari keluaran kontrol *integral* $m(t)$ berubah dengan fungsi waktu yang sebanding dengan sinyal kesalahan. Hubungan matematis antara keluaran $m(t)$ dan sinyal kesalahan $e(t)$ adalah

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2.8)$$

dimana: K_p = gain *proportional*
 T_i = waktu *integral*

Ketetapan waktu T_i merupakan sistem yang berfungsi mengatur aksi kontrol integral, sedangkan K_p berfungsi memperkuat bagian *proportional* maupun bagian integral dari aksi kontrol. Untuk mengembalikan atau merupakan kebalikan dari sistem ini adalah penggunaan laju *reset*. Laju *reset* adalah

banyaknya pengulangan bagian proporsional dari aksi pengontrolan per detik. Secara matematis kontrol *proportional derivative* nampak sebagai berikut:

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.9)$$

dimana : K_p = gain proportional

T_d = ketetapan waktu

Kontrol derivative sering juga disebut kontrol laju (*rate control*) karena besar keluaran yang dihasilkan oleh kontroler ini sebanding dengan laju perubahan sinyal kesalahan. Ketetapan waktu turunan T_d adalah selang waktu bertambah majunya respon kontrol *proportional* yang disebabkan oleh aksi laju (*rate action*). Kontroler PID merupakan kombinasi antara kontroler *proportional*, *integral*, dan kontrol *defferensial* (turunan). Kombinasi kontroler ini mempunyai keunggulan dalam memperbaiki kesalahan sinyal dibandingkan jika masing-masing kontroler tersebut berdiri sendiri. Secara matematis kontroler PID dapat ditunjukkan sebagai berikut:

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.10)$$

Ada beberapa metode yang digunakan untuk menentukan parameter PID diantaranya adalah metode coba-coba (*cut and try method*), metode *Ziegler-nichols* dan metode tanggapan tangga tentunya masing-masing metode memiliki keunggulan dan kelemahan masing-masing.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Listrik Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember, sedangkan waktu pelaksanaan mulai dari studi pustaka hingga penyusunan laporan kurang lebih selama 6 bulan seperti yang ditunjukkan pada tabel di bawah ini.

Tabel 3.1 Jadwal kegiatan penelitian

No.	Kegiatan	Bulan					
		I	II	III	IV	V	VI
1.	Studi Literatur	■	■				
2.	Perancangan Alat		■	■			
3.	Pembuatan Alat			■	■	■	
4.	Uji Coba dan Pengamatan				■	■	
5.	Analisa data dan Pembahasan				■	■	
6.	Penyusunan Laporan					■	■

3.2 Metode Penelitian

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini ada beberapa langkah yang dilakukan diantaranya:

3.2.1 Perancangan Alat dan Pembuatan *Hardware*.

Proses ini merupakan tahapan selanjutnya yang dilakukan penulis setelah melakukan konsultasi pada dosen pembimbing. Pada tahapan ini proses penerjemahan perencanaan serta perancangan yang telah dilakukan diwujudkan ke dalam sebuah pembuatan hardware sesungguhnya yang dimulai dari pembuatan rangkaian dengan menggunakan software pada computer kemudian penyablonan pada pcb serta pemasangan komponen sekaligus uji coba alat.

3.2.2 Uji Coba dan Pengamatan

Pada tahapan ini *hardware* yang telah selesai dibuat diuji serta di amati bagaimana hasil keluaran yang dihasilkan oleh *hardware* tersebut jika hasil yang didapat tidak sesuai dengan perencanaan awal maka proses selanjutnya yang dilakukan adalah memperbaiki *hardware* tersebut hingga hasil yang didapat sesuai dengan perencanaan yang telah dilakukan

3.2.3 Analisis data dan Pembahasan

Pada tahapan ini yaitu menganalisa *hardware* yang telah selesai dibuat serta dilakukan pembahasan terhadap parameter-parameter yang telah ditentukan pada tugas akhir ini.

3.2.4 Penulisan Laporan

Pada proses ini merupakan proses akhir dari penelitian yang mana hasil dari semua data yang didapatkan dan dianalisis akan dipaparkan pada bagian ini.

3.3 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini, antara lain:

3.3.1 Perangkat Lunak

- *Easily Applicable Graphical Layout Editor (EAGLE)* versi 5.7.0
- *Notepad*

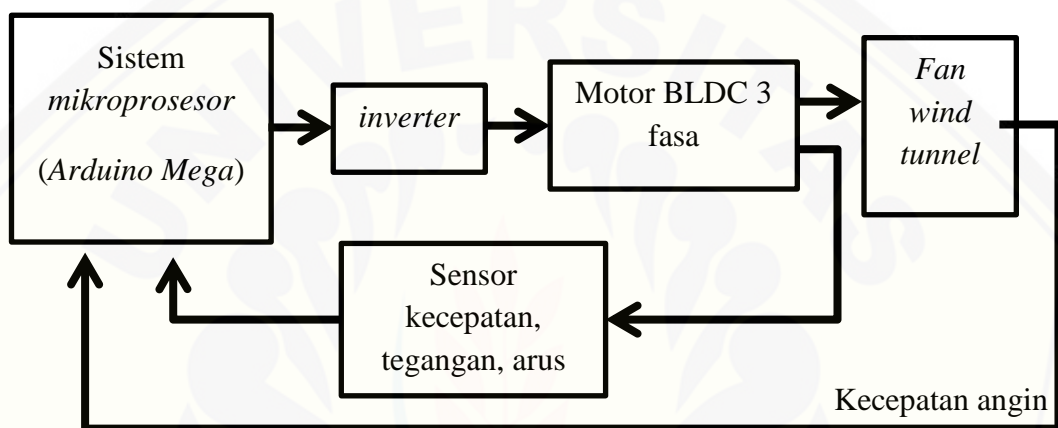
3.3.2 Alat dan bahan

- a. 1 buah motor BLDC 3 fasa dengan spesifikasi:
 1. Daya 103 watt
 2. Tegangan input 24 V DC
 3. Maksimum putaran 1260 RPM
- b. Solder
- c. *Cutter*
- d. Multimeter analog
- e. *Anemometer* digital
- f. Power supply
- g. *Arduino Mega 2560*
- h. *Driver* motor BLDC
- i. *Software* arduino
- j. *Osciloscop*
- k. *Inverter* 3 fasa
- l. LCD 16 x 2
- m. Plat seng
- n. *Fan* untuk motor

