



**ANALISA PERBANDINGAN PENGENDALI KECEPATAN PUTAR
MOTOR *BRUSHLESS DIRECT CURRENT* MENGGUNAKAN KONTROL
ARTIFICIAL NEURAL NETWORK (ANN) dan *ADAPTIVE NEURO FUZZY
INFERENCE SYSTEM* (ANFIS)**

SKRIPSI

Oleh

Edi Tri Kurniawan

NIM 131910201112

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2020**



**ANALISA PERBANDINGAN PENGENDALI KECEPATAN PUTAR
MOTOR *BRUSHLESS DIRECT CURRENT* MENGGUNAKAN KONTROL
ARTIFICIAL NEURAL NETWORK (ANN) dan *ADAPTIVE NEURO FUZZY
INFERENCE SYSTEM* (ANFIS)**

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

Oleh

Edi Tri Kurniawan

NIM 131910201112

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER**

2020

PERSEMBAHAN

Dengan ini saya persembahkan skripsi kepada:

1. Allah SWT yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang.
2. Kedua orang tua tercinta dirumah, Bapak Hari Panarko dan Ibu Hartatik serta kakak kandungku Yeni Amalia dan Haris Rahmanto beserta keluarga, terima kasih atas kasih sayang, pengorbanan, dan kesabaran yang tiada tara serta doa yang selalu menyertai.
3. Guru – guru mulai TK Tunas Mulya, SDN Wiroborang 3 Kota Probolinggo, SMPN 3 Kota Probolinggo, SMKN 2 Kota Probolinggo dan dosen-dosen Teknik Elektro Universitas Jember. Terima kasih untuk ilmu dan pengalaman yang telah diajarkan selama ini.
4. Ibu Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T. selaku dekan Fakultas Teknik Universitas Jember.
5. Dr. Ir. Widjonarko, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing utama dan Bapak Andi Setiawan, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing anggota yang telah rela meluangkan waktu, pikiran serta motivasi dalam penyusunan skripsi ini.
6. Bapak Ir. Widyono Hadi, M.T., selaku dosen penguji utama dan Bapak Ali Rizal Chaidir, S.T., M.T., selaku dosen penguji anggota yang telah memberikan kritik dan saran yang membangun sehingga sangat membantu terhadap penyempurnaan skripsi ini.
7. Bapak HRB. Moch. Gozali, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing akademik .
8. Bapak Wahyu Muldayani, S.T., M.T., selaku Komisi Bimbingan S1 yang telah membantu penulisan skripsi secara administratif.
9. Keluarga Begundal Squad dan Intel 2013 yang selalu membantu, menyemangati dan selalu mendampingi saya selama pengerjaan skripsi ini.
10. Almamater Teknik Elektro Universitas Jember.

MOTTO

“It doesn't matter how slow you walk, the most important thing is you don't stop”

“Maka Nikmat Tuhan yang manakah yang kamu dustakan ?”

(QS. Ar-Rahman 13).



PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Edi Tri Kurniawan

NIM : 131910201112

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul ”Analisa Perbandingan Pengendali Kecepatan Putar Motor *Brushless Direct Current* Menggunakan Kontrol *Artificial Neural Network* (ANN) dan *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS)” 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, 24 Juli 2020

Yang menyatakan,

Edi Tri Kurniawan

NIM 131910201112

SKRIPSI

**ANALISA PERBANDINGAN PENGENDALI KECEPATAN PUTAR
MOTOR *BRUSHLESS DIRECT CURRENT* MENGGUNAKAN KONTROL
ARTIFICIAL NEURAL NETWORK (ANN) dan *ADAPTIVE NEURO FUZZY
INFERENCE SYSTEM* (ANFIS)**

Oleh

Edi Tri Kurnaiwan

NIM 131910201112

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Ir. Widjonarko, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Andi Setiawan, S.T., M.T.

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Laporan tugas akhir berjudul “Analisa Perbandingan Pengendali Kecepatan Putar Motor *Brushless Direct Current* Menggunakan Kontrol *Artificial Neural Network* (ANN) dan *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS)” oleh Edi Tri Kurniawan NIM 131910201112 telah diuji dan disahkan oleh Fakultas Teknik Elektro Universitas Jember pada;

Hari : Jum’at
Tanggal : 24 Juli 2020
Tempat : Fakultas Teknik, Universitas Jember

Pembimbing Utama,

Pembimbing Anggota,

Dr. Ir. Widjonarko, S.T., M.T.
NIP. 197109081999031001

Andi Setiawan, S.T., M.T.
NIP. 196910101997021001

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi berjudul "Analisa Perbandingan Pengendali Kecepatan Putar Motor *Brushless Direct Current* Menggunakan Kontrol *Artificial Neural Network* (ANN) dan *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS)" Telah diuji dan disahkan pada :

Hari, Tanggal : Jum'at, 24 Juli 2020

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Ketua,

Anggota I,

Dr. Ir. Widjonarko, S.T., M.T.
NIP 197109081999031001

Andi Setiawan, S.T., M.T NIP.
196910101997021001

Anggota II,

Anggota III,

Ir. Widyono Hadi, M.T.
NIP. 196104141989021001

Ali Rizal Chaidir, S.T., M.T.
NIP. 760015754

Mengesahkan

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Jember,

Dr. Triwahju Hardianto S.T., M.T.
NIP 19700826199702 1 001

RINGKASAN

Pada zaman *modern* ini, kemajuan teknologi baik dalam industri kecil sampai industri besar sekalipun bahkan dalam berbagai peralatan rumah tangga semua peralatan didalamnya tidak terlepas dengan sebuah motor, tak terkecuali pada bidang transportasi. Kendaraan yang ramah lingkungan menjadi salah satu trending di mata kostruktor alat transportasi didunia untuk berlomba-lomba dalam pengembangan teknologi alat transportasi, baik itu kendaraan yang beroda empat maupun kendaraan yang beroda dua, yang berbasis teknologi hybrid ataupun elektrik.

Motor BLDC yaitu alternatif pengganti motor DC. Motor ini adalah salah satu jenis motor yang popularitasnya mulai naik. Seiring berkembangnya teknologi, motor BLDC semakin mudah diproduksi dan dikendalikan. Motor BLDC cocok digunakan pada aplikasi yang membutuhkan efisiensi tinggi, handal dan rentang kecepatan yang lebar. (Hui yang, 2013). Motor *Brushless* DC (BLDC) adalah salah satu jenis motor DC yang memiliki magnet permanen yang berada di bagian rotor dan kumparan jangkar pada stator. Terdapat dua jenis motor BLDC jika dilihat dari segi arah aliran fluxnya, yaitu *Axial flux* BLDC dan *radial flux* BLDC. Konstruksi motor *Brushless* DC (BLDC) *axial flux brushless* DC pada dasarnya terdiri dari sebuah piringan rotor yang dapat berputar dengan beberapa magnet yang menempel di sisi luasannya dan satu lagi bagian stator yang berisi inti dengan konduktor-konduktor yang dibelitkan pada slot-slot stator sebagai pengakomodasi piringan rotor untuk bisa berputar. (Achmad Abdul Ghoni, 2015).

Jika dilihat dari segi penelitian, didapatkan beberapa topik yang dapat ditemui. Dari beberapa penelitian tersebut, terdapat beberapa fokus penelitian pertama penelitian tentang rancang bangun motor *brushless direct current* tiga fasa *axial* fluks (Reqzy, 2019). Kedua yang berkaitan dengan *controller* yang digunakan untuk dapat mengendalikan motor BLDC, baik dalam aspek topologi pengendalian dan juga desain *hardware* (Pina *et al.*, 2017; Naresh *et al.*, 2018; Tutaj *et al.*, 2018).

Sedangkan apabila penelitian BLDC lebih difokuskan pada topik penelitian yang erat kaitannya dengan pengendalian kecepatan motor BLDC, maka beberapa teknik pengendalian telah banyak digunakan. Salah satunya adalah pengalokasian

artificial intellegence sebagai *intellegence control* pada pengendalian motor BLDC. Diantara beberapa penelitian tersebut adalah BLDC dengan menggunakan Fuzzy sebagai pengendaliannya (Kumari, 2018), kemudian ANFIS (Yashoda & O., 2016), dan juga *Artificial Neural Network* (Muhammad Nizam, 2013).

Oleh sebab itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui performa dari motor BLDC dengan cara membandingkan pengendalian kecepatan dari motor BLDC menggunakan kontrol *Artificial Neural Network* dan kontrol *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*. Sedangkan target dari penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana peforma terbaik yang akan dinilai berdasarkan assement sistem kendali dan juga untuk mengetahui serta mencari sistem kendali yang memiliki respon terbaik dalam artian memiliki waktu *steady state* yang tercepat dan juga dicari nilai terbaik dari parameter assement sistem kendali.

Dari beberapa hasil telah didapatkan menunjukkan bahwa pada segi pengujian skenario 1 yaitu untuk mengetahui respon sistem dari masing – masing sistem kendali, ANN memiliki nilai *rise time* rata – rata yang terbaik dibandingkan dengan lainnya. Untuk nilai *Rise time* ANN memiliki performa 1,59 kali lebih baik dibandingkan dengan kendali ANFIS dan 1,03 kali lebih baik dibandingkan dengan Fuzzy. Ini berarti ANN memiliki respon yang lebih cepat atau peka dibandingkan dengan sistem kendali lainnya. Namun dari sisi kecepatan agar sampai pada titik *setpoint (settling time)*, ANN membutuhkan waktu sebesar 0,01999 detik, untuk Fuzzy sebesar 0,0264 detik, sedangkan untuk ANFIS membutuhkan waktu sebesar 0,03231 detik.

Apabila masing – masing sistem kendali dibandingkan dari sisi *overshoot* ataupun *overdamp* yang terjadi, maka dapat diketahui bahwa ANFIS memiliki nilai yang cukup kecil dibandingkan dengan Fuzzy dan ANN, atau ANFIS memiliki performa 3,72 kali lebih baik dibandingkan Fuzzy dan 3,38 kali lebih baik dibandingkan ANN . Namun ANFIS dan ANN memiliki selisih nilai sebesar 6,21%. Nilai tersebut dilihat dari kecilnya nilai rerata *overshoot* dan *overdamp* yang dihasilkan serta nilai balok pada grafik yang lebih kecil dibandingkan dengan sistem kendali yang lain.

Dengan memanfaatkan beberapa informasi yang telah disimpan pada simulasi yang telah dilakukan (waktu simulasi, respon kecepatan, *setpoint* dan *error*), maka dengan menggunakan persamaan 2.14, nilai dari masing – masing sistem kendali dapat diketahui. Hasil dari assemen menggunakan standart assement ini dapat dilihat pada Tabel 4.6. Dari Tabel 4.6 menunjukkan bahwa ANN memiliki performa yang lebih baik dibandingkan dengan lainnya. Hal ini dapat dilihat dari parameter MAE (kejegan atau kestabilan) sistem kendali.



SUMMARY

In modern times, technological advances in both small and large industries even in a variety of household appliances. All the equipment inside is inseparable with the motor, not least in the field of transportation. Environmentally friendly vehicles become one of the trends in the eyes of constructors in the world's transportation equipment to compete in the development of transportation equipment technology, both four-wheeled vehicles as well as two-wheeled vehicles, which are based on hybrid or electric technology.

BLDC motor is an alternative to a DC motor. This motor is one type of motor whose popularity began to rise. As technology develops, BLDC motors are more easily produced and controlled. BLDC motors are suitable for use in applications that require high efficiency, reliable and wide speed range. (Hui yang, 2013). Brushless DC Motor (BLDC) is one type of DC motor that has a permanent magnet that is in the rotor and anchor coil on the stator. There are two types of BLDC motors when viewed in terms of the direction of the flux flow, namely Axial flux BLDC and BLDC radial flux. Brushless DC (BLDC) axial flux brushless DC motor construction basically consists of a rotating disk rotor with several magnets attached to the side of the area and another part of the stator containing a core with conductors wrapped around the stator slots as an accommodator rotor disk to be able to spin. (Achmad Abdul Ghoni, 2015).

When viewed from the point of view of research, a number of topics can be found. From some of these studies, there are a number of focuses of the first research research on the design of brushless direct current three-phase axial flux motors (Reqzy, 2019). The second relates to the controller used to be able to control a BLDC motor, both in aspects of control topology and also hardware design (Pina *et al.*, 2017; Naresh *et al.*, 2018; Tutaj *et al.*, 2018).

However, if BLDC research is more focused on research topics that are closely related to BLDC motor speed control, then several control techniques have been widely used. One of them is the application of artificial intelligence as an intelligence control on BLDC motor control. Among these studies are BLDC using

Fuzzy as a control (Kumari, 2018). then ANFIS (Yashoda & O., 2016), and also Artificial Neural Network (Muhammad Nizam, 2013).

Therefore, the purpose of this study is to determine the performance of a BLDC motor by comparing the speed control of a BLDC motor using Artificial Neural Network (ANN) control and Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) control. While the target of this research is to find out how the best performance will be assessed based on the parameters of the control system assement and also to find out and find the control system that has the best response in the sense of having the fastest steady state time and also to find the best value of the control system parameter assement.

From several results it has been found that in terms of testing scenario 1, which is to find out the system response of each control system, ANN has the best average rise time value compared to the others. For the ANN Rise time value, it has 1.59 times better performance compared to ANFIS control and 1.03 times better than Fuzzy. This means that ANN has a faster or more sensitive response compared to other control systems. But in terms of speed in order to arrive at the setpoint (settling time), ANN requires a time of 0.01999 seconds, for Fuzzy by 0.0264 seconds, while for ANFIS requires a time of 0.03231 seconds.

