

LAPORAN TUGAS AKHIR
KARYA ILMIAH TERAPAN

**PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR LISTRIK PADA
KAPAL *TRIMARAN* BERBASIS *FUZZY LOGIC***



AAR MAYZA PRATAMA
NIT 09.21.001.1.03

disusun sebagai salah satu syarat
menyelesaikan program pendidikan sarjana terapan

POLITEKNIK PELAYARAN SURABAYA
PROGRAM STUDI SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA KELISTRIKAN KAPAL
TAHUN 2025

LAPORAN TUGAS AKHIR
KARYA ILMIAH TERAPAN

**PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR LISTRIK PADA
KAPAL *TRIMARAN* BERBASIS *FUZZY LOGIC***



AAR MAYZA PRATAMA
NIT 09.21.001.1.03

disusun sebagai salah satu syarat
menyelesaikan program pendidikan sarjana terapan

POLITEKNIK PELAYARAN SURABAYA
PROGRAM STUDI SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA KELISTRIKAN KAPAL
TAHUN 2025

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : AAR MAYZA PRATAMA

Nomor Induk Taruna : 09.21.001.1.03

Progam Studi : SARJANA TERAPAN TEKNOLOGI REKAYASA
KELISTRIKAN KAPAL

Menyatakan bahwa KIT yang saya tulis dengan judul:

“PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR LISTRIK PADA KAPAL

TRIMARAN BERBASIS FUZZY LOGIC”

Merupakan karya asli seluruh ide yang ada dalam KIT tersebut, kecuali tema yang saya nyatakan sebagai kutipan, merupakan ide saya sendiri. Jika pernyataan diatas terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi yang ditetapkan oleh Politeknik Pelayaran Surabaya.

Surabaya, 7 Agustus 2025



Aar Mayza Pratama
NIT. 09.21.001.1.03

**PERSETUJUAN UJI KELAYAKAN
PROPOSAL TUGAS AKHIR**

Judul : PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR LISTRIK PADA
KAPAL *TRIMARAN* BERBASIS *FUZZY LOGIC*
Program Studi : Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal
Nama : AAR MAYZA PRATAMA
NIT : 09.21.001.1.03
Jenis Tugas Akhir : Karya Ilmiah Terapan

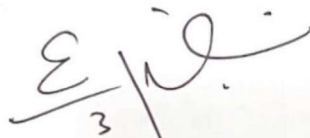
Dengan ini dinyatakan bahwa telah memenuhi syarat dan disetujui untuk dilaksanakan
Uji Kelayakan Proposal

Surabaya, 16 Desember 2024

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



EDI KURNIAWAN, SST.MT
NIP. 19831202201921001



AKHMAD KASAN GUPRON, M.Pd
NIP. 198005172005021003

Ketua Program Studi
Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal



AKHMAD KASAN GUPRON, M.Pd
NIP. 198005172005021003

**PERSETUJUAN SEMINAR
HASIL TUGAS AKHIR**

Judul : PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR LISTRIK PADA
KAPAL *TRIMARAN* BERBASIS *FUZZY LOGIC*
Program Studi : Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal
Nama : AAR MAYZA PRATAMA
NIT : 09.21.001.1.03
Jenis Tugas Akhir : Karya Ilmiah Terapan

Dengan ini dinyatakan bahwa telah memenuhi syarat dan disetujui untuk dilaksanakan
Seminar Hasil Tugas Akhir

Surabaya, 23 Juli 2025

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



EDI KURNIAWAN, SST.MT

NIP. 19831202201921001



AKHMAD KASAN GUPRON, M.Pd

NIP. 198005172005021003

Mengetahui,

Ketua Program Studi

Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal



DIRHAMSYAH, S.E, M.Pd

NIP. 197504302002121002

PENGESAHAN
PROPOSAL TUGAS AKHIR
KARYA ILMIAH TERAPAN

PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR LISTRIK PADA
KAPAL TRIMARAN BERBASIS FUZZY LOGIC

Disusun oleh:

AAR MAYZA PRATAMA

NIT. 09.21.001.1.03

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji Hasil Tugas Akhir
Politeknik Pelayaran Surabaya

Surabaya, 7 Januari 2025

Mengesahkan,

Dosen Penguji I

Dosen Penguji II

Dosen Penguji III



SRI MULYANTO H. S.T., M.T
NIP. 197204181998031000



FRENKI IMANTO, S.SiT., M.Pd
NIP. 198210062010121001



EDI KURNIAWAN, SST, MT
NIP. 198312022019021001

Mengetahui,
Ketua Program Studi
Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal



DIRHAMSYAH, S.E., M.Pd
NIP. 197504302002121002

PENGESAHAN
LAPORAN TUGAS AKHIR
KARYA ILMIAH TERAPAN

PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR LISTRIK PADA
KAPAL TRIMARAN BERBASIS FUZZY LOGIC

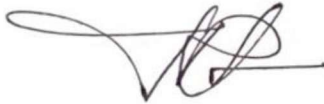
Disusun oleh:

AAR MAYZA PRATAMA
NIT. 09.21.001.1.03

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji Hasil Tugas Akhir
Politeknik Pelayaran Surabaya

Surabaya, 1 Agustus 2025
Mengesahkan,

Dosen Penguji I



SRI MULYANTO H. S.T., M.T
NIP. 197204181998031000

Dosen Penguji II



FRENKI IMANTO, S.Si.T., M.Pd
NIP. 198210062010121001

Dosen Penguji III



EDI KURNIAWAN, SST, MT
NIP. 198312022019021001

Mengetahui,
Ketua Program Studi
Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal



DIRHAMSVAH, S.E., M.Pd
NIP. 197504302002121002

ABSTRAK

AAR MAYZA PRATAMA, Pengendalian Kecepatan Motor Listrik Pada Kapal *Trimaran* Berbasis *Fuzzy Logic*. Dibimbing oleh Edi Kurniawan, S.ST.,M.T. dan Akhmad Kasan Gupron, M.Pd.

Kontrol kecepatan motor listrik pada kapal trimaran merupakan tantangan penting dalam meningkatkan kinerja operasional kapal dan mengurangi emisi bahan bakar disektor transportasi maritim. Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem kontrol kecepatan motor BLDC berbasis *fuzzy logic*, yang mampu menangani dinamika *non-linear* dan ketidakpastian dibandingkan kontrol konvensional. Sistem menggunakan mikrokontroler STM32 sebagai pengendali utama, serta dilengkapi dengan sensor *photodiode* untuk pengukuran RPM, ACS758 untuk arus, dan pembagi tegangan untuk pemantauan suplai daya. *Fuzzy logic* dikembangkan menggunakan lima kategori linguistik dan aturan IF-THEN, dengan output PWM yang dikirim ke ESC untuk mengatur kecepatan motor. Pengujian dilakukan secara statis dan dinamis. Hasil pengujian statis menunjukkan akurasi tinggi, dengan rata-rata *error* semua komponen kurang dari 5%. Pada pengujian dinamis, kontrol *fuzzy* mampu menurunkan deviasi kecepatan motor secara signifikan, dari *error set point* RPM sebesar 15–18,5% menjadi 6,7–8,2%. Penurunan *error* terbesar terjadi pada 10.000 RPM, dari 18,5% menjadi 7,7%. Sistem juga menunjukkan peningkatan sinkronisasi antar motor, kecepatan kapal lebih stabil, serta distribusi arus dan tegangan yang lebih seimbang meskipun konsumsi arus meningkat. Secara keseluruhan, sistem ini menunjukkan bahwa kontrol *fuzzy* tidak hanya meningkatkan stabilitas kecepatan motor, tetapi juga meningkatkan efektivitas dan kinerja sistem propulsi kapal secara keseluruhan. Sistem ini layak diterapkan pada kapal dan berpotensi menjadi referensi dalam pengembangan teknologi kontrol motor laut yang lebih cerdas dan efektif.