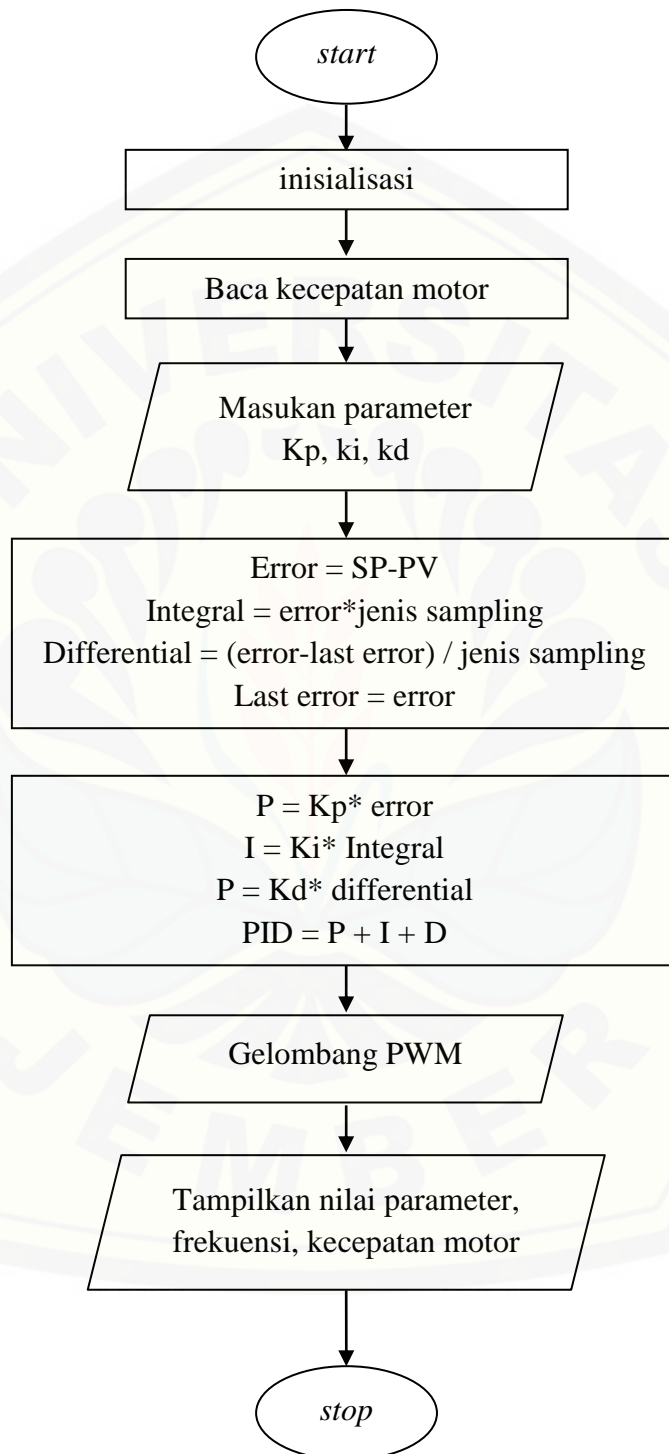
3.4 Diagram Alir

3.4.1 Diagram Alir Sistem Secara Keseluruhan.

Sebagai panduan untuk melakukan perancangan Kontrol Kecepatan motor BLDC 3 fasa Menggunakan PID *Controller* Pada *Wind Tunnel* Sebagai *Prototipe* Pengujian Turbin Angin maka dibuatlah sebuah blok diagram guna untuk mempermudah pemahaman terhadap konsep cara kerja sistem, yaitu seperti blok berikut ini:



Gambar 3.1 Blok sistem secara keseluruhan

3.4.2 Diagram Alir PID *Controller*Gambar 3.2 Diagram alir PID *controller* pada kecepatan motor BLDC 3 fasa

Prinsip kerja program utama kontroler PID ini meliputi proses inisialisasi, *tuning parameter*, akumulasi *error* dan perhitungan PID yang nantinya berfungsi sebagai masukan untuk memutar motor. *Error* dan *last error* yang akan dijadikan perhitungan aksi kontroler PID. Tiap satu kali *looping program*, *error* akan diperbaharui dengan data yang diambil dari sensor, dan sebelumnya akan disimpan pada *last error*. Keluaran dari hasil perhitungan program kontroler PID ini adalah nilai PWM yang nantinya sebagai masukan pada *inverter*. Secara matematis nilai dari parameter-parameter tersebut dapat dicari dari persamaan berikut ini:

$$Error = SP - PV \quad (3.1)$$

$$PWM \text{ motor} = \text{base PWM} + PID \quad (3.2)$$

Dimana SP (*set point*) merupakan suatu nilai parameter acuan sedangkan PV (*present value*) adalah nilai pembacaan yang dilakukan oleh sensor pada plan yang kemudian dilakukan umpan balik pada sistem.

3.4.3 Metode Penentuan Nilai Kp, Ki dan Kd

Dalam menentukan nilai parameter Kp, Ki serta Kd pada penelitian ini yaitu dengan cara *try and error* atau metode coba-coba dimana memasukkan nilai-nilai parameter tersebut secara coba-coba kemudian diterapkan pada sistem selanjutnya diamati respon sistem terhadap nilai Kp, Ki serta Kd tersebut jika respon sistem menunjukkan kurang baik maka dilakukan perubahan terhadap nilai parameter Kp, Ki ataupun Kd kemudian dilakukan uji coba pada sistem sampai ditemukan respon yang baik yaitu yang paling mendekati terhadap set point yang ditentukan. Setelah diperoleh respon yang paling mendekati maka nilai parameter Kp, Ki dan Kd itulah yang selanjutnya akan diterapkan pada sistem.