If each control system is compared from the overshoot or overdamp side, it can be seen that ANFIS has a fairly small value compared to Fuzzy and ANN, or ANFIS has 3.72 times better performance than Fuzzy and 3.38 times better compared ANN. However ANFIS and ANN have a difference of value of 6.21%. This value is seen from the small average value of the overshoot and overdamp generated and the value of the block on the graph that is smaller than the other control systems.

By utilizing some information that has been stored in the simulation that has been done (simulation time, response speed, setpoint and error), then by using equation 2.14, the value of each control system can be known. The results of the assessment using this standard assessment can be seen in Table 4.6. From Table 4.6 shows that ANN has a better performance compared to the others. This can be seen from the MAE parameters (stability or stability) of the control system.

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Analisa Perbandingan Pengendali Kecepatan Putar Motor *Brushless Direct Current* Menggunakan Kontrol *Artificial Neural Network* (ANN) dan *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS)”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program studi strata satu (S1) Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember. Selama penyusunan skripsi ini penulis mendapat bantuan berbagai pihak, untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang.
2. Nabi besar Muhammad SAW, yang menjadi suri tauladan bagi seluruh umat.
3. Kedua orang tua tercinta dirumah, Bapak Hari Panarko dan Ibu Hartatik serta kakak kandungku Yeni Amalia dan Haris Rahmanto beserta keluarga, terima kasih atas kasih sayangnya, pengorbanan, dan kesabaran yang tiada tara serta doa yang selalu menyertai.
4. Teman-teman komunitas Begundal's Squad yang selalu memberi semangat, bantuan, dan juga dorongan untuk menyelesaikan penelitian ini.
5. Rekan-rekan Fakultas Teknik Universitas Jember khususnya rekan-rekan Teknik Elektro Angkatan 2013 yang tidak dapat disebutkan satu per satu, selama ini telah memberikan pengalaman hidup selama penulis menjadi keluarga Fakultas Teknik Universitas Jember.
6. Cries Avian, S.T., M.T. sebagai partner penelitian sekaligus suhu dalam penyusunan skripsi ini.
7. Begundal Squad dan penghuni Kontraan Kaliurang, Nur Wahyu Utomo, Fajar Gunawan, Erwin Setyandani, Bagus Lintang, dan teman-teman kloter terakhir angkatan 2013, Ade Firmansyah, Arief Fahmi, Bapak Diego Jaka Sundang, Risman Febrian, Ilfah, Miftah Faris, Lubboy begitu juga UHA yang selalu menceriakan dan menyemangati penghuni kontrakan Kaliurang.
8. Saudari Rury Febriyanti S.Pd., yang selalu setia memberi semangat dan juga dorongan dari awal hingga akhir pengerjaan tugas akhir ini.

9. Serta seluruh pihak yang telah membantu dalam mengerjakan skripsi ini yang tidak bisa disebutkan namanya satu persatu.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat.



DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
HALAMAN MOTTO	iv
HALAMAN PERNYATAAN	v
PERSETUJUAN PEMBIMBING	vii
LEMBAR PENGESAHAN	viii
RINGKASAN	ix
SUMMARY	xii
PRAKATA	xiv
DAFTAR ISI	xvi
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR TABEL	xxi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB 2. DASAR TEORI	5
2.1. Motor BLDC	5
2.2. <i>Intellegence Control System</i>	8
2.2.1. ANN.....	8
2.2.2. ANFIS	11
2.3. Parameter Pengujian.....	14
BAB 3. METODE PENELITIAN	16
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	16
3.2 Alat dan Bahan	16
3.3 Rancangan Sistem	16
3.3.1. Blok Diagram.....	17

3.3.2. Flowchart Sistem	18
3.4 Hipotesa.....	20
3.5 Perancangan Sistem.....	21
3.5.1. Motor BLDC	21
3.5.2. <i>Driver Controller</i> Motor BLDC	22
3.5.3. <i>Decoder</i>	23
3.5.4. <i>Gates</i>	24
3.5.5. Pengujian.....	25
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	27
4.1 Pengujian <i>Inverter</i>	27
4.2 Pengujian BLDC Motor <i>controller</i>	31
4.2.1. Perancangan Fuzzy	31
4.2.2. Perancangan ANN	34
4.2.3. Perancangan ANFIS.....	39
4.3 Pengujian Sistem	42
4.3.1. Skenario 1	42
4.3.1.1. Fuzzy	42
4.3.1.2. ANN	46
4.3.1.3. ANFIS	49
4.3.2. Skenario 2	55
4.3.2.1. Fuzzy	55
4.3.2.2. ANN	57
4.3.2.3. ANFIS	60
BAB 5. PENUTUP.....	63
5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran	64
DAFTAR PUSTAKA	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Model kontruksi motor BLDC (a) Motor BLDC *axial fluks* (b) motor BLDC *radial fluks*..... 5

Gambar 2.2. *Driver* Motor BLDC..... 7

Gambar 2.3. Sinyal Pengendalian Motor BLDC 7

Gambar 2.4. Skema Sel Otak Manusia 8

Gambar 2.5. Struktur *Artificial Neural Network* dengan satu *layer* (a) Struktur *Artificial Neural Network* dengan dua *layer* (b) 9

Gambar 2.6. Struktur *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*..... 12

Gambar 2.7. Tipe Struktur *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*..... 14

Gambar 3.1 Rangkaian untuk Blok Kendali ANN dan ANFIS 16

Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem 17

Gambar 3.3 Rangkaian Simulasi pada Simulink..... 18

Gambar 3.4 *Flowchart* Sistem untuk blok kendali *Intellegence Control* 19

Gambar 3.5 Parameter untuk Komputasi Spesifikasi Motor BLDC Standart Manufaktur..... 21

Gambar 3.6 Spesifikasi Motor BLDC..... 22

Gambar 3.7 Parameter untuk *Inverter* Motor BLDC 22

Gambar 3.8 Rangkaian Simulink untuk *Decoder* 23

Gambar 3.9 Rangkaian *Gates* pada Simulink 24

Gambar 4.1 Tegangan *Output* pada *Inverter* dengan Suplai 50V 27

Gambar 4.2 Sinyal Hall Sensor pada Tegangan Suplai 50V 28

Gambar 4.3 Sinyal EMF pada tegangan Suplai 50V 28

Gambar 4.4 Tegangan *Output* pada *Inverter* dengan Suplai 100V 28

Gambar 4.5 Sinyal Hall Sensor pada Tegangan Suplai 100V 29

Gambar 4.6 Sinyal EMF pada Tegangan Suplai 100V 29

Gambar 4.7 Tegangan *Output* pada *Inverter* dengan Suplai 200V 29

Gambar 4.8 Sinyal Hall Sensor pada Tegangan Suplai 200V 29

Gambar 4.9 Sinyal EMF pada Tegangan Suplai 200V 30

Gambar 4.10 Tegangan *Output* pada *Inverter* dengan Suplai 400V 30

Gambar 4.11 Sinyal Hall Sensor pada Tegangan Suplai 400V 30

Gambar 4.12 Sinyal EMF pada Tegangan Suplai 400V	31
Gambar 4.13. Rangkaian Simulink untuk Ekstrasi <i>Rule Closed-Loop</i>	32
Gambar 4.14 Struktur Rancangan Fuzzy	32
Gambar 4.15 <i>Membership Input Error</i>	33
Gambar 4.16 <i>Membership Input Delta Error</i>	33
Gambar 4.17 <i>Membership Output Duty Cycle</i>	33
Gambar 4.18 Struktur Jaringan <i>Artificial Neural Network</i>	34
Gambar 4.19 Hasil Ekstrasi Data Fitur <i>Rule Closed-Loop Data Training ANN</i> ..	35
Gambar 4.20 Hasil <i>Regresi Artificial Neural Network</i>	37
Gambar 4.21 Hasil <i>Training</i> pada <i>Artificial Neural Network</i>	38
Gambar 4.22 Akurasi pada algoritma <i>Artificial Neural Network</i>	39
Gambar 4.23 Struktur Rancangan <i>Adaptive Neuro Fuzzy Inference System</i>	40
Gambar 4.24 Tipe sinyal <i>input</i> dan <i>output Adaptive Neuro Fuzzy Inference System</i>	40
Gambar 4.25 Struktur jaringan <i>Adaptive Neuro Fuzzy Inference System</i>	41
Gambar 4.26 Struktur <i>Surface</i> pada <i>Adaptive Neuro Fuzzy Inference System</i>	41
Gambar 4.27 Respon Sistem pada sistem kendali Fuzzy skenario 1	42
Gambar 4.28 Respon Sistem pada sistem kendali Fuzzy saat <i>start</i> skenario 1.....	43
Gambar 4.29 Respon Sistem pada sistem kendali Fuzzy saat kenaikan dan turunan ekstrim skenario 1	43
Gambar 4.30 Respon <i>Output</i> tegangan DC <i>supply</i> pada sistem kendali Fuzzy Skenario 1	44
Gambar 4.31 <i>Rise Time</i> dan <i>Settling Time</i> pada sistem kendali Fuzzy.....	45
Gambar 4.32 Respon Sistem pada sistem kendali <i>Artificial Neural Network</i> (ANN) skenario 1	46
Gambar 4.33 Respon Sistem pada sistem kendali <i>Artificial Neural Network</i> (ANN) saat <i>start</i> skenario 1.....	46
Gambar 4.34 Respon Sistem pada sistem kendali <i>Artificial Neural Network</i> (ANN) saat kenaikan dan turunan ekstrim skenario 1.....	47
Gambar 4.35 Respon <i>Output</i> tegangan DC <i>supply</i> pada sistem Kendali <i>Artificial Neural Network</i> (ANN) Skenario 1	47
Gambar 4.36 <i>Rise Time</i> dan <i>Settling Time</i> pada Kendali <i>Artificial Neural Network</i>	49

Gambar 4.37 Respon Sistem pada sistem kendali <i>Adaptive Neuro Fuzzy Inference System</i> (ANFIS) skenario 1	49
Gambar 4.38 Respon Sistem pada sistem kendali <i>Adaptive Neuro Fuzzy Inference System</i> (ANFIS) saat <i>start</i> skenario 1	50
Gambar 4.39 Respon Sistem pada sistem kendali <i>Adaptive Neuro Fuzzy Inference System</i> (ANFIS) saat kenaikan dan turunan ekstrim skenario 1	51
Gambar 4.40 Respon <i>Output</i> tegangan DC <i>supply</i> pada sistem Kendali <i>Adaptive Neuro Fuzzy Inference System</i> (ANFIS) skenario 1	51
Gambar 4.41 <i>Rise Time</i> dan <i>Settling Time</i> pada Kendali <i>Adaptive Neuro Fuzzy Inference System</i>	53
Gambar 4.42 Grafik Perbandingan <i>Overshoot</i> dan <i>Overdamp</i> pada Tiap <i>Intelligence Control</i>	54
Gambar 4.43 Respon Sistem pada sistem kendali Fuzzy Skenario 2	56
Gambar 4.44 Respon Sistem pada sistem kendali Fuzzy saat kenaikan dan turunan ekstrim Skenario 2.....	56
Gambar 4.45 Respon <i>Output</i> tegangan DC <i>supply</i> pada sistem kendali Fuzzy Skenario 2	57
Gambar 4.46 Respon Sistem pada sistem kendali <i>Artificial Neural Network</i> (ANN) Skenario 2	58
Gambar 4.47 Respon Sistem pada sistem kendali <i>Artificial Neural Network</i> (ANN) saat kenaikan dan turunan ekstrim Skenario 2	59
Gambar 4.48 Respon <i>Output</i> tegangan DC <i>supply</i> pada sistem kendali <i>Artificial Neural Network</i> (ANN) skenario 2	59
Gambar 4.49 Respon Sistem pada sistem kendali <i>Adaptive Neuro Fuzzy Inference System</i> (ANFIS) skenario 2.....	60
Gambar 4.50 Respon Sistem pada sistem kendali <i>Adaptive Neuro Fuzzy Inference System</i> (ANFIS) saat kenaikan dan turunan skenario 2	61
Gambar 4.51 Respon <i>Output</i> tegangan DC <i>supply</i> pada sistem kendali <i>Adaptive Neuro Fuzzy Inference System</i> (ANFIS) skenario 2	61

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1. Rule Fuzzy yang digunakan.....	34
Tabel 4.2. Contoh Data Training.....	36
Tabel 4.3. Hasil Respon Sistem Tiap Siklus pada sistem kendali Fuzzy.....	44
Tabel 4.4. Hasil Respon Sistem Tiap Siklus pada kendali <i>Artificial Neural Network</i> (ANN)	48
Tabel 4.5. Hasil Respon Sistem Tiap Siklus pada Kendali <i>Adaptive Neuro Fuzzy Inference System</i> (ANFIS)	52
Tabel 4.6. Hasil Respon Sistem Berdasarkan Standart Assesmen pada Skenario 1	55
Tabel 4.7. Rekapitulasi Respon Sistem Berdasarkan Standart Assesmen pada Skenario 2	62

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada zaman *modern* ini, kemajuan teknologi baik dalam industri kecil sampai industri besar sekalipun bahkan dalam berbagai peralatan rumah tangga semua peralatan didalamnya tidak terlepas dengan sebuah motor, tak terkecuali pada bidang transportasi. Kendaraan yang ramah lingkungan menjadi salah satu trending di mata kostruktor alat transportasi didunia untuk berlomba-lomba dalam pengembangan teknologi alat transportasi, baik itu kendaraan yang beroda empat maupun kendaraan yang beroda dua, yang berbasis teknologi hybrid ataupun elektrik. Motor itu sendiri merupakan sebuah alat yang mampu berputar jika diberi energi listrik sebagai *input*. Atau secara umum motor yaitu perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Motor sendiri dalam pembagiannya terbagi menjadi dua yaitu motor AC dan motor DC. Akan tetapi dalam kehidupan sehari-hari motor yang paling sering digunakan dalam masyarakat yaitu motor DC.