Kata Kunci : sistem kapal trimaran, logika *fuzzy*, motor bldc

ABSTRACT

AAR MAYZA PRATAMA, Speed Control of Electric Motors on Trimaran Vessels Based on Fuzzy Logic. Supervised by Edi Kurniawan, S.ST., M.T. and Akhmad Kasan Gupron, M.Pd.

Speed control of electric motors in trimaran vessels presents a significant challenge in enhancing operational performance and reducing fuel emissions in the maritime transport sector. This study successfully designed and implemented a fuzzy logic-based speed control system for Brushless DC (BLDC) motors, capable of addressing non-linear dynamics and system uncertainties more effectively than conventional control methods. The system utilizes an STM32 microcontroller as the main controller, integrated with a photodiode sensor for RPM measurement, ACS758 for current sensing, and a voltage divider for supply voltage monitoring. The fuzzy logic controller was developed using five linguistic categories and a set of IF-THEN rules, with the output in the form of PWM signals sent to an Electronic Speed Controller (ESC) to regulate motor speed. Both static and dynamic tests were conducted. The results of the static testing showed high accuracy, with the average error of all components being less than 5%. Under dynamic conditions, the fuzzy controller significantly reduced speed deviation, lowering the RPM set point error from 15–18.5% to 6.7–8.2%. The largest improvement was observed at 10,000 RPM, where the error dropped from 18.5% to 7.7%. The system also demonstrated improved motor synchronization, more stable vessel motion, and more balanced power distribution, despite a slight increase in current consumption. Overall, the findings confirm that fuzzy logic control not only enhances motor speed stability but also improves the overall efficiency and performance of the marine propulsion system. This system is well-suited for application in trimaran vessels and holds promise as a reference for the development of smarter and more energy-efficient marine motor control technologies.

Keywords : *Trimaran vessels systems, fuzzy logic, BLDC motors*

KATA PENGANTAR

Puja dan Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas segala limpah rahmat, kasih karunia dan berkat yang diberikan, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir dengan judul “PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR LISTRIK PADA KAPAL TRIMARAN BERBASIS FUZZY LOGIC” Penelitian tugas akhir ini adalah dalam maksud untuk menyelesaikan program studi Sarjana Terapan di Politeknik Pelayaran Surabaya.

Penulis menyadari adanya kekurangan dalam penyajian materi dan teknik penulisan dalam karya ilmiah terapan ini. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan koreksi dan saran untuk meningkatkan kualitas proposal ini.

Pada kesempatan ini penulis ingin berterima kasih kepada:

1. Bapak Moejiono, MT. M.Mar.E selaku Direktur Politeknik Pelayaran Surabaya yang telah menyediakan sarana dan prasarana untuk kelancaran penyelesaian KIT.
2. Bapak Edi Kurniawan, S.ST.,M.T. dan Bapak Akhmad Kasan Gupron, M.Pd selaku dosen pembimbing yang telah mendidik dengan baik dan sabar.
3. Bapak Dirhamsyah, S.E.,M.Pd. selaku Ketua Prodi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal, yang telah mendukung jalannya penelitian ini.
4. Kedua Orang tua saya, Sapto Arifin dan Triana Wijayati serta adik saya Restu Abdillah dan Kamila Normalia Dewi, serta keluarga besar saya yang selalu memberikan dukungan berupa doa, moral dan material.
5. Kepada Sahabat-Sahabat saya. Terimakasih sudah menjadi sahabat sepenuhnya mendengarkan keluh kesah dan membantu dalam penyusunan KIT.
6. Kepada kelompok peneliti yang terdiri dari 7 taruna dan taruni. Terimakasih sudah membantu jalannya penelitian ini. Sukses sampai ketemu lagi.