3.5 Sistem Mikroprosesor

Pada rancang bangun sistem ini digunakan sebuah sistem *mikroprosesor* berbasis *arduino* dengan spesifikasi *arduino mega* yang akan digunakan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

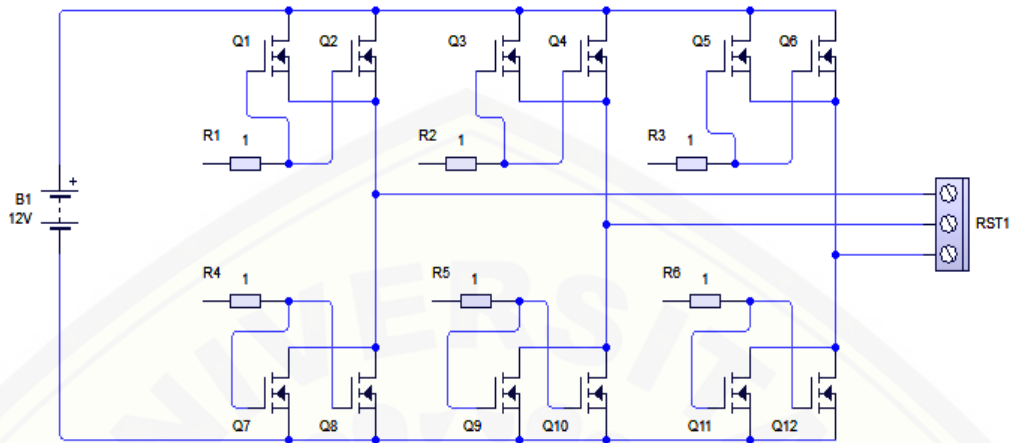
Tabel 3.2 Spesifikasi *Arduino Mega*

Mikrokontroler	Atmega2560
Tegangan operasi	5 volt
Tegangan input yang direkomendasikan	7 - 12 volt
Pin digital I/O	54 (15 diantaranya dapat digunakan sebagai PWM)
Pin <i>analog input</i> (ADC)	16
Arus DC setiap pin I/O	20 mA
Arus DC untuk pin 3,3 Volt	50 mA
<i>Flash Memory</i>	256 KB
SRAM	8 KB
EPROM	4 KB
<i>Clock Speed</i>	16 MHz

3.6 Inverter 3 Fasa

Pada tugas akhir ini digunakan sebuah *inverter* 3 fasa yang berfungsi untuk menyuplai tegangan pada motor yang akan menggerakkan *fan* pada *wind tunnel*. *Inverter* yang dirancang pada penelitian ini menggunakan komponen utama berupa 6 buah mosfet 50N60 dan tegangan masukan berasal dari sumber 1 fasa yaitu 220 volt AC. Pada penelitian ini untuk mengamankan rangkaian *switching* dan beban dari arus berlebih serta gangguan lainnya maka digunakan sebuah IC *driver* IR2110, disamping itu *driver* ini juga mampu menyediakan *dead time*, sehingga tidak memerlukan lagi *dead time* pada pembangkitan PWM 3 fasa yang digunakan. MOSFET ini memiliki kemampuan *switching* diatas 50 KHz, batas kemampuan tegangan *drain-source* sampai 500 V dan arus *drain* ID 20 ampere. Untuk menentukan tegangan keluaran dari *inverter* dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

Gambar rangkaian *inverter* 3 fasa pada rancang bangun ini dapat dilihat pada gambar berikut ini



Gambar 3.3 Rangkaian *Inverter* 3 Fasa

Untuk mendapatkan hasil keluaran rangkaian *inverter* 3 fasa yang berkualitas maka diperlukan perhitungan komponen-komponen yang tepat karena jika perhitungan tidak tepat maka akan menghasilkan keluaran yang tidak baik seperti munculnya *ripple* tegangan serta arus yang terlalu besar. Inverter tersebut akan memberikan tegangan ke kumparan motor sesuai dengan data yang diterima dari sistem trigger. Karena output berupa sinyal tiga fasa maka daya input ke motor dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut

$$P_{3\phi} = 3 \times V_L \times I_L \times \cos\phi \quad (3.3)$$

dimana :

$P_{3\phi}$ = daya tiga fasa (watt)

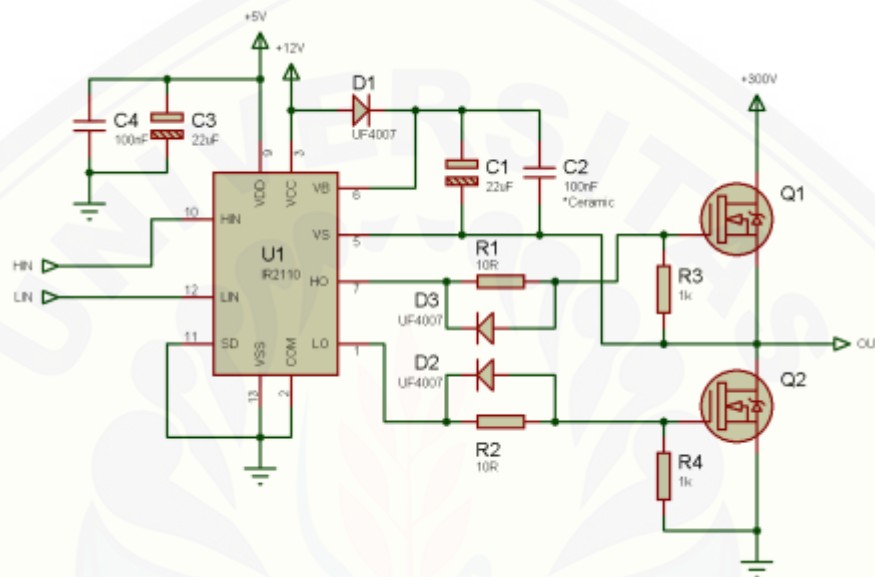
V_L = tegangan fasa (volt)

I_L = arus fasa

$\cos\phi$ = faktor daya

3.7 Rangkaian *Driver* Mosfet

Rangkaian *driver* mosfet berfungsi sebagai pemisah antara rangkaian power dengan rangkaian kontrol atau isolator dari rangkaian tegangan rendah ke rangkaian tegangan tinggi. Pada tugas akhir ini digunakan IC *driver* mosfet tipe IR2110 sebanyak tiga buah sebagai penghubung *optocoupler* dengan *inverter* tiga fasa.