Motor BLDC yaitu alternatif pengganti motor DC. Motor ini adalah salah satu jenis motor yang popularitasnya mulai naik. Seiring berkembangnya teknologi, motor BLDC semakin mudah diproduksi dan dikendalikan. Motor BLDC cocok digunakan pada aplikasi yang membutuhkan efisiensi tinggi, handal dan rentang kecepatan yang lebar. (Hui yang, 2013)

Untuk memenuhi kebutuhan motor dengan efisiensi tinggi, kecepatan tinggi dan perawatan yang relatif lebih rendah maka motor *Brushless* DC (BLDC) menjadi pilihan yang paling efektif dalam segi efisiensi tingkat tinggi. *Brushless* DC (BLDC) adalah motor magnet permanen akan tetapi proses *comutator* dan sikat digantikan oleh *solid state switch*. Pada *Controller Brushless* DC Motor (BLDC) tiga fasa berperan sangat penting atau sebagai penunjang utama beroperasinya motor DC *Brushless* karena motor ini membutuhkan suatu *trigger* pulsa ke bagian elektromagnetik (stator) dari motor *Brushless* DC sebagai

pengaturan besarnya arus yang mengalir sehingga motor dapat berputar dan diatur secara akurat. (Indradewa, 2013).

Motor *Brushless* DC (BLDC) adalah salah satu jenis motor DC yang memiliki magnet permanen yang berada di bagian rotor dan kumparan jangkar pada stator. Terdapat dua jenis motor BLDC jika dilihat dari segi arah aliran fluxnya, yaitu *Axial flux* BLDC dan *radial flux* BLDC. Konstruksi motor *Brushless* DC (BLDC) *axial flux* brushless DC pada dasarnya terdiri dari sebuah piringan rotor yang dapat berputar dengan beberapa magnet yang menempel di sisi luasannya dan satu lagi bagian stator yang berisi inti dengan konduktor-konduktor yang dibelitkan pada slot-slot stator sebagai pengakomodasi piringan rotor untuk bisa berputar. (Achmad Abdul Ghoni, 2015).

Jika dilihat dari segi penelitian, didapatkan beberapa topik yang dapat ditemui. Dari beberapa penelitian tersebut, terdapat beberapa fokus penelitian pertama penelitian tentang rancang bangun motor *brushless direct current* tiga fasa *axial* fluks (Reqzy, 2019). Kedua yang berkaitan dengan *controller* yang digunakan untuk dapat mengendalikan motor BLDC, baik dalam aspek topologi pengendalian dan juga desain *hardware* (Pina *et al.*, 2017; Naresh *et al.*, 2018; Tutaj *et al.*, 2018).

Sedangkan apabila penelitian BLDC lebih difokuskan pada topik penelitian yang erat kaitannya dengan pengendalian kecepatan motor BLDC, maka beberapa teknik pengendalian telah banyak digunakan. Salah satunya adalah pengalokasian *artificial intelligence* sebagai *intelligence control* pada pengendalian motor BLDC. Diantara beberapa penelitian tersebut adalah BLDC dengan menggunakan Fuzzy sebagai pengendaliannya (Kumari, 2018), kemudian ANFIS (Yashoda & O., 2016), dan juga *Artificial Neural Network* (Muhammad Nizam, 2013).

Oleh sebab itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui performa dari motor BLDC dengan cara membandingkan pengendalian kecepatan dari motor BLDC menggunakan kontrol *Artificial Neural Network* dan kontrol *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*. Sedangkan target dari penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana performa terbaik yang akan dinilai berdasarkan assement sistem kendali dan juga untuk mengetahui serta mencari sistem kendali yang

memiliki respon terbaik dalam artian memiliki waktu *steady state* yang tercepat dan juga dicari nilai terbaik dari parameter assement sistem kendali.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, dapat diidentifikasi beberapa masalah yang harus diselesaikan antara lain:

1. Bagaimana mendesain simulasi sistem kendali motor BLDC dengan menggunakan sistem kendali cerdas *Artificial Neural Network* dan *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* ?
2. Bagaimana kinerja penggunaan *Artificial Neural Network* dan *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* pada kendali motor BLDC ditinjau dari respon sistem dan juga standart assement sistem kendali ?

1.3 Tujuan

Tujuan dalam tugas ahir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui desain simulasi *controller* motor BLDC dengan menggunakan sistem kendali cerdas *Artificial Neural Network* dan *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*.
2. Mengetahui pengaruh performa *Artificial Neural Network* dan *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* pada sistem kendali motor BLDC ditinjau dari sisi kecepatan dan kestabilan serta waktu *steady state*.

1.4 Batasan Masalah

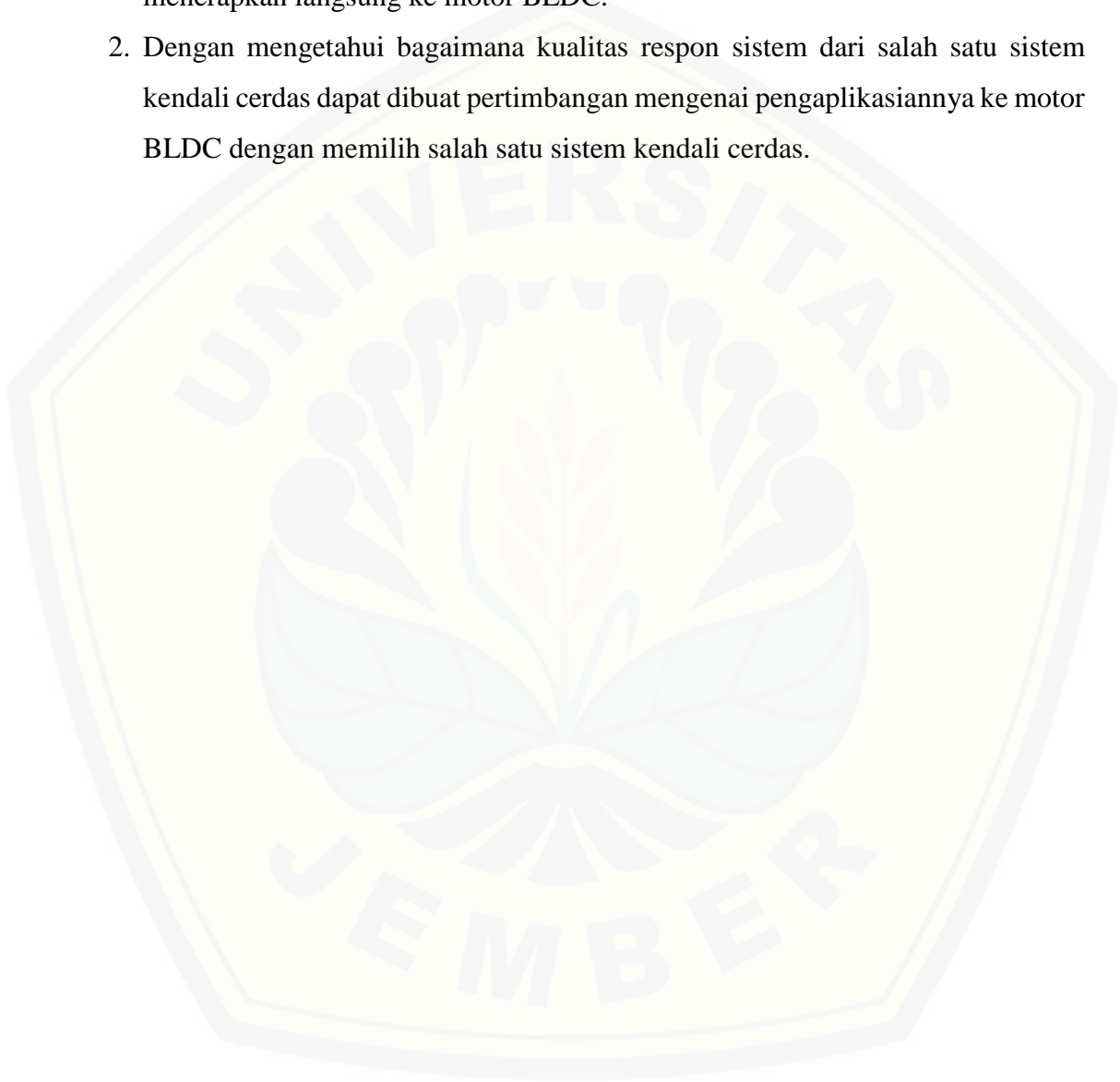
Permasalahan dalam tugas ahir ini dibatasi oleh beberapa hal yaitu :

1. Penelitian ini didasarkan pada simulasi dengan menggunakan *software* simulink Matlab.
2. Pada penelitian ini tidak membahas secara rinci tentang motor.
3. Pada Penelitian ini sistem kendali fuzzy hanya untuk di ambil data *input* dan *output* sebagai data *train* yang digunakan untuk sistem kendali ANN dan ANFIS
4. Pada penelitian ini fokus penelitian adalah melakukan komparasi perbandingan antar sistem kendali yang digunakan.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan bermanfaat sebagai :

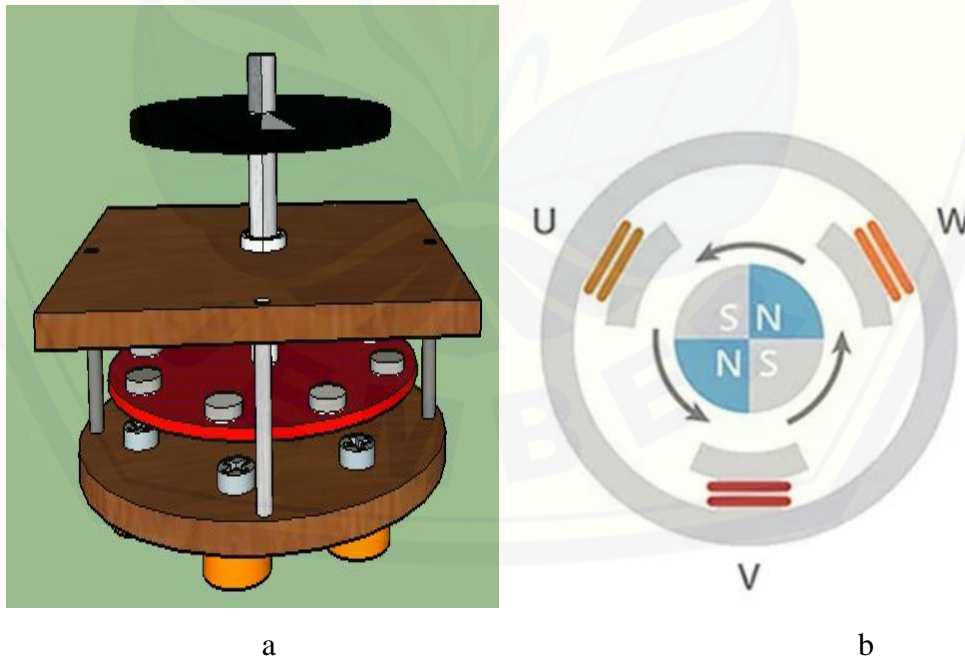
1. Dapat mengembangkan pengaplikasian dari sistem kendali cerdas *Artificial Neural Network* dan *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* dengan menerapkan langsung ke motor BLDC.
2. Dengan mengetahui bagaimana kualitas respon sistem dari salah satu sistem kendali cerdas dapat dibuat pertimbangan mengenai pengaplikasiannya ke motor BLDC dengan memilih salah satu sistem kendali cerdas.



BAB 2. DASAR TEORI

2.1 Motor BLDC

Motor *brushless direct current* adalah jenis motor sinkron. Ini berarti medan magnet yang dihasilkan oleh stator dan medan magnet yang dihasilkan oleh rotor memutar di frekuensi yang sama. Motor *brushless direct current* tidak menghasilkan slip yang biasanya terdapat pada motor induksi. Motor *brushless direct current* memiliki beberapa jenis yaitu motor *brushless direct current* 1 phasa, motor *brushless direct current* 2 phasa dan motor *brushless direct current* 3 phasa. Sesuai dengan jenisnya, stator memiliki jumlah belitan yang sama. Dari semua ini, motor 3 phasa adalah yang paling populer dan banyak digunakan terutama di dunia industri (Yedamale, 2003). Sedangkan jika dibagi menurut arah aliran fluks terdapat beberapa jenis yaitu motor *brushless direct current axial fluks* dan motor *brushless direct current radial fluks*.