Saya menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan proposal ini. Kritik dan saran yang membangun sangat saya harapkan dan semoga penelitian ini akan bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya,.....2025

Aar Mayza Pratama
NIT. 0921001103

DAFTAR ISI

JUDUL KARYA ILMIAH TERAPAN.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
PERSETUJUAN UJI KELAYAKAN PROPOSAL TUGAS AKHIR.....	iii
PERSETUJUAN SEMINAR HASIL TUGAS AKHIR.....	iv
PENGESAHAN PROPOSAL TUGAS AKHIR.....	v
PENGESAHAN LAPORAN TUGAS AKHIR.....	vi
ABSTRAK	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	4
C. Batasan Masalah.....	4
D. Tujuan Penelitian	5
E. Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
A. <i>Review</i> Penelitian Sebelumnya	7
B. Landasan Teori.....	9
1. Motor BLDC	10
2. <i>Electronic Speed Controller</i> (ESC).....	11

3. STM32	12
4. Sensor ACS758	13
5. <i>Voltage Sensor Divider</i>	14
6. Sensor <i>Photodiode</i>	15
7. Baterai <i>Lithium Polymer (Li-Po)</i>	16
8. ESP32.....	17
9. <i>Fuzzy Logic</i>	18
10. Kapal <i>Trimaran</i>	18
C. Kerangka Berfikir.....	19
BAB III METODE PENELITIAN	21
A. Perancangan Sistem	21
B. Perancangan Alat	22
C. Rencana Pengujian	34
1. Rancangan Pengujian Statis	34
2. Rancangan Pengujian Dinamis	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	39
A. Hasil Penelitian	39
1. Pengujian Statis.....	39
2. Pengujian Dinamis	57
3. Sistem <i>Fuzzy</i> Kecepatan Motor Listrik Pada Kapal <i>Trimaran</i> ...	83
B. Analisa Data	84
C. Kajian Produk Akhir	107
BAB V SIMPULAN DAN SARAN.....	109
A. SIMPULAN	109

B. SARAN	110
DAFTAR PUSTAKA	112

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 <i>Review</i> Penelitian Sebelumnya	7
Tabel 2. 2 Spesifikasi Motor BLDC	11
Tabel 2. 3 Spesifikasi ESC.....	12
Tabel 2. 4 Spesifikasi Batrai Li-Po	16
Tabel 3. 1 Tabel Fuzzyfikasi	25
Tabel 3. 2 Tabel <i>Rule Base</i>	26
Tabel 3. 3 Koneksi Komponen.....	31
Tabel 4. 1 Pengujian ESC Segi RPM.....	43
Tabel 4. 2 Pengujian ESC Segi Tegangan	45
Tabel 4. 3 Pengujian <i>Photodiode</i> dengan <i>Tachometer</i>	48
Tabel 4. 4 Pengujian Sensor ACS758	53
Tabel 4. 5 Pengujian Sensor <i>Voltage Divider</i>	56
Tabel 4. 6 Rata-rata <i>Error</i> Motor BLDC	105