Gambar 3.4 Skematik *Driver* Mosfet

3.8 Pengkonversian Putaran Besaran Kecepatan Motor Terhadap Kecepatan Angin

Untuk dapat memperoleh besaran kecepatan angin dari hasil putaran motor (RPM) maka digunakanlah sebuah formula persamaan sebagai berikut:

$$\text{RPM to Rad} = (2\pi(22/7)/60) \times \text{RPM} \quad (3.4)$$

$$V = \text{RPM to Rad} \times r \quad (3.5)$$

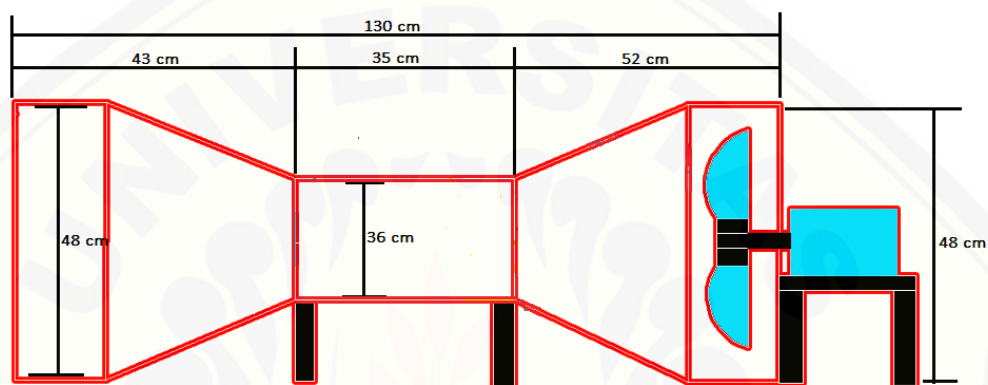
dimana:

RPM = putaran putaran motor.

r = jari-jari (jarak antyara sensor keceptan terhadap poros rotor pada motor.

3.9 Perencanaan Desain *Wind Tunnel*

Pada perencanaan desain *wind tunnel* ini mengacu pada Pada penelitian sebelumnya yaitu pada tugas akhir yang berjudul analisis pengaruh pembebanan terhadap kinerja kincir angin tipe *propeller* pada *wind tunnel* sederhana yang dilakukan oleh Ikhwanul Ikhsan dan M. Akbar Hipi (2011) dimana gambar instalasi dari *wind tunnel* itu sendiri sebagai berikut:



Gambar 3.5 Dimensi perancangan konstruksi *wind tunnel*



Gambar 3.6 Hasil implementasi *wind tunnel*

BAB. 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan pada penelitian dengan judul “Rancang Bangun Kontrol Kecepatan Motor BLDC Pada *Wind Tunnel* Sebagai *Prototipe* Pengujian Turbin Angin” maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Rancang bangun kontrol BLDC yang telah dibuat berhasil diterapkan pada motor BLDC sesuai dengan perencanaan.
2. Semakin tinggi nilai tegangan yang dihasilkan maka semakin kecil putaran motor yang didapat hal ini dapat kita tinjau pada saat nilai tegangan 40,5 *volt* maka nilai putaran motor yang dihasilkan sebesar 780 RPM sedangkan pada saat nilai tegangan 24,01 *volt* nilai putaran motor yang didapatkan sebesar 1090 RPM.
3. Semakin besar nilai arus maka akan semakin besar nilai putaran motor yang didapat. Hal terlihat saat nilai arus sebesar 0,52 A maka nilai putaran motor yang didapat sebesar 960 RPM kemudian saat nilai arus 1,26 A maka nilai putaran motor yang didapat sebesar 1070 RPM.
4. Semakin tinggi nilai arus yang diperoleh maka semakin tinggi pula kecepatan angin yang diperoleh tentunya diiringi semakin tinggi pula nilai putaran motor yang diperoleh. Terbukti pada saat nilai arus sebesar 0,11 A maka kecepatan angin sebesar 1,36 m/s dengan putaran motor sebesar 480 RPM sedangkan pada saat arus sebesar 0,84 A kecepatan angin yang diperoleh sebesar 3,04 m/s dengan nilai putaran motor sebesar 1060 RPM.
5. Ketika menggunakan kontrol PID untuk mencapai *set point* yang ditentukan membutuhkan waktu sedikit lebih lama dibandingkan tanpa menggunakan kontrol PID, hal ini dapat terlihat untuk mencapai putaran motor 1060 RPM membutuhkan waktu 4,8 detik sedangkan ketika tidak menggunakan kontrol PID untuk mencapai *set point* tersebut membutuhkan waktu 1,2 detik.

6. Saat menggunakan kontrol PID setelah mencapai *set point* yang ditentukan kecepatan motor mengalami sedikit perubahan namun tidak terlalu jauh dari *set point* sedangkan ketika tanpa menggunakan kontrol PID setelah mencapai *set point* kecepatan mengalami perubahan yang cenderung *fluktuatif* dan cenderung menjauhi *set point*, hal ini dapat terlihat saat menggunakan kontrol PID setelah mencapai *set point* putaran 1060 RPM kecepatan mengalami perubahan secara berturut-turut 1040 RPM, 1060 RPM dan 1040 RPM akan tetapi saat tidak menggunakan kontrol PID setelah mencapai *set point* 1060 RPM kecepatan motor mengalami perubahan secara berturut-turut 1070 RPM, 1040 RPM, 1020 RPM, 1090 RPM, dan 1100 RPM.

5.2 Saran

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat dilakukan untuk langkah selanjutnya guna menyempurnakan hasil penelitian ini sehingga dapat digunakan untuk keperluan lebih lanjut yaitu antara lain:

1. Perlu adanya objek *real* pada *wind tunnel* misalnya prototipe turbin angin sehingga dapat diperoleh gambaran turbin angin seperti apa yang cocok untuk karakter kecepatan angin sekian (1-3 m/s).
2. Untuk pengembangan selanjutnya perlu dipertimbangkan untuk penggunaan spesifikasi motor yang mempunyai putaran motor (RPM) yang tinggi sehingga dapat diperoleh kecepatan angin yang tinggi pula.