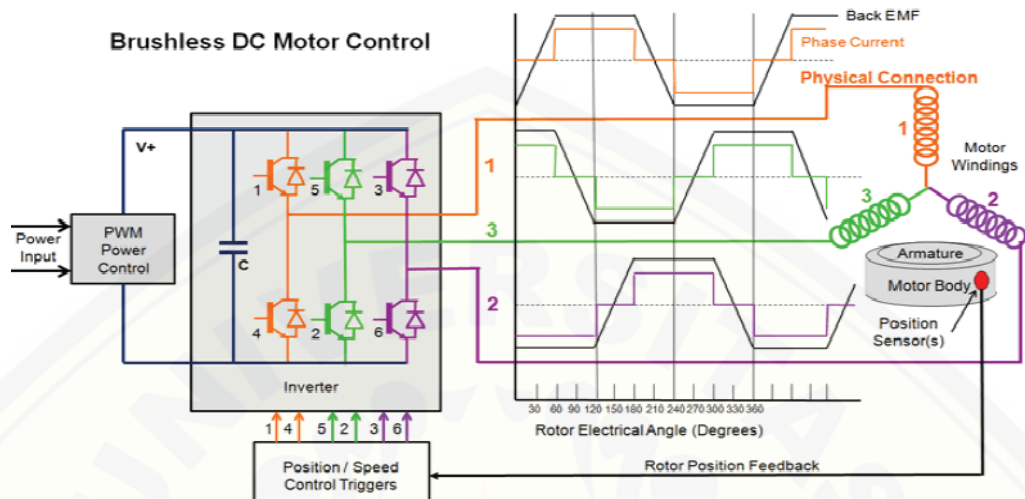
Gambar 2.1 Model konstruksi motor BLDC (a) Motor BLDC *axial fluks* (b) motor BLDC *radial fluks*

Didalam konstruksi motor BLDC terdapat dua bagian yaitu stator dan rotor dimana didalam rotor tersebut berisikan magnet permanen yang bersifat tetap dan didalam stator berisikan kumparan atau koil yang akan menghasilkan medan magnet jika dialiri listrik. Untuk mengendalikan motor BLDC ini membutuhkan sebuah driver yang mampu untuk mengaktifkan kumparan atau koil yang terdapat pada stator motor BLDC tersebut. Sehingga inti dari pengendalian motor BLDC ini terletak pada pengendalian medan elektromagnetik yang dihasilkan oleh kumparan atau koil pada stator. (Cries Avian, 2019)

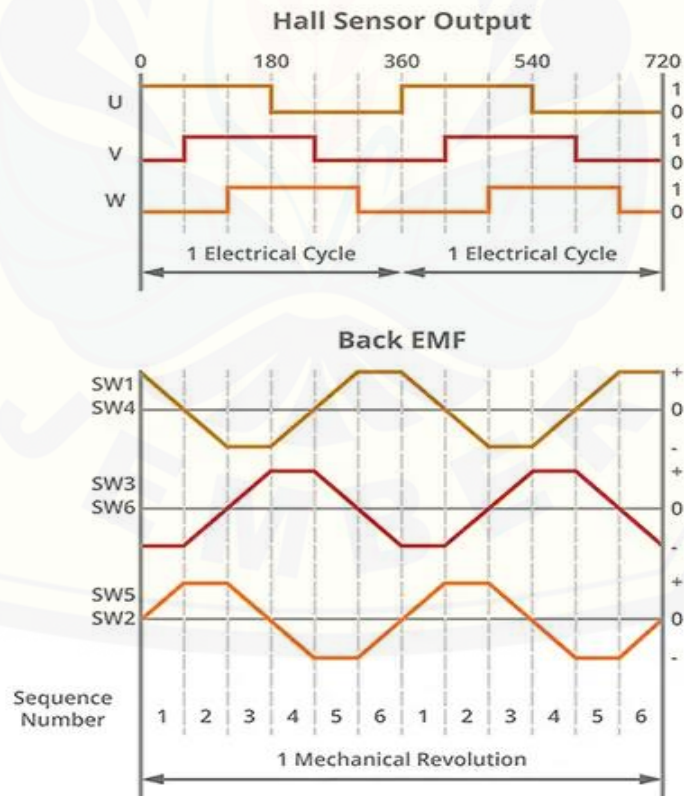
Pada dasarnya sebuah medan yang sekutub akan saling tolak menolak dan sebuah medan yang berbeda kutubnya akan saling tarik menarik, hal inilah yang dimanfaatkan dari kinerja motor BLDC. Didalam stator terdapat kumparan yang akan diatur pengaktifan medan magnetnya sesuai dari back EMF atau sensor *hall effect* yang terdapat dari motor BLDC tersebut. Sensor *hall effect* merupakan peralatan elektronik yang berada pada motor BLDC yang berfungsi memberikan sinyal *feedback* (umpan balik) pada rangkaian kontrol yang bersifat elektronik dan akan mengendalikan perubahan komutasi pada motor BLDC. Hal tersebut dikarenakan motor BLDC bagian stator harus diberikan sinyal secara berurutan sesuai perubahan komutasi. Sensor *hall* sendiri bekerja dengan mendeteksi medan magnet yang ada di salah satu sisinya, jadi ketika medan magnet mempengaruhi sensor *hall* maka sensor memberikan *feedback* terhadap rangkaian dan arus yang mengalir akan berbelok mendekati/menjauhi sisi yang dipengaruhi oleh medan magnet. Rangkaian kontrol yang terdapat pada motor BLDC lah ang berfungsi untuk mengatur arus yang masuk pada kumparan stator. Pada rangkaian kontrol BLDC, sistem bekerja berdasarkan pergantian dari kinerja dari komutasi motor.

Untuk dapat melakukan pengendalian motor BLDC, maka motor BLDC harus dikendalikan dengan menggunakan sinyal PWM yang dapat mengikuti komutasi dari motor. Karena pada motor BLDC, komutasi motor dapat diketahui dari sensor *hall effect* yang terpasang pada motor BLDC, maka untuk dapat memutar agar sesuai dengan komutasi motor dapat menggunakan referensi kendali tersebut.

Untuk lebih jelasnya dapat melihat gambaran pengendalian dari rangkaian kontrol pada gambar 2.2 dan sinyal pengendalian pada gambar 2.3.



Gambar 2.2 Driver Motor BLDC

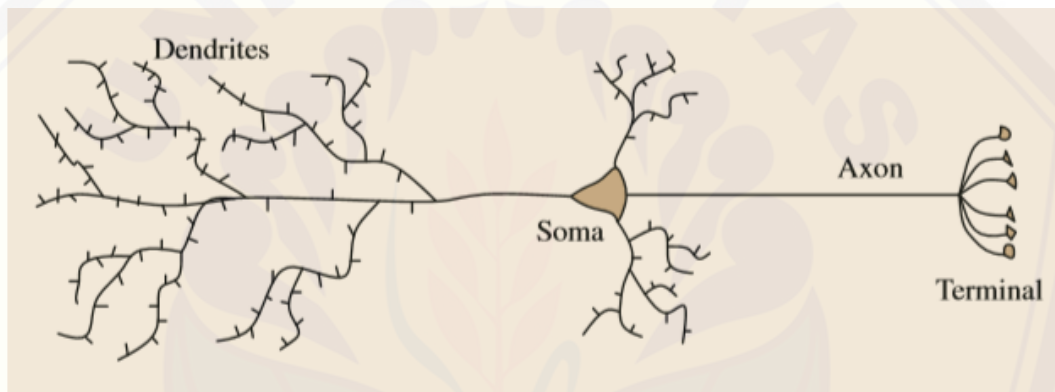


Gambar 2.3 Sinyal Pengendalian Motor BLDC

2.2 Intelligence Control System

2.2.1. Artificial Neural Network (ANN)

Artificial Neural Network atau yang biasa dikenal dengan istilah JST adalah suatu sistem kendali dimana menggunakan suatu pendekatan yang berbeda dari metode AI lainnya. Kinerja pada sistem kendali ini merupakan suatu model kecerdasan yang menirukan kinerja otak manusia dan kemudian diimplementasikan menggunakan program komputer yang mampu menyelesaikan sejumlah proses perhitungan selama proses perhitungan berlangsung. Untuk lebih jelasnya bisa dilihat dari skema sederhana otak manusia pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Skema Sel Otak Manusia

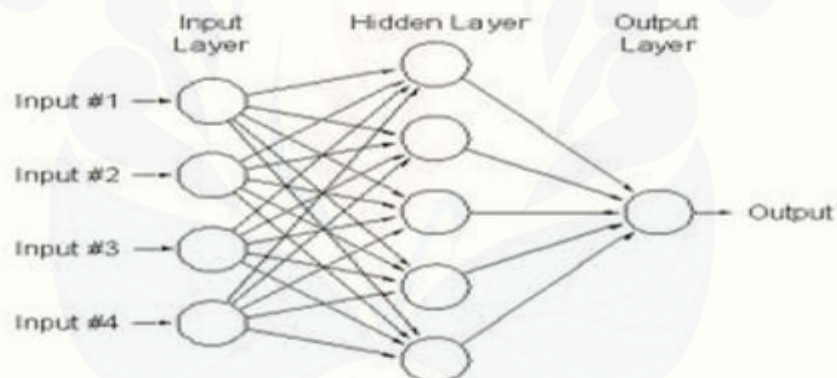
Diperkirakan ada sekitar 10^{12} sel saraf (neuron) yang masing masing terhubung oleh sekitar 10^{15} buah dendrit di otak manusia. Dua pertiga dari proses biologis plex neuron berlangsung, memastikan bahwa sel-sel tersebut dapat memproses sinyal dari neuron lain, serta mengirimkan sinyal sendiri kepada mereka (Neuron pada layer lainnya). (Janusz Kacprzyk, 2015). Struktur pada gambar tersebut adalah bentuk dasar satuan unit jaringan otak manusia yang telah disederhanakan. Bentuk standart ini mungkin akan berubah bila ada ilmuan yang dapat menciptakan bentuk standart yang lebih baik ataupun memperbaiki bentuk standart yang digunakan saat ini.

Dari gambar skema di atas, bisa diketahui beberapa bagian dari otak manusia, pertama dendrit (*dendrites*) berfungsi untuk mengirimkan impuls yang diterima ke badan sel syaraf, kedua Akson (*Axon*) berfungsi untuk mengirimkan

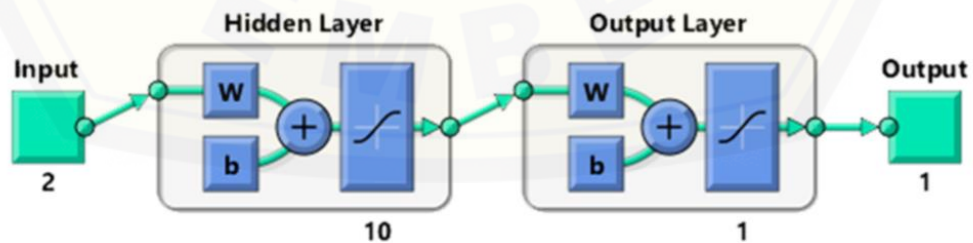
impuls dari badan sel ke jaringan yang lain, yang terakhir yaitu Soma atau dapat dikatakan sebagai inti sel yang berfungsi untuk melakukan proses informasi.

2.2.1.1. Pemodelan *Artificial Neural Network* (ANN)

Pada pemodelan ini yaitu dari struktur neuron pada otak manusia serta proses kerja yang telah dijelaskan, maka didapatkan konsep dasar pembangunan neural network buatan (*Artificial Neural Network*). Konsep dasar dari *Artificial Neural Network* (ANN) yaitu mengadopsi mekanisme berpikir sebuah sistem atau aplikasi yang menyerupai otak manusia baik untuk pemrosesan berbagai sinyal elemen yang diterima, toleransi terhadap kesalahan atau *error*, dan juga *parallel procesing*.



a



b

Gambar 2.5 Struktur *Artificial Neural Network* dengan satu layer (a) Struktur *Artificial Neural Network* dengan dua layer (b)

Karakteristik dari ANN dilihat dari pola hubungan antar neuron, metode penentuan bobot dari tiap koneksi, dan fungsi aktivasinya. Pada gambar 2.5 menjelaskan struktur ANN secara mendasar, yaitu fungsi input sebagai dendrit, output berfungsi sebagai akson, sedangkan *hidden layer* dan *output layer* berfungsi sebagai soma (inti sel).

Pada pemodelan ANN ini perlu adanya *training process* seperti pada jaringan syaraf tiruan dengan menggunakan *learning process backpropagation* (BP-ANN), parameter JST (jaringan syaraf tiruan) *feed forward* -nya haruslah ditentukan secara manual, parameter yang dimaksud adalah parameter input weight dan hidden bias. Pada jaringan syaraf tiruan parameter – parameternya saling berhubungan, maka semakin banyak hidden bias dan layer yang di bangun, maka learning speed yang dibutuhkan akan membutuhkan waktu yang lama. (Huang, Zhu and Siew, 2004).

Input Neural Network ke hidden layer pada gambar 2.5 dapat dilihat dengan persamaan berikut :

$$\sum_{i=1}^n (w_{ij} x_i) \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana $n_j(x)$ adalah jumlah beban (*weight*) dari semua input i ke titik j , x_i adalah input dari titik i , dan w_{ij} adalah beban (*weight*) dari titik i ke titik j . Untuk pehitungan masing-masing titik *output*, proses titik *output*-nya sendiri menggunakan persamaan :

$$o_j(x) = f(n_j(x)) = f \sum_i (w_{ij} x_i) \dots\dots\dots (2.2)$$

Dari persamaan diatas dapat diketahui bahwa pada *output* terdapat beberapa fungsi. Fungsi umum pada persamaan di atas yaitu fungsi simoid yang dapat dilihat pada persamaan berikut :

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \dots\dots\dots (2.3)$$

Keakuratan dari *Artificial Neural Network* (ANN) ditentukan oleh *error* dan *error* kuadrat. *Error* dapat dihitung dari data *output* dikurangi *output* ANN, dapat dilihat dari persamaan berikut :

$$Error = output \text{ data} - output \text{ ANN} \dots\dots\dots (2.4)$$

Pada persamaan terakhir digunakan untuk menghitung kesalahan kuadrat atau *Mean Square of Error* (MSE) yang merupakan fungsi resiko, sesuai dengan nilai yang diharapkan dari kerugian kesalahan kuadrat.