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Motor BLDC Sumber:.....	11
Gambar 2. 2 ESC	12
Gambar 2. 3 STM32.....	13
Gambar 2. 4 Sensor ACS758	14
Gambar 2. 5 Voltage Sensor Divider	15
Gambar 2. 6 Sensor <i>Photodiode</i>	16
Gambar 2. 7 Baterai Li-Po	17
Gambar 2. 8 ESP32	17
Gambar 2. 9 Blok Diagram <i>Fuzzy Logic</i>	18
Gambar 2. 10 Kapal Timaran.....	19
Gambar 2. 11 Kerangka Berfikir.....	20
Gambar 3. 1 Blok Diagram Perancangan Sistem.....	21
Gambar 3. 2 Blok Diagram Perancangan Alat.....	22
Gambar 3. 3 <i>Flowchart</i>	24
Gambar 3. 4 Blok Diagram Alat	29
Gambar 3. 5 Wiring Diagram.....	31
Gambar 3. 6 <i>Prototype</i> Kapal <i>Trimaran</i>	38
Gambar 4. 1 Pengujian Motor BLDC Kondisi <i>Off</i>	40
Gambar 4. 2 Pengujian Motor BLDC Kondisi <i>On</i>	40
Gambar 4. 3 Pengujian ESC.....	42
Gambar 4. 4 Pembacaan Serial Monitor	43
Gambar 4. 5 Pengujian Fungsi dari STM32	46
Gambar 4. 6 Pengujian <i>Photodiode</i>	48
Gambar 4. 7 Serial Monitor Sensor <i>Photodiode</i> untuk RPM.....	49
Gambar 4. 8 Pengujian ESP32 dengan LED.....	50
Gambar 4. 9 Pengujian Menggunakan 1 Resistor 5.6 Ω Tunggal.....	52
Gambar 4. 10 Pengujian Menggunakan 2 Resistor 5.6 Ω Seri	52
Gambar 4. 11 Pengujian Sensor <i>Voltage Divider</i>	55
Gambar 4. 12 Pengujian Sensor <i>Voltage Divider</i>	56
Gambar 4. 13 Rangkaian Komponen Pada Kapal <i>Trimaran</i>	58
Gambar 4. 14 Grafik <i>Set Point</i> 6000 RPM Tanpa <i>Fuzzy</i>	59
Gambar 4. 15 Grafik Tegangan Pada 6.000 RPM Tanpa <i>Fuzzy</i>	60
Gambar 4. 16 Grafik Ampere Pada 6.000 RPM Tanpa <i>Fuzzy</i>	60
Gambar 4. 17 Grafik Kecepatan Pada 6.000 RPM Tanpa <i>Fuzzy</i>	61
Gambar 4. 18 Grafik <i>Set Point</i> 6000 RPM Dengan Kontrol <i>Fuzzy</i>	62
Gambar 4. 19 Grafik Tegangan Pada 6.000 RPM Dengan <i>Fuzzy</i>	63
Gambar 4. 20 Grafik Ampere Pada 6.000 RPM Dengan <i>Fuzzy</i>	63
Gambar 4. 21 Grafik Kecepatan Pada 6.000 RPM Dengan <i>Fuzzy</i>	64
Gambar 4. 22 Grafik <i>Set Point</i> 7000 RPM Tanpa <i>Fuzzy</i>	65
Gambar 4. 23 Grafik Tegangan Pada 7.000 RPM Tanpa <i>Fuzzy</i>	65
Gambar 4. 24 Grafik Ampere Pada 7.000 RPM Tanpa <i>Fuzzy</i>	66
Gambar 4. 25 Grafik Kecepatan pada 7.000 RPM Tanpa <i>Fuzzy</i>	66
Gambar 4. 26 Grafik <i>Set Point</i> RPM 7.000 dengan <i>fuzzy</i>	67
Gambar 4. 27 Grafik Tegangan Pada 7.000 RPM Dengan <i>Fuzzy</i>	68
Gambar 4. 28 Grafik Ampere Pada 7.000 RPM Dengan <i>Fuzzy</i>	68