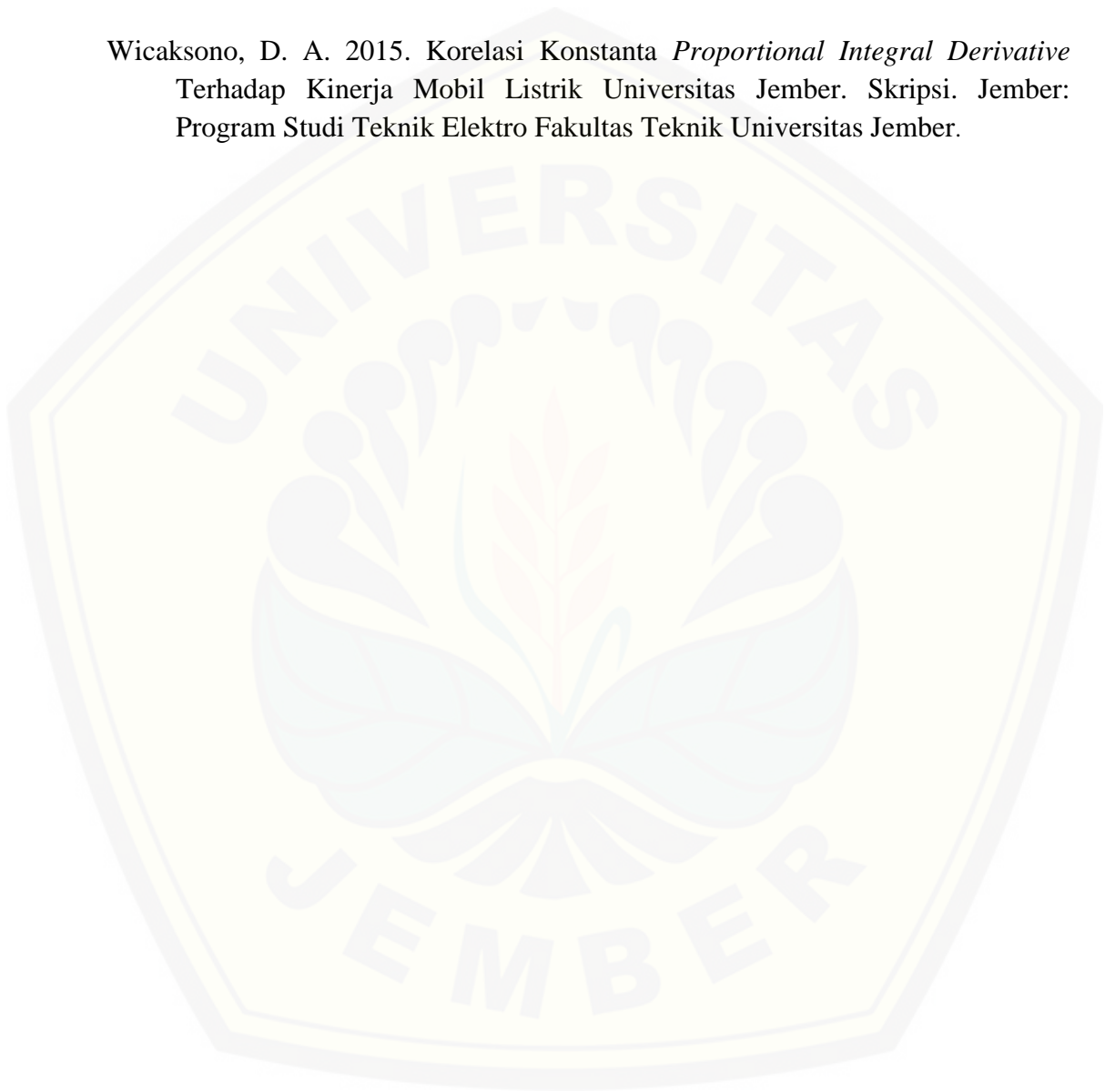
DAFTAR PUSTAKA

- Andi, K. N., Hariyanto, H. 2012. *Perencanaan Control PID Pada Motor Induksi Berbasis Matlab Simulink*. Semarang: Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Semarang.
- Badan Penerbit Universitas Jember. 2016. *Pedoman Penulisan Karya Ilmiah*, Edisi Pertama. Jember: Badan Penerbit Universitas Jember.
- Dolan D.S., Zepeda D., Taufik T. (Tanpa Tahun). *Development Of Wind Tunnel For Laboratory Wind Turbine Testing*. Canada.
- Ikhsan, I., Hipi, A. M. 2011. *Analisis Pengaruh Pembebanan Terhadap Kinerja Kincir Angina Tipe Propeller Pada Wind Tunnel Sederhana*. Makassar: Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
- Ida Bagus Fery Citarsa. I Nyoman Wahyu S. I Ketut Wiryajati. *PWM Modulation Technique On Three Phase Inverter Output For Induction Motor Speed Control*. Universitas Mataram.
- Kralj, A. 2006. *Wind Tunnel Testing*. Sherwood Heights School.
- Maharani, A. 2012. Rancang Bangun Rangkaian *Full Bridge Converter* dan *Inverter 3 Fasa* Sebagai Penggerak Mobil Listrik Berbasis *Mikrokontroler (Full Bridge Converter)*. Surabaya: Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
- Nugroho, S. A. 2010. *Perancangan Dan Implementasi DC To DC Converter Sebagai Driver Motor DC Kapasitas 200 Volt 0 Ampere Dengan Metode Pulse Width Modulation*. Bandung: ITT Telkom.
- Sa'adah, Nur. Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Untuk Mengatur Kecepatan Aliran Air Pada *Wireless Sensor Network* Sebagai Pendeteksi Sumber Polutan Yang Potensial (Perangkat Lunak). Surabaya: Jurusan Teknik Elektro Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Saputra, E. R. 2015. *Sistem Monitoring Pengukuran Kecepatan Angin Pada Alat Prototype Anemometer*. Tanjungpinang: Jurusan Teknik Informatika Universitas Maritime Raja Ali Haji.

Sayoga, A. M. I., dkk. 2014. *Pengaruh Variasi Jumlah Blade Terhadap Aerodinamik Performan Pada Rancangan Kincir Angin 300 Watt*. Mataram: Teknik Mesin Universitas Mataram.

Sovan, Bayu. 2014. *Rancang Bangun System Penegndali Motor Brushless DC Untuk Aplikasi Pada Mobil Listrik*. Universitas Jember

Wicaksono, D. A. 2015. *Korelasi Konstanta Proportional Integral Derivative Terhadap Kinerja Mobil Listrik* Universitas Jember. Skripsi. Jember: Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.