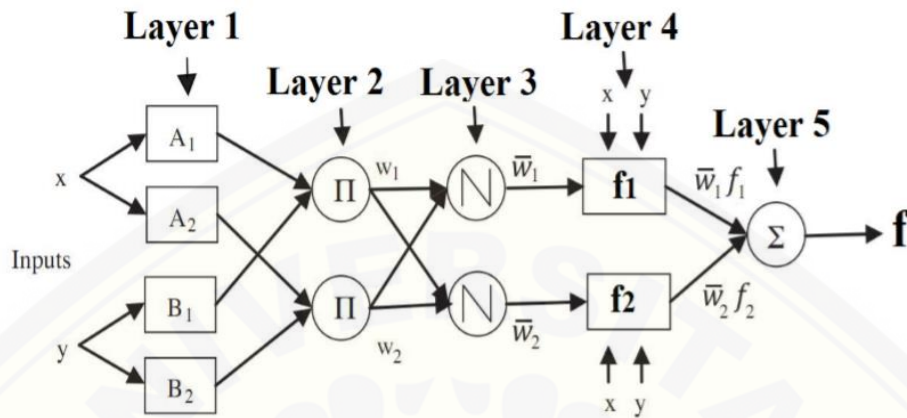
$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^n (error)^2 \dots\dots\dots(2.5)$$

2.2.2. Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)

Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) merupakan sejenis sistem inferensi neuro-fuzzy adaptif yang menghubungkan sistem logika fuzzy dengan jaringan saraf tiruan dan membangun sistem kecerdasan hibrida serta mendapatkan manfaat dari keunggulan logika fuzzy dan jaringan saraf tiruan. Bisa dikatakan bahwa ANFIS adalah suatu metode yang mana dalam melakukan penyetelan aturan digunakan algoritma pembelajaran terhadap sekumpulan data. Pada ANFIS juga memungkinkan aturan-aturan untuk beradaptasi. (Kusumadewi & Hartati, 2010).

Arsitektur *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS) ditunjukkan pada Gambar 6.7. Dalam hal ini, perancangan telah dilakukan dengan teknik tipe sugeno yang menguraikan karakteristik input ke fungsi keanggotaan input. Inferensi fuzzy hanya berlaku untuk sistem pemodelan yang strukturnya hampir dirancang oleh persepsi pengguna tentang karakteristik variabel yang dimodelkan dalam sistem inferensi. Desain tipe jaringan yang sama dengan sistem jaringan saraf tiruan telah diadopsi untuk memperkuat dan mengimprovisasi peta input / output sedemikian rupa sehingga cukup untuk mengukur unit input melalui fungsi keanggotaan yang disebutkan sebelumnya dari parameter input / output yang

berkorelasi dengan fungsi keanggotaan yang dapat diubah melalui prosedur pembelajaran.



Gambar 2.6 Struktur *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*

Sebuah aturannya diperoleh dengan 2 fuzzy jika kemudian aturannya mengikuti persamaan berikut :

Aturan 1 : jika x adalah A_1 dan y adalah B_1 , maka

$$f_1 = p_1x + q_1y + r_1 \dots \dots \dots (2.6)$$

Aturan 2 : jika x adalah A_2 dan y adalah B_2 , maka

$$f_2 = p_2x + q_2y + r_2 \dots \dots \dots (2.7)$$

Paramater x dan y dapat dianggap sebagai input dan f adalah *output*. Sedangkan untuk (p_i, q_i, r_i) disebut parameter konsekuen, $(i = 1, 2 \dots)$, pernyataan ini dapat ditunjukkan pada struktur ANFIS yang tertera pada gambar 2.6.

Pada *layer 1* terdiri dari sebuah titik adaptif dengan sebuah fungsi titik yang dapat dilihat pada persamaan berikut :

$$Q_{1i} = \mu A_i(x), \quad (\text{for } i = 1, 2 \dots) \dots \dots \dots (2.8)$$

$$Q_{2i} = \mu B_i(y), \quad (\text{for } i = 1, 2 \dots) \dots \dots \dots (2.9)$$

Output dari lapisan ini adalah nilai keanggotaannya. Fungsi keanggotaan untuk A dapat berupa fungsi keanggotaan parameter apa saja yang tepat. Setiap parameter dianggap sebagai parameter *default*.

Pada *layer 2* ini disebut dengan “n” dan keluaran dari setiap titik adalah hasil dari pengalihan semua sinyal *input* yang masuk ke titik tersebut. Titik ini melakukan operasi *fuzzy* dengan logika “AND”. Dapat dilihat dengan persamaan berikut :

$$Q_{2i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \mu_{B_i}(y), \quad (\text{for } i = 1, 2 \dots) \dots \dots \dots (2.10)$$

Pada *layer 3* ini setiap titik diberi label “N” dengan menghitung titik *output* yang dinormalisasi dari setiap aturan. Dapat dilihat dengan persamaan berikut :

$$Q_{3i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad (\text{for } i = 1, 2 \dots) \dots \dots \dots (2.11)$$

Dimana w_i adalah kekuatan dari setiap aturan tersebut.

Pada *layer 4* disetiap titik lapisan dikaitkan dengan fungsi titik yang ada pada layer ini. Dapat dilihat dengan persamaan berikut :

$$Q_{4i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_1 x + q_1 y + r_1) \dots \dots \dots (2.12)$$

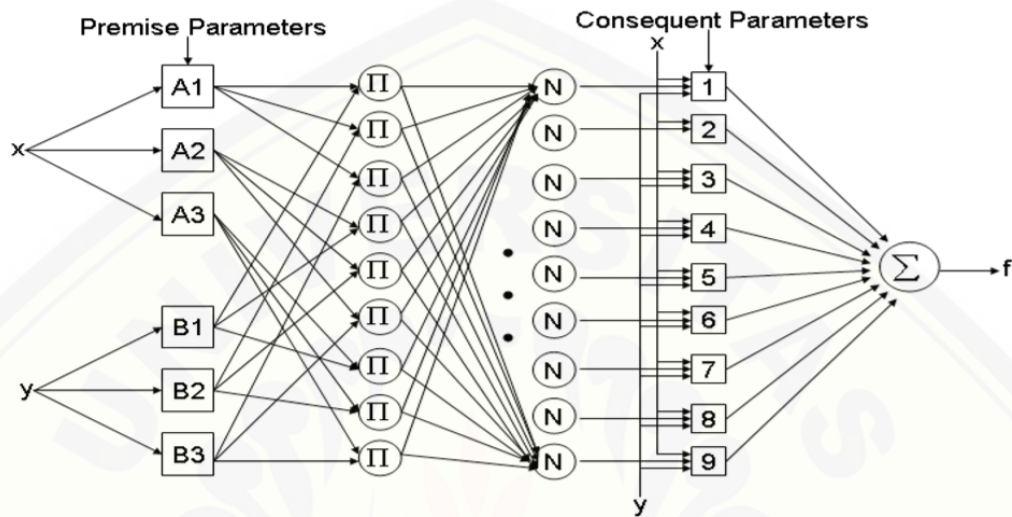
Dimana w_i adalah mewakili kekuatan yang dinormalisasi dari layer ketiga dan (p_i, q_i, r_i) adalah aturan parameter dari simpul i .

Pada *layer 5* terdapat titik tunggal yang diberi label Σ . Pada semua sinyal input akan di hitung dan dikirim ke bagian sinyal output.

$$Q_{5i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \dots \dots \dots (2.13)$$

Dimana Q_{5i} adalah *output* dari titik (i) di *layer* kelima. Alasan pertama semua aturan yang ada akan ditetapkan di *layer* kesatu. Misalnya kita memiliki dua

input yang memiliki tiga fungsi keanggotaan, maka kita harus membentuk sembilan aturan (Alireza Rezvani, 2015). Dari pernyataan tersebut akan menjadi seperti gambar 2.7



Gambar 2.7 Tipe Struktur *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*

2.3 Parameter Pengujian

Untuk dapat melakukan pengujian agar sesuai dengan tujuan penelitian, maka diperlukan beberapa parameter pengujian yang dilakukan. Beberapa parameter tersebut adalah sebagai berikut (Tongwen Chen, 2004) :

MAE adalah kepanjangan dari *Mean Absolute Error*. Fungsi dari parameter ini adalah untuk mengetahui jumlah selisih antara rata – rata antara *setpoint* dengan nilai respon yang didapatkan. Semakin kecil nilai pada parameter ini maka semakin bagus tingkat stabilitas sistem.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f_i - y_i| \dots\dots\dots(2.14)$$

f_i = *Setpoint*

y_i = *Output Aktual*

Oleh karena itu dalam pengujian *intelligence controller* dalam penelitian ini, maka memerlukan beberapa data. Data – data tersebut adalah :

1. Waktu simulasi.
2. Respon kecepatan.
3. Besar nilai *setpoint*.
4. Besar nilai *error*.



BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Adapun tempat dan waktu penelitian, pengujian dan analisis dilakukan secara umum dilakukan di :

Tempat : Laboratorium Sistem Tenaga

Alamat : Jl. Slamet Riyadi No. 62 Patrang, Jember 68111

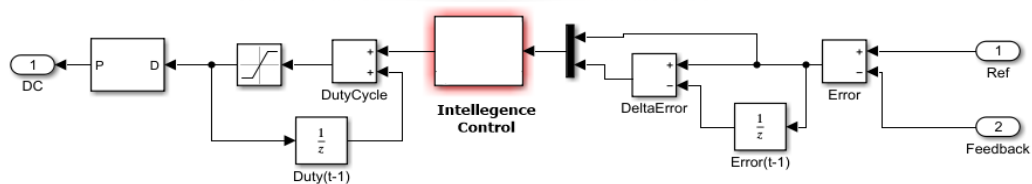
Waktu : Januari 2020 - Maret 2020

3.2 Alat dan Bahan

1. Personal Computer
2. Matlab

3.3 Rancangan Sistem

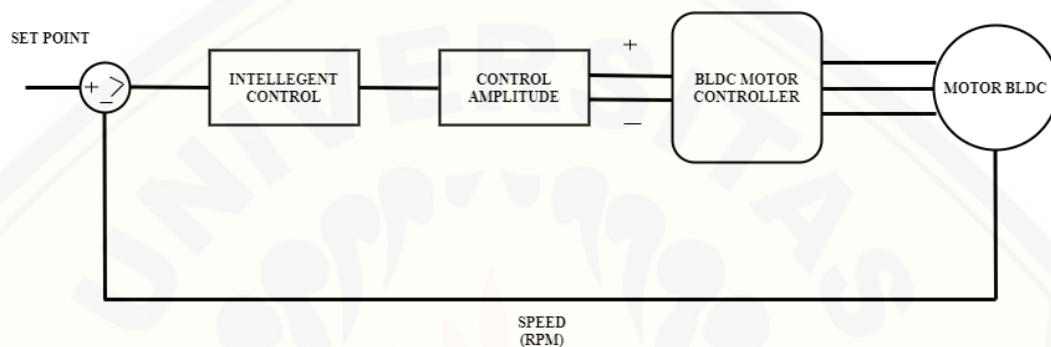
Untuk dapat menggunakan *intelligence control*, maka sistem harus disusun agar sistem kendali cerdas yang digunakan dapat bekerja sesuai yang kita inginkan. Pada penelitian ini sistem kendali yang akan digunakan adalah sistem pengendalian *close loop*, sehingga terdapat dua *input* dan satu *output* kendali. Untuk *input*-nya sendiri terdapat dua *input* yaitu *error* dan *delta error*, sedangkan untuk *output*-nya yaitu besar dari nilai *duty cycle* (DC) yang akan digunakan untuk mengendalikan sumber tegangan. Pada rancangan sistem ini menggunakan dua sistem kendali yang berbeda yaitu ANN dan ANFIS, akan tetapi untuk model blok pengendaliannya sama, hal ini dapat dilihat pada gambar 3.1. Blok pengendalian ini sama disebabkan karakteristik *output* tidak dapat digunakan secara langsung melainkan harus ditambah dengan nilai *output* sebelumnya.



Gambar 3.1 Rangkaian untuk Blok Kendali ANN dan ANFIS

Rancangan dari penelitian “Pengendali Kecepatan Putar Motor *Brushless Direct Current* Menggunakan Kontrol *Artificial Neural Network* (ANN) Dan *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS)” terdiri dari blok diagram serta *flowchart* cara kerja sistem.

3.3.1. Blok Diagram



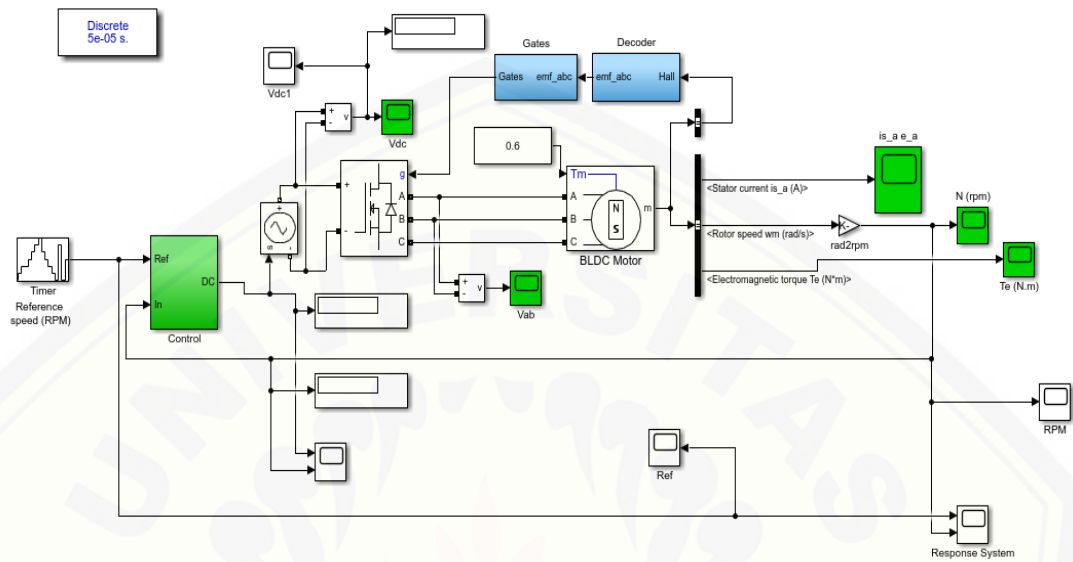
Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem

Pada gambar 3.2 dapat dilihat bahwa pada sistem ini terdiri dari 4 blok inti.

Blok tersebut diantaranya adalah sumber tegangan, BLDC *motor controller*, Motor BLDC dan yang terakhir sistem kendali cerdas. Untuk prinsip kerja dari sistem ini adalah bagaimana motor dapat di atur agar dapat sesuai dengan set point yang kita atur dengan cara mengatur tegangan pada sumber tegangan yang menyuplai *motor controller*.