Gambar 4. 29 Grafik Kecepatan Pada 7.000 RPM Dengan <i>Fuzzy</i>	69
Gambar 4. 30 Grafik <i>Set Point</i> 8.000 RPM Tanpa <i>Fuzzy</i>	70
Gambar 4. 31 Grafik Tegangan Pada 8.000 RPM Tanpa <i>Fuzzy</i>	70
Gambar 4. 32 Grafik Ampere Pada 8.000 RPM Tanpa <i>Fuzzy</i>	71
Gambar 4. 33 Grafik Kecepatan Pada 8.000 RPM Tanpa <i>Fuzzy</i>	71
Gambar 4. 34 Grafik <i>Set Point</i> 8.000 RPM dengan <i>Fuzzy</i>	72
Gambar 4. 35 Grafik Tegangan Pada 8.000 RPM Dengan <i>Fuzzy</i>	73
Gambar 4. 36 Grafik Ampere Pada 8.000 RPM Dengan <i>Fuzzy</i>	73
Gambar 4. 37 Grafik Kecepatan Pada 8.000 RPM Dengan <i>Fuzzy</i>	74
Gambar 4. 38 Grafik <i>Set Point</i> 9.000 RPM Tanpa <i>Fuzzy</i>	75
Gambar 4. 39 Grafik Tegangan Pada 9.000 RPM Tanpa <i>Fuzzy</i>	75
Gambar 4. 40 Grafik Ampere Pada 9.000 RPM Tanpa <i>Fuzzy</i>	76
Gambar 4. 41 Grafik Kecepatan Pada 9.000 RPM Tanpa <i>Fuzzy</i>	76
Gambar 4. 42 Grafik <i>Set Point</i> 9.000 RPM dengan <i>Fuzzy</i>	77
Gambar 4. 43 Grafik Tegangan Pada 9.000 RPM Dengan <i>Fuzzy</i>	77
Gambar 4. 44 Grafik Ampere Pada 9.000 RPM Dengan <i>Fuzzy</i>	78
Gambar 4. 45 Grafik Kecepatan Pada 9.000RPM Dengan <i>Fuzzy</i>	78
Gambar 4. 46 Grafik <i>Set Point</i> 10.000 Tanpa <i>Fuzzy</i>	79
Gambar 4. 47 Grafik Tegangan Pada 10.000 RPM Tanpa <i>Fuzzy</i>	79
Gambar 4. 48 Grafik Ampere Pada 10.000 RPM Tanpa <i>Fuzzy</i>	80
Gambar 4. 49 Grafik Kecepatan Pada 10.000 RPM Tanpa <i>Fuzzy</i>	80
Gambar 4. 50 Grafik <i>Set Point</i> 10.000 dengan <i>Fuzzy</i>	81
Gambar 4. 51 Grafik Tegangan Pada 10.000 RPM Dengan <i>Fuzzy</i>	82
Gambar 4. 52 Grafik Ampere Pada 10.000 RPM Dengan <i>Fuzzy</i>	82
Gambar 4. 53 Grafik Kecepatan Pada 10.000 RPM Dengan <i>Fuzzy</i>	83
Gambar 4. 54 Grafik Perbandingan RPM Motor BLDC Pada 6000RPM	85
Gambar 4. 55 Grafik Perbandingan Voltasi Pada 6000RPM.....	86
Gambar 4. 56 Grafik Perbandingan Ampere Pada 6000RPM	87
Gambar 4. 57 Grafik Perbandingan Kecepatan Pada 6000RPM	88
Gambar 4. 58 Grafik Perbandingan RPM Motor BLDC Pada 7000RPM	89
Gambar 4. 59 Grafik Perbandingan Voltasi Pada 7000RPM.....	90
Gambar 4. 60 Grafik Perbandingan Ampere Pada 7000RPM	91
Gambar 4. 61 Grafik Perbandingan Kecepatan Pada 7000RPM	92
Gambar 4. 62 Grafik Perbandingan RPM Motor BLDC Pada 8000RPM	93
Gambar 4. 63 Grafik Perbandingan Voltasi Pada 8000RPM.....	94
Gambar 4. 64 Grafik Perbandingan Ampere Pada 8000RPM	95
Gambar 4. 65 Grafik Perbandingan Kecepatan Pada 8000RPM	96
Gambar 4. 66 Grafik Perbandingan RPM Motor BLDC Pada 9000RPM	97
Gambar 4. 67 Grafik Perbandingan Voltasi Pada 9000RPM.....	98
Gambar 4. 68 Grafik Perbandingan Ampere Pada 9000RPM	99
Gambar 4. 69 Grafik Perbandingan Kecepatan Pada 9000RPM	100
Gambar 4. 70 Grafik Perbandingan RPM Motor BLDC Pada 10.000 RPM	101
Gambar 4. 71 Grafik Perbandingan Voltasi Pada 10.000 RPM.....	102
Gambar 4. 72 Grafik Perbandingan Ampere Pada 10.000 RPM	103
Gambar 4. 73 Grafik Perbandingan Kecepatan Pada 10.000 RPM