LAMPIRAN

A. Listing program PID controller pada motor BLDC

```

#include <PID_v1.h>
#define PIN_INPUT 0
#define PIN_OUTPUT 12

//Define Variables we'll be connecting to
double Output;
double Input,Setpoint;
//Specify the links and initial tuning parameters
double Kp=6, Ki=0, Kd=3.7;
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd,
DIRECT);
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(8, 7, 6, 4, 3, 2);
//#include <FreqCount.h>
int Phi = 3.14;
int JariJari = 2;
const int hallPin=5;
const unsigned long sampleTime=1000;
const int maxRPM = 102000;

int set=0;
const int NilaiPWM =9;
int mVperAmp=66;
int teganganSensorArus=0;
int sensorTeganganInput=0;
int sensorTeganganOutput=0;
int ACSoffset=2.5;
double Voltage=0;
double Amps=0;

const int up =13;
const int ok =12;
const int down =11;
int outputValue = 0;
//int buttonPushCounter = 0;
int buttonState = 0;
int buttonStatel = 0;
int lastButtonState = 0;

void setup() {

    TCCR1B = _BV(CS01);
    pinMode(NilaiPWM , OUTPUT);

```

```
pinMode(up, INPUT);
pinMode(down, INPUT);
pinMode(ok, INPUT);
pinMode(hallPin, INPUT);
lcd.begin(16, 2);
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("/J-Creator*CODE/");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("/ALL IZ WELL/");
delay(1000);
lcd.clear();
Setpoint = set;
myPID.SetMode(AUTOMATIC);

    //FreqCount.begin(1000);
}

void loop() {

    int rpm=getRPM();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(rpm);
    lcd.print(" ");
    float ms=((3.14*2*rpm)/3600);
    lcd.setCursor(6,0);
    lcd.print(ms);
    lcd.print(" ");

    displayPID();
    displayArus();
    displayTegangan();
    //displayRPM(rpm);
    displaySET();
}

void displayRPM(int rpm)
{
}

int getRPM()
{
    // sample for sampleTime in millisecs
    int kount=0;
    boolean kflag=LOW;
    unsigned long currentTime=0;
    unsigned long startTime=millis();
    while (currentTime<=sampleTime)
    {
        if (digitalRead(hallPin)==HIGH)
        {
```

```
        kflag=HIGH;
    }
    if (digitalRead(hallPin)==LOW && kflag==HIGH)
    {
        kount++;
        kflag=LOW;
    }
    currentTime=millis()-startTime;
}
int kount2rpm = int(60000./float(sampleTime))*kount;
return kount2rpm;
}

void displayPID()
{
    float ms;
    Input = ms;
    myPID.Compute();
    analogWrite (NilaiPWM,Output);
    lcd.setCursor(9,1);
    lcd.print("PWM:");
    lcd.setCursor(13,1);
    lcd.print(Output,0);
    lcd.print("      ");
}

void displaySET()
{
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("SET:");
    lcd.setCursor(4,1);
    lcd.print(Setpoint,1);
    //outputValue = map(set, 0, 100, 0, 255);
    //analogWrite (NilaiPWM,outputValue);
    //lcd.setCursor(2,1);
    //lcd.print(outputValue);
    //lcd.print("      ");

    buttonState = digitalRead(up);
    if (buttonState != lastButtonState) {
        if (buttonState == HIGH) {
            Setpoint=Setpoint+0.1;
            if (Setpoint>6.0)
            {
                Setpoint=6.0;
            }

            lcd.setCursor(4,1);
            lcd.print(Setpoint,1);
            lcd.print("  ");
            delay(10);
        }
    }
}
```

```
    }
    else {
    }
    //delay(50);
}
lastButtonState = buttonState;

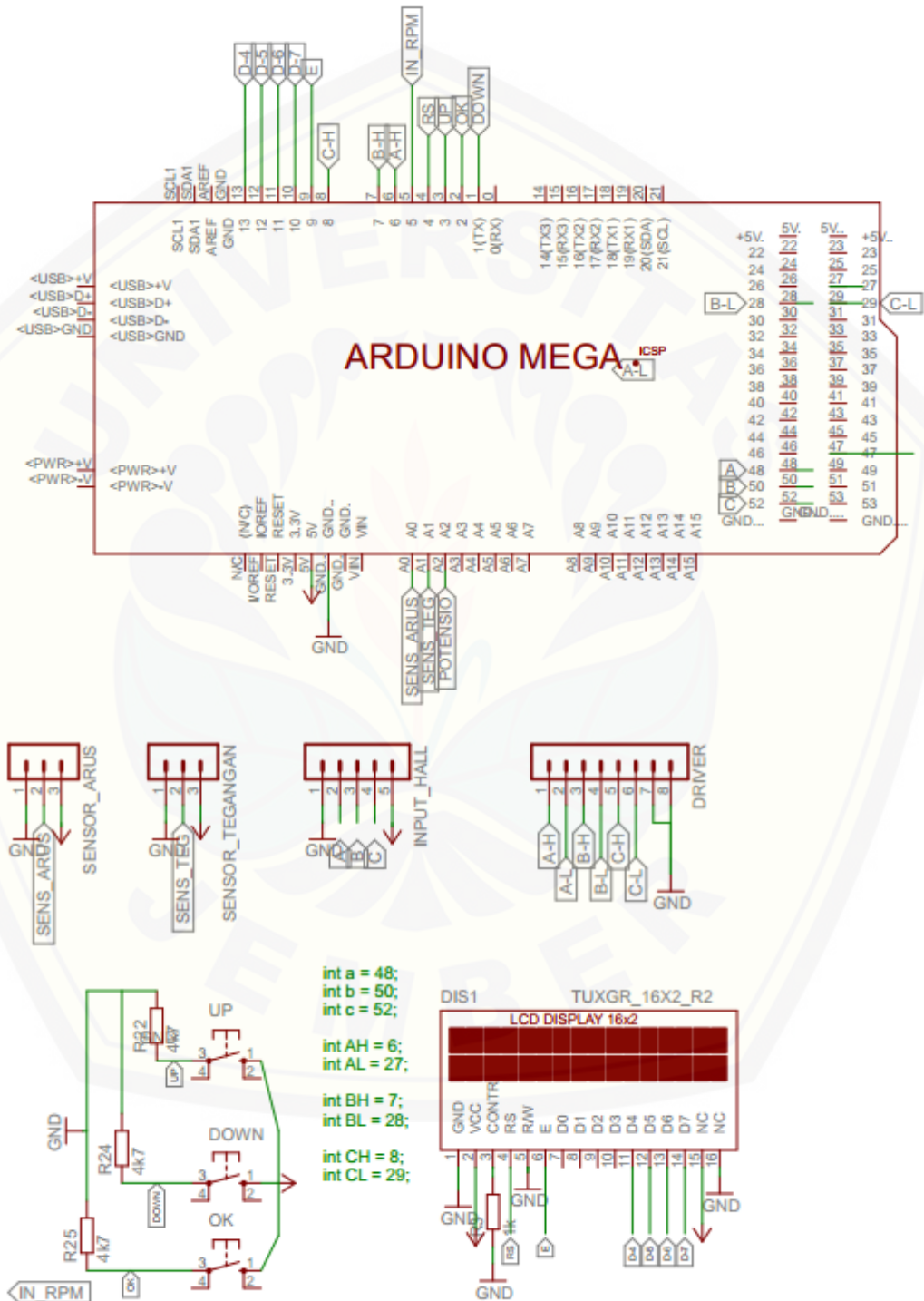
buttonState = digitalRead(down);
if (buttonState != lastButtonState) {
if (buttonState == HIGH) {
Setpoint=Setpoint-0.1;
if (Setpoint<0)
{
Setpoint=0;
}
lcd.setCursor(4,1);
lcd.print(Setpoint,1);
lcd.print(" ");
delay(10);
}
else {
}
//delay(50);
}
lastButtonState = buttonState;
buttonState = digitalRead(ok);
if (buttonState != lastButtonState) {
if (buttonState == HIGH) {
Setpoint=0.0;
lcd.setCursor(4,1);
lcd.print(Setpoint,1);
lcd.print(" ");
delay(10);
}
else {
}
//delay(50);
}
lastButtonState = buttonState;
}

void displayTegangan()
{
sensorTeganganInput = analogRead(A1);
float TeganganIn =(((float)sensorTeganganInput*0.200)-
4.443);//y = 0.200x - 4.428
//lcd.setCursor(6,0);
//lcd.print(TeganganIn,1);
//lcd.print(" ");
// lcd.setCursor(8,1);
```

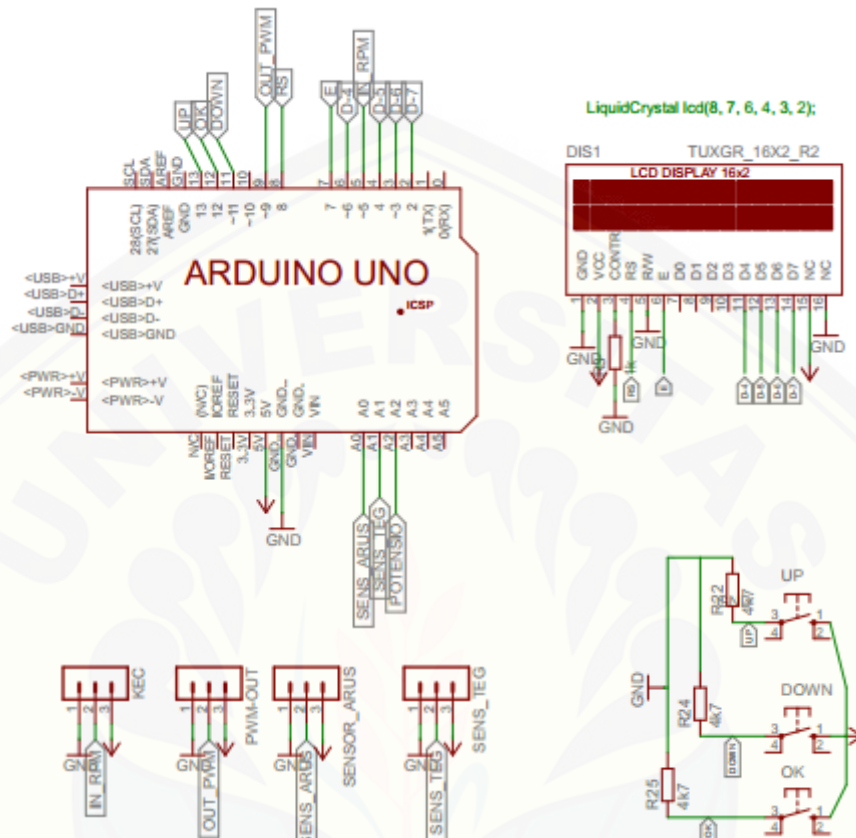
```
// lcd.print("V:");
}
void displayArus ()
{
    unsigned int x=0;
    float
    acsvalue=0.0,samples=0.0,avgacs=0.0,acsvaluef=0.0,arus=
    0.0;
    for (int x=0;x<150;x++)
    {
        acsvalue=analogRead(A0);
        samples=samples+acsvalue;
        delay(3);
    }
    avgacs=samples/150.0;
    acsvaluef=((avgacs*(5.0/1024))-2.65 )/0.100;
    arus=acsvaluef+0.7;
    lcd.setCursor(12,0);
    lcd.print(arus,1);
    lcd.print(" ");
    //lcd.setCursor(10,0);
    //lcd.print("I:");
}
}
```


B. Skema rangkaian sistem kontrol

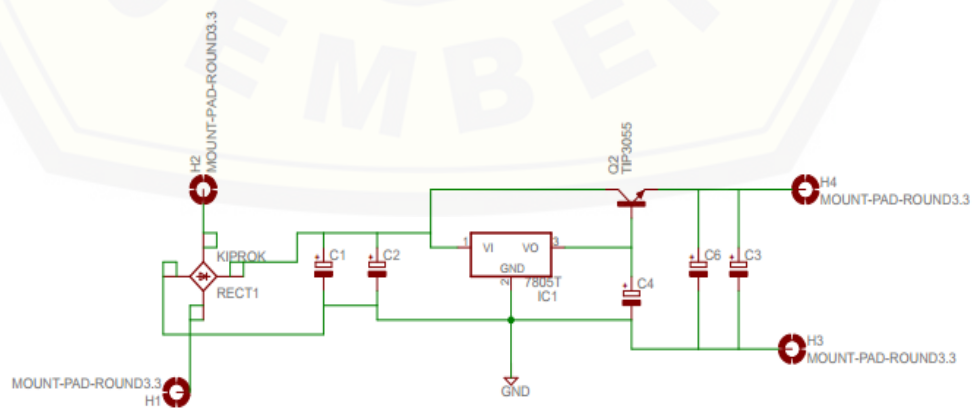
1. Skema rangkaian kontrol *Arduino Mega*



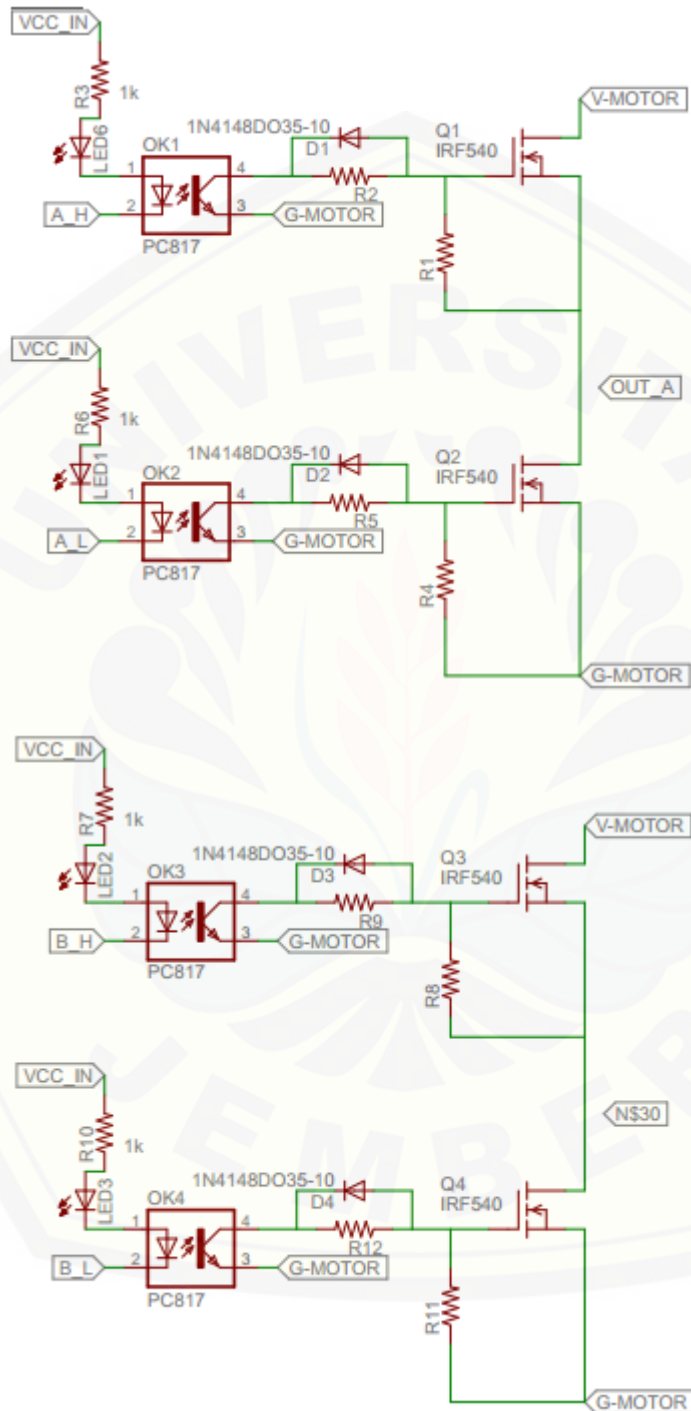
2. Skema rangkain kontrol *Arduino Uno*

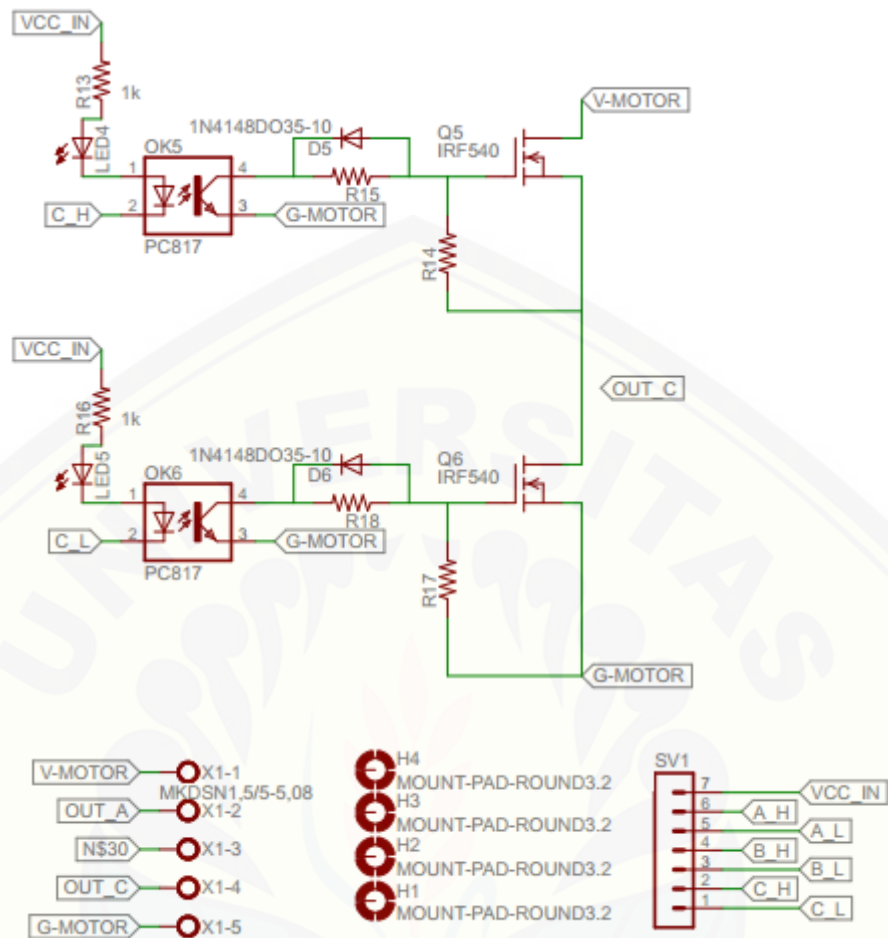


3. Skema rangkaian *power suply*



4. Skema rangkaian *Driver* BLDC





C. Dokumentasi