Dapat diketahui pada sistem ini BLDC *motor controller* akan bekerja sesuai dengan biasanya dimana *controller* tersebut melakukan pensaklaran sesuai dengan prinsip kinerja dari driver BLDC pada biasanya. Untuk mengatur seberapa besar kecepatan dari motor BLDC yaitu dengan cara mengatur tegangan pada sumber tegangan. Pada sistem ini pengendalian yang dilakukan oleh *intelligent control* yaitu sumber masukan atau *input* yang berupa *error* dan *delta error* yang didapatkan dengan cara mengurangi nilai setpoint kecepatan (RPM) yang diinginkan dengan nilai *real* saat motor di kendalikan.

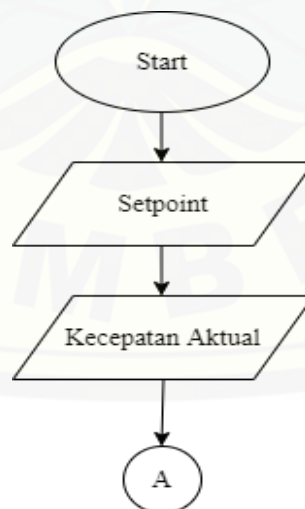
Dari rancangan sistem blok diagram diatas maka dapat di transformasikan kedalam sebuah total sistem yang terdapat pada gambar 3.3



Gambar 3.3 Rangkaian Simulasi pada Simulink

3.3.2 Flowchart Sistem

Flowchart cara kerja dari sistem yang akan di buat adalah sebagai berikut :





Gambar 3.4 Flowchart Sistem untuk blok kendali *Intelligence Control*

Dapat dilihat pada gambar 3.1 dan gambar 3.4 diketahui bahwa masukan atau *input* dari sistem ini terdiri dari dua masukan. Pertama yaitu *ref* atau referensi yang berasal dari nilai *setpoint* yang di masukan oleh peneliti atau *user*. Kedua adalah *feedback* yang merupakan nilai umpan balik yang berasal dari motor yang di kendalikan berupa RPM. Sistem kendali cerdas yang digunakan saat ini memiliki dua tipe *input* berupa *Error* dan *delta Error*, maka nilai yang masuk kedalam sistem ini dapat dilihat dengan persamaan berikut :

$$e = Ref - Feedback \dots \dots \dots (3.1)$$

$$de = e_{(t-1)} - e_o \dots \dots \dots (3.2)$$

Pada persamaan rumus di atas dapat diketahui $e = error$, ref adalah referensi (*setpoint*), $Feedback$ sendiri adalah nilai keluaran dari motor, de adalah *delta error*, $e_{(t-1)}$ nilai *error* sebelumnya dan e_0 adalah nilai *error* saat ini.

Kemudian setelah nilai tersebut sudah tersedia dalam bentuk *format* nilai *error* dan *delta error*, maka nilai tersebut akan diolah oleh *intelligence control* yang dalam pengujiannya akan diganti dengan beberapa sistem kendali cerdas yang telah dipilih untuk dibandingkan. Untuk keluaran dari *intelligence control* berupa besar *duty cycle* yang akan digunakan untuk mengendalikan sumber tegangan dan sistem yang digunakan adalah model sistem kendali *close loop*, maka besar keluaran dapat didapat dengan menggunakan persamaan :

$$Out = Out_{(t-1)} + Out_o \dots\dots\dots (3.3)$$

Dari persamaan di atas dapat diketahui dimana $Out =$ nilai *output*, $Out_{(t-1)}$ adalah nilai *output* sebelumnya dan Out_0 adalah nilai *output* saat ini. . Dikarenakan nilai keluaran dengan model *close loop* bisa melebihi standart *range* nilai dari *duty cycle*, maka sebelum masuk kedalam blok PWM *generator*, besar nilai *output* dibatas dengan *constrain* 0 - 0.9.

3.4 Hipotesa

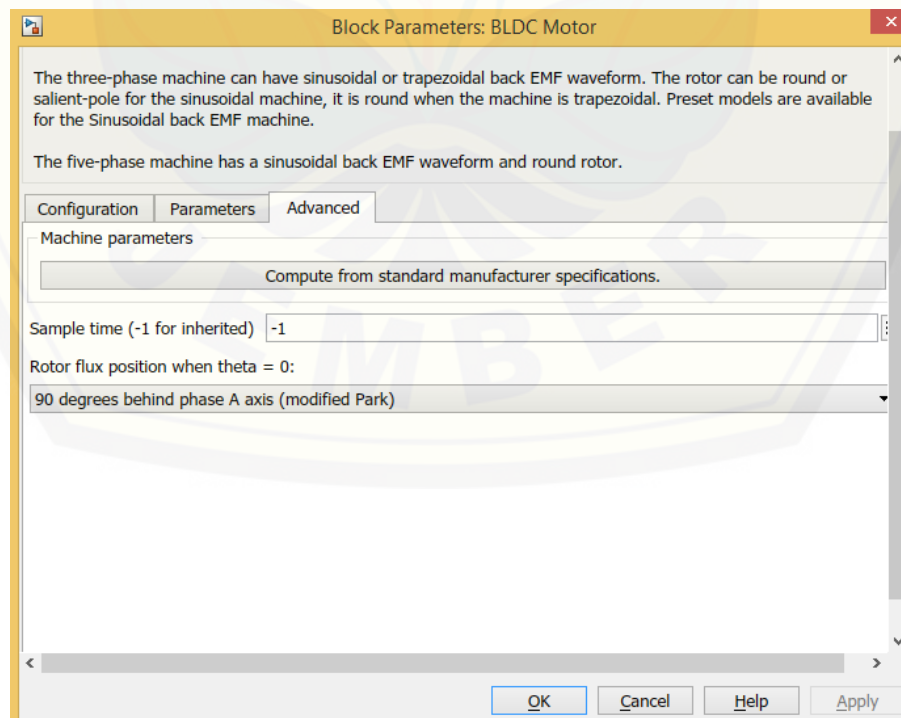
1. Dengan membuat desain simulasi fuzzy untuk pengontrolan BLDC pada simulink terlebih dahulu lalu kita jalankan atau *run* simulasi yang telah dibuat, setelah itu kita ambil data *error*, *delta error*, dan *output* yang dihasilkan pada simulasi yang telah dijalankan, dari data fuzzy pada simulink yang didapatkan kita ambil lalu kita masukkan pada data *inputan* yang dibutuhkan ANN serta ANFIS untuk di pelajari, setelah itu kita lihat hasil dari keduanya untuk di bandingkan.
2. Kondisi *steady state* dari respon sistem AI keduanya yaitu *Artificial Neural Network* dan *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* akan tercapai cepat dalam interval waktu kurang dari sama dengan 3 detik.

3.5 Perancangan Sistem

Sistem ini memerlukan beberapa tahapan perancangan untuk mendapatkan data, dari motor BLDC yang digunakan, *Driver Controller* motor BLDC, *Decoder*, *Gates*, dan pengujian.

3.5.1 Motor BLDC

Untuk motor yang digunakan dalam penelitian ini, diambil fungsi blok yang telah tersedia pada Simulink Matlab. Komponen atau blok tersebut adalah *Permanent Magnet Synchronous Machine* atau PMSM. Pada PMSM yang digunakan, jumlah fasa yang digunakan adalah (*number of phase*) 3 dengan bentuk sinyal EMF dalam bentuk sinusoidal. Sedangkan untuk basis dari spesifikasi yang didesain pada penelitian ini didasarkan pada tegangan kerja dari BLDC, yaitu 24VDC. Dengan menggunakan bantuan fitur komputasi manufaktur standar yang terdapat pada blok ini yang terdapat pada kolom *advance* (Compute from standard manufacturer specifications) maka dengan mengatur bagian *Voltage Constant* pada fitur ini, semua bagian akan terhitung.

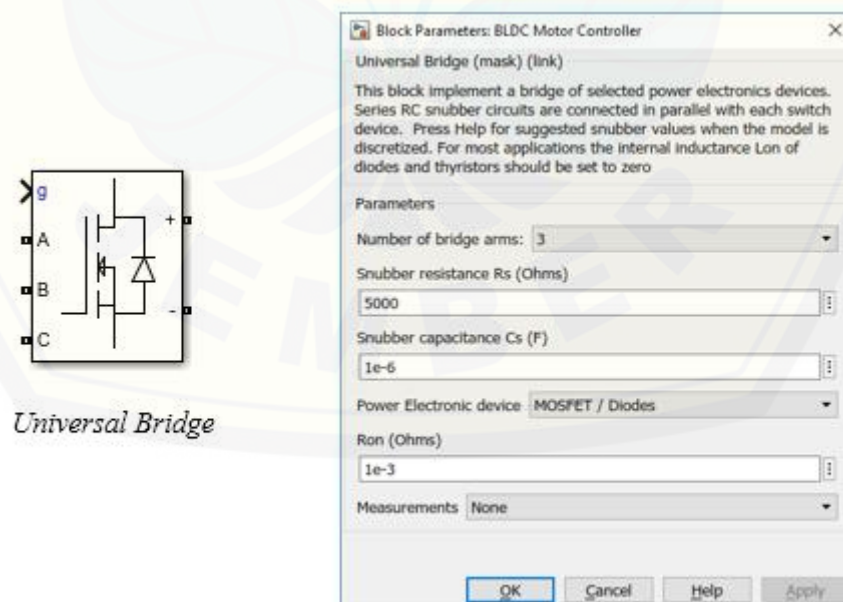


Gambar 3.5 Parameter untuk Komputasi Spesifikasi Motor BLDC Standart Manufaktur

Gambar 3.6 Spesifikasi Motor BLDC

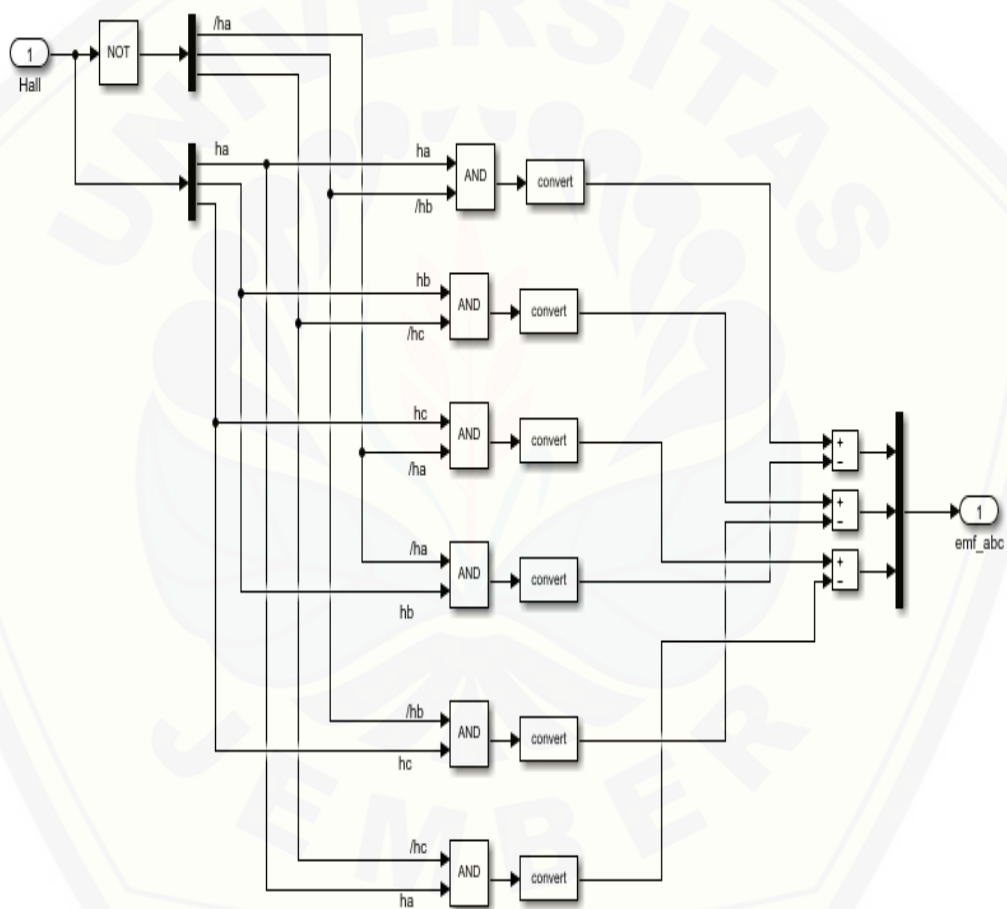
3.5.2 Driver Controller motor BLDC

Untuk driver pada perancangan sistem ini, sistem dibentuk dengan menggunakan *driver motor* yang telah disediakan oleh Simulink Matlab, yaitu blok Universal Bridge dengan parameter yang dapat dilihat pada Gambar 3.7.

Gambar 3.7 Parameter untuk *Inverter* Motor BLDC

3.5.3 Decoder

Pada perancangan sistem ini fungsi dari *decoder* sendiri adalah mengubah sinyal yang dikeluarkan oleh sensor *hall effect* terdapat pada motor *Brushless Direct Current* (BLDC) kedalam sinyal *emf* atau *electromagnetic force*. Untuk rangkaian *decoder*-nya dapat dilihat pada Gambar 3.8, sedangkan untuk logika *decoder* dapat dilihat pada Tabel 3.1.



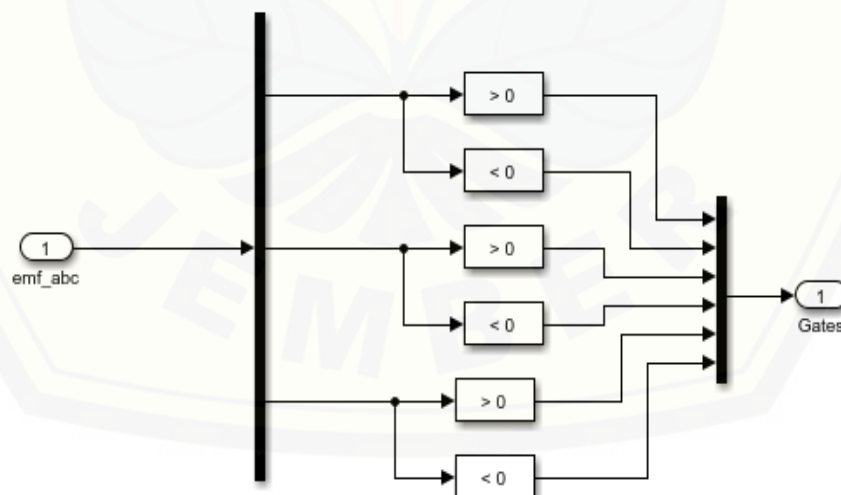
Gambar 3.8 Rangkaian Simulink untuk *Decoder*

Tabel 3.1 Konversi dari sensor *hall effect* ke EMF

ha	hb	hc	emf_a	emf_b	emf_c
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	-1	+1
0	1	0	-1	+1	0
0	1	1	-1	0	+1
1	0	0	+1	0	-1
1	0	1	+1	-1	0
1	1	0	0	+1	-1
1	1	1	0	0	0

3.5.4 Gates

Fungsi dari *gates* ini adalah untuk mengubah sinyal yang dikeluarkan oleh *decoder* yang berupa sinyal emf menjadi sinyal *switch gates* untuk penyalan motor *controller*. Untuk rangkaian *gates*-nya dapat dilihat pada Gambar 3.9, sedangkan untuk logika *gates* dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Gambar 3.9 Rangkaian *Gates* pada Simulink

Tabel 3.2 Konversi dari sinyal *emf* ke sinyal *switch gates* untuk *Inverter*

emf_a	emf_b	emf_c	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1	+1	0	0	0	1	1	0
-1	+1	0	0	1	1	0	0	0
-1	0	+1	0	1	0	0	1	0
+1	0	-1	1	0	0	0	0	1
+1	-1	0	1	0	0	1	0	0
0	+1	-1	0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0

(Cries Avian, 2019)

3.5.5 Pengujian

Untuk dapat menguji dari sistem yang telah dibentuk, maka akan diberlakukan dua skenario pengujian. Pengujian dengan model skenario ini akan diujikan pada setiap *intelligence control* yang akan dibandingkan. Untuk skenario pengujian tersebut adalah sebagai berikut :

1. Kecepatan berubah dengan torsi tetap.

Pada pengujian skenario pertama ini, sistem akan diubah nilai dari *setpoint* kecepatan baik dengan mengubahnya secara naik dan juga secara turun dalam sela beberapa waktu dengan nilai torsi (beban motor) yang tetap. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk melihat kemampuan sistem dalam mencapai *steady state* pada tiap titik perpindahannya pada torsi yang tetap. Untuk urutan perpindahan kecepatan pada pengujian ini adalah sebagai berikut : 500 RPM naik sampai dengan 3500 RPM dengan selisih 500 RPM tiap kenaikannya, kemudian turun dari 3500 RPM sampai dengan 500 RPM dengan 500 RPM tiap penurunannya, kemudian mode acak yaitu dari 500 RPM ke 1500 RPM lalu ke 500 RPM, lalu ke 2000 RPM dan terakhir ke 500 RPM. Sedangkan torsi yang digunakan adalah 0,6 Nm.

2. Kecepatan tetap dengan torsi yang berubah

Pada pengujian skenario kedua ini, sistem akan diubah nilai dari nilai torsi (beban motor) dengan kecepatan yang tetap. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk melihat kemampuan sistem dalam menstabilkan kondisi kecepatan yang diinginkan oleh *user*. Untuk urutan perpindahan torsi pada pengujian ini adalah sebagai berikut

0.5, 1, 2, 3, 2, 1, 0.5, 3, 0.5, 3, 0.5 Nm. Sedangkan kecepatan yang dipertahankan adalah 2500 RPM.

Dalam pengujian ini, terdapat beberapa data yang diambil. Data yang diambil adalah waktu, kecepatan referensi (*setpoint*), nilai *error*, nilai *delta error*, nilai *duty cycle*, torsi yang mengenai motor dan nilai tegangan serta arus keluaran dari *Inverter*. Semua data tersebut akan digunakan untuk kemudian dibandingkan performa dari *intelligence control* dengan menggunakan parameter pembanding yang digunakan.

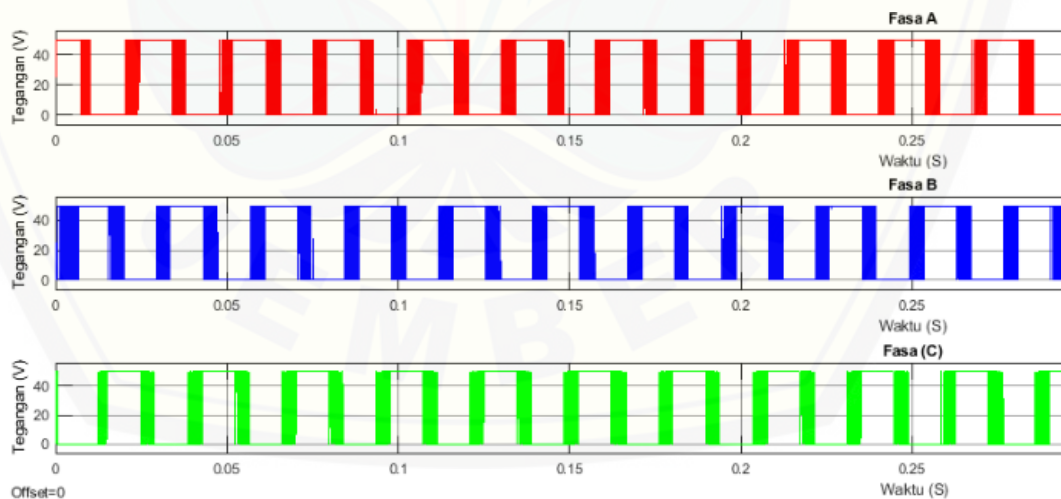


BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian *Inverter*

Pada pengujian tahap ini yaitu pengujian untuk mengetahui kinerja dari inverter. Untuk target pengujian pada kali ini yaitu untuk mengetahui apakah dengan semakin besarnya tegangan yang dimasukkan menuju inverter akan semakin mempercepat putaran motor BLDC. Maka dari itu, pada pengujian kali ini akan dilakukan dengan cara memberikan empat nilai tegangan suplai yang berbeda dari nilai terkecil hingga terbesar. Tegangan tersebut diantaranya adalah 50, 100, 200, 400 VDC. Kemudian untuk mengetahui apakah inverter telah bekerja sesuai dengan yang diinginkan atau tidak (semakin bertambah nilai kecepatannya seiring dengan bertambah besarnya nilai tegangan yang dimasukkan) maka dapat dilihat dari respon EMF dan sensor *hall*. Hal ini dikarenakan indikator kecepatan dari motor BLDC dapat dilihat dari seberapa cepat respon EMF dan sensor *hall*.

a) Tegangan Suplai 50V



Gambar 4.1 Tegangan *Output* pada *Inverter* dengan Suplai 50V

BAB 5. PENUTUP

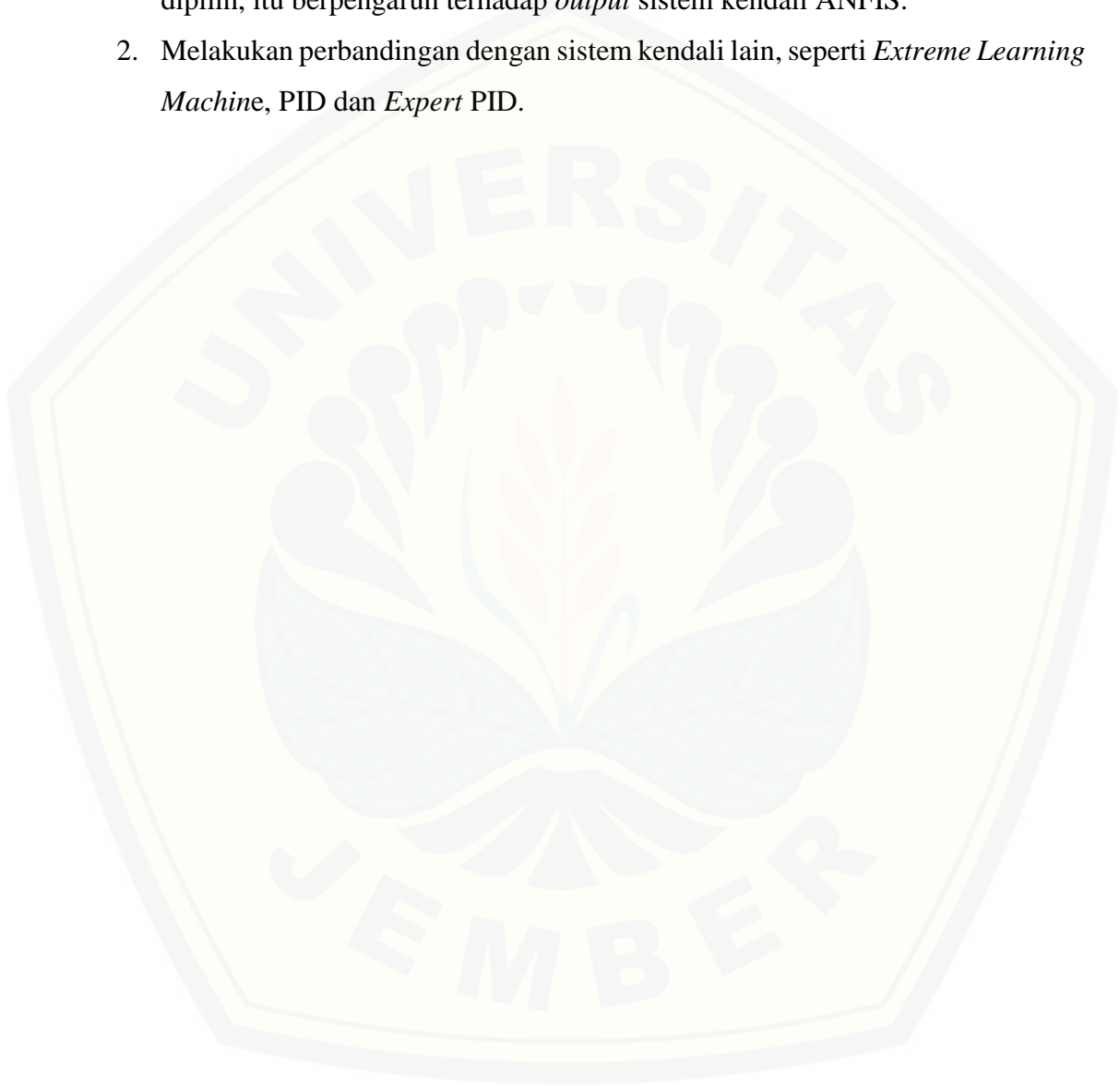
5.3.2.3 Kesimpulan

Dari hasil yang telah didapatkan, maka dapat disimpulkan beberapa kesimpulan, diantaranya adalah :

1. Dari hasil pengujian yang dilakukan, peneliti telah berhasil mendesain sistem pengendalian kecepatan motor BLDC dengan jenis pengendalian kecepatan berdasarkan pengendalian *supply* tegangan pada *inverter* dan menggunakan sistem kendali cerdas berupa *Artificial Neural Network* (ANN) dan *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS).
2. Dari segi performa, kecepatan dan kestabilan, *Artificial Neural Network* (ANN) memiliki performa yang bagus. Hal ini dapat dibuktikan dari skenario 1 dimana *Artificial Neural Network* (ANN) memiliki *settling time* yang lebih kecil dibandingkan dengan yang lainnya. Kecepatan yang dicapai ANN pada pengujian ini adalah 1,616 kali lebih cepat dari ANFIS untuk *settling time*, berbeda untuk nilai *overshoot* atau *overdamp* sistem kendali ANFIS mempunyai selisih sebesar 6,21% dari sistem kendali ANN. Serta dari sisi kestabilan yaitu dapat dilihat pada skenario 2 yang memiliki nilai *Mean Absolute Error* (MAE) yang lebih kecil dibandingkan yang lainnya atau 1,496 lebih baik dari ANFIS.

5.2 Saran

1. Pada saat melakukan *training* data pada sistem kendali ANFIS lebih baik memperhatikan terlebih dahulu data yang akan di *train* karena sebelum *training* data ANFIS terdapat beberapa sinyal *input* dan *output* yang harus dipilih, itu berpengaruh terhadap *output* sistem kendali ANFIS.
2. Melakukan perbandingan dengan sistem kendali lain, seperti *Extreme Learning Machine*, PID dan *Expert PID*.



DAFTAR PUSTAKA

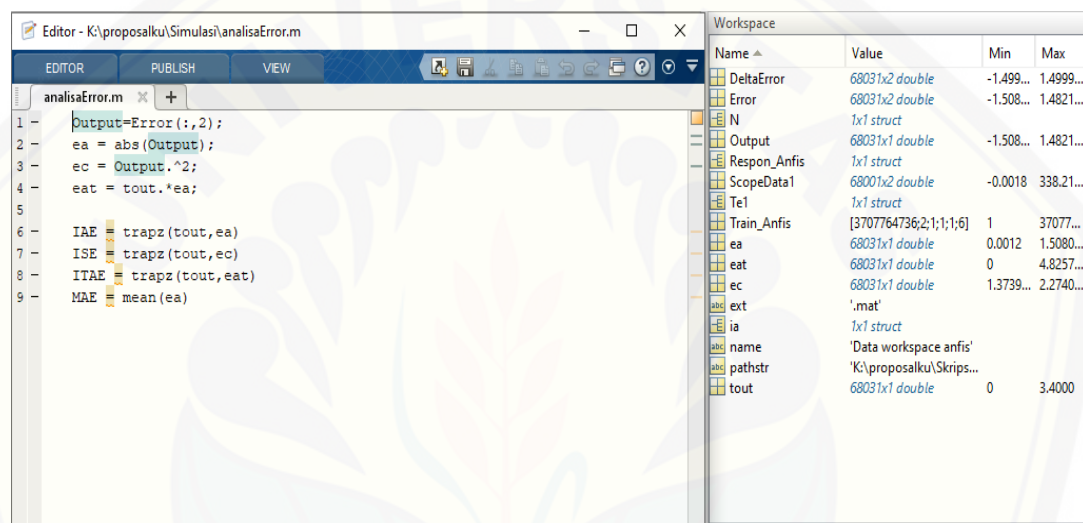
- Alireza Rezvani, M. I. (2015). Implementing GA-ANFIS for Maximum Power Point Tracking in PV System. *Indian Journal of Science and Technology*.
- Cries Avian, B. S. (2019). Response Improvement of BLDC Motor Speed using Extreme Learning Machine Controller. *International Journal of Engineering Research and Management (IJERM)*.
- Dr. T. Govindaraj, a. S. (2014). Simulation Modelling of Sensor less Speed Control Of BLDC Motor Using Artificial Neural Network. *International Journal of Emerging Trends in Electrical and Electronics*.
- Hui yang, Y. T. (2013). Speed Tracking Control Using an ANFIS Model for High Speed Electric Multiple Unit. *Elsevier*.
- Inradewa, E. (2013). Brushless Motor DC. *Jurnal Elektromagnetika*.
- Janusz Kacprzyk, W. P. (2015). *Handbook of Computational Intelligence*. Springer.
- Kumari, S. a. (2018). GA Based Design of Current Conveyor PID Controller for the Speed Control of BLDC Motor.
- Kusumadewi, S., & Hartati, S. (2010). *Neuro-Fuzzy : Integrasi Sistem Fuzzy dan Jaringan Syaraf*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Muhammad Nizam, A. M. (2013). Modelling on BLDC Motor Performance Using Artificial Neural Network (ANN). *2013 Joint International Conference on Rural Information & Communication Technology and Electric Vehicle*.
- Reqzy, M. (2019). Motor 3 phase. *BLDC*.
- Wen Tan, H. J. (2004). Multimodel Analysis and Controller Design for Nonlinear Processes. *Computers and Chemical Engineering*.
- Wen Tan, H. J. (2004). Performance Assessment of PID.
- Widjonarko, R. s. (2019). Comparison of Intelligence control Systems for Voltage Controlling on Small Scale Compressed Air Energy Storage. *Energies*.
- Yashoda, M., & O., S. C. (2016). Design and Analysis based BLDC Motor.
- Yedamale, P. (2003). *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. Microchip Technology, Inc.

Lampiran 1. Perhitungan MAE sistem Kendali ANN dan ANFIS

```

Output=Error(:,2);
ea = abs(Output);
ec = Output.^2;
eat = tout.*ea;

IAE = trapz(tout,ea)
ISE = trapz(tout,ec)
ITAE = trapz(tout,eat)
MAE = mean(ea)
    
```



Hasil Perhitungan Sistem Kendali *Fuzzy* Skenario 1

```

IAE =
    156.3967

ISE =
    6.2140e+04

ITAE =
    277.4092

MAE =
    46.2236
    
```

Hasil Perhitungan Sistem Kendali *Artificial Neural Network* (ANN) Skenario 1

```
>> analisaError
```

```
IAE =
```

```
105.6280
```

```
ISE =
```

```
5.7289e+04
```

```
ITAE =
```

```
208.0630
```

```
MAE =
```

```
31.3003
```

Hasil Perhitungan Sistem Kendali *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS)

Skenario 2

```
IAE =
```

```
161.3453
```

```
ISE =
```

```
6.7013e+04
```

```
ITAE =
```

```
307.2082
```

```
MAE =
```

```
47.6808
```

Lampiran 2. Data Train Sistem Kendali ANN dan ANFIS

NO	ERROR	DELTA ERROR	OUTPUT
1	0,00	0,00	-0,0000694
2	43,1356	86,3433	0,8116
3	86,2356	-87,1142	-0,7494
4	129,2642	1,5847	0,2772
5	172,1860	85,517	0,7569
6	214,9653	-87,8642	-0,3548
7	257,5667	3,0970	0,4410
8	299,9522	84,7395	0,7809
9	342,0955	-88,5931	-0,3710
10	383,9529	4,6445	-0,4574
11	425,4927	83,9071	-0,8014
12	466,6806	-89,3007	0,3830
13	507,4824	6,1909	0,4746
14	547,8645	83,0545	0,8085
15	587,7934	-89,9870	-0,3877
16	627,2361	7,7359	0,4914
17	666,1600	82,1820	0,8072
18	704,5329	-90,6517	-0,3723
19	742,3231	9,2790	0,5144
20	779,4993	81,2898	-0,7768
21	816,0307	-91,2946	-0,2813
22	851,8871	10,8199	-0,5978
23	887,0389	80,3781	-0,7638
24	921,4570	-91,9156	-0,0000947
25	955,1129	12,3581	0,7735
26	987,9788	79,4472	0,7780
27	1020,0274	-92,5146	-0,0000875
28	1051,2324	13,8934	0,7842
29	1081,5679	78,4971	0,7901
30	1111,0087	-93,0914	-0,0000753
31	1139,5306	15,4254	0,7788
32	1167,1100	77,5283	0,7997
33	1193,7240	-93,6459	-0,0000741
34	1219,3506	16,9537	-0,7790
35	1243,9686	76,5408	-0,7981
36	1267,5577	-94,1779	-0,0000697
37	1290,0983	18,4779	0,7826
38	1311,5719	75,5350	0,7963
39	1331,9606	-94,6873	-0,0000695

40	1351,2475	19,9977	0,7862
41	1369,4168	74,5111	0,7945
42	1386,4534	-95,1740	-0,0000685
43	1402,3432	21,5127	0,7896
44	1417,0731	73,4693	0,7926
45	1430,6309	-95,6379	-0,0000681
46	1443,0053	23,0225	-0,7929
47	1454,1861	72,4098	-0,7907
48	1464,1641	-96,0788	-0,0000681
49	1472,9311	24,5268	0,7961
50	1480,4797	71,3330	0,7887
51	1486,8038	-96,4967	-0,0000681
52	1491,8980	26,0252	0,7992
53	1495,7583	70,2391	0,7866
54	1498,3813	-96,8915	-0,0000681
55	1499,7650	21,5174	0,8022
56	1499,9082	69,1284	0,7844
57	1498,8107	-97,2630	-0,0000681
58	1496,4735	29,0030	-0,8051
59	1492,8985	68,0011	-0,7823
60	1488,0886	-97,6112	-0,0000681
61	1482,0479	30,4816	0,8077
62	1474,7814	66,8574	0,7800
63	1466,2950	-97,9359	-0,0000681
64	1456,5957	31,9529	0,8103
65	1445,6916	65,6978	0,7777
66	1433,5918	-98,2372	-0,0000681
67	1420,3061	33,4166	0,8127
68	1405,8457	64,5223	0,7753
69	1390,2224	-98,5149	-0,0000684
70	1373,4493	34,8722	-0,8149
71	1355,5401	63,3314	-0,7728
72	1336,5096	-98,7690	-0,0000694
73	1316,3737	36,3194	0,8148
74	1295,1489	62,1253	0,7703
75	1272,8529	-98,9994	-0,0000694
76	1249,5041	37,7580	0,8088
77	1225,1217	60,9043	0,7676
78	1199,7260	-99,2061	-0,0000737
79	1173,3379	39,1875	0,8099
80	1145,9794	59,6687	0,7650

81	1534,10	39,01	0,76
82	1542,41	4,42	0,81
83	1563,93	-45,29	0,00
84	1585,35	41,06	0,76
85	1593,56	49,01	0,74
86	1614,82	-33,16	0,00
87	1635,97	-15,71	0,00
88	1644,07	23,39	0,80
89	1665,06	26,48	0,79
90	1685,93	-49,97	0,00
91	1693,93	-35,74	0,00
92	1714,63	48,18	0,74
93	1735,22	-12,64	0,00
94	1743,11	-43,67	0,00
95	1763,52	0,86	0,80
96	1783,81	42,81	0,75
97	1791,59	10,97	0,80
98	1811,70	-47,70	0,00
99	1831,70	36,92	0,77
100	1839,35	49,89	0,73
101	1859,16	-27,92	0,00
102	1878,84	-21,86	0,00
103	1886,38	17,33	0,79
104	1905,88	31,86	0,78
105	1925,24	-49,32	0,00
106	1932,65	-40,06	0,00
107	1951,83	45,99	0,75
108	1970,87	-6,12	0,22
109	1978,15	-40,06	0,00
110	1997,00	-5,77	0,28
111	2015,71	45,85	0,75
112	2022,86	17,33	0,79
113	2041,37	-49,26	0,00
114	2059,74	32,13	0,78
115	2066,76	49,89	0,73
116	2084,93	-22,18	0,00
117	2102,95	-27,62	0,00
118	2109,84	10,97	0,78
119	2127,65	36,68	0,77
120	2145,31	-47,80	0,00
121	2152,07	-43,66	0,00

122	2169,52	42,99	0,75
123	2186,82	0,50	0,78
124	2193,44	-35,74	0,00
125	2210,53	-12,29	0,00
126	2227,46	48,09	0,74
127	2233,93	23,39	0,77
128	2250,64	-49,96	0,00
129	2267,20	26,78	0,77
130	2273,53	49,01	0,74
131	2289,86	-16,05	0,00
132	2306,04	-32,89	0,00
133	2312,22	4,42	0,77
134	2328,17	40,85	0,76
135	2343,95	-45,44	0,00
136	2349,98	-46,50	0,00
137	2365,54	39,23	0,76
138	2380,93	7,11	0,77
139	2386,80	-30,80	0,00
140	2401,96	-18,60	0,00
141	2416,95	49,48	0,74
142	2422,67	29,03	0,77
143	2437,43	-49,78	0,00
144	2452,01	20,96	0,76
145	2457,57	47,27	0,74
146	2471,92	-9,65	0,00
147	2486,09	-37,59	0,00
148	2491,49	-2,21	0,53
149	2505,42	44,31	0,75
150	2519,17	-42,28	0,00
151	2524,41	-48,53	0,00
152	2537,92	34,78	0,76
153	2551,25	13,60	0,76
154	2556,32	-25,32	0,00
155	2569,40	-24,58	0,00
156	2582,30	50,00	0,73
157	2587,21	34,16	0,76
158	2599,86	-48,73	0,00
159	2612,32	14,76	0,76
160	2617,07	44,70	0,75
161	2629,27	-3,07	0,35
162	2641,30	-41,62	0,00

163	2645,87	-8,80	0,00
164	2657,64	46,99	0,74
165	2669,22	-38,38	0,00
166	2673,62	-49,69	0,00
167	2684,94	29,72	0,75
168	2696,07	19,85	0,75
169	2700,30	-19,39	0,00
170	2711,17	-30,12	0,00
171	2721,85	49,64	0,73
172	2725,90	38,69	0,75
173	2736,31	-46,81	0,00
174	2746,53	8,31	0,75
175	2750,41	41,34	0,75
176	2760,36	3,56	0,75
177	2770,12	-44,92	0,00
178	2773,82	-15,24	0,00
179	2783,30	48,84	0,74
180	2792,60	-33,80	0,00
181	2796,12	-49,99	0,00
182	2805,14	24,14	0,74
183	2813,96	25,75	0,74
184	2817,30	-13,12	0,00
185	2825,85	-35,14	0,00
186	2834,19	48,40	0,74
187	2837,35	42,54	0,74
188	2845,42	-44,08	0,00
189	2853,30	1,71	0,74
190	2856,27	37,26	0,74
191	2863,87	10,13	0,74
192	2871,26	-47,43	0,00
193	2874,05	-21,41	0,00
194	2881,16	49,83	0,73
195	2888,07	-28,62	0,00
196	2890,67	-49,40	0,00
197	2897,30	18,13	0,74
198	2903,73	31,19	0,74
199	-832,6648	85,3236	0,2608
200	-796,4412	1,9875	-0,4661
201	-759,5588	-87,3288	-0,7833
202	-722,0482	86,1210	0,3656
203	-683,9403	0,4389	-0,3783

204	-645,2667	-85,7781	-0,8134
205	-606,0594	87,6538	0,3920
206	-566,3508	-2,6583	-0,4053
207	-526,1737	-84,9718	-0,8124
208	-485,5614	88,3887	0,3989
209	-444,5474	-4,2061	-0,4241
210	-403,1659	-84,1451	-0,7981
211	-361,4508	89,1024	0,3787
212	-319,4367	-5,7528	-0,4483
213	-277,1585	-83,2982	-0,7770
214	-234,6509	89,7947	0,3629
215	-191,9493	-5,7528	-0,5069
216	-149,0889	-83,2982	-0,7525
217	-106,1052	89,7947	0,6531
218	-63,0337	-7,2983	-0,1933
219	-19,9101	-82,4313	-0,8076
220	23,2300	90,4655	0,8179
221	66,3508	-8,8419	-0,1685
222	109,4168	-81,5447	-0,6908
223	152,3923	91,1146	0,7529
224	195,2417	-10,3835	0,2527
225	237,9297	-80,6385	-0,3581
226	280,4208	91,7419	0,7774
227	322,6800	-11,9225	0,2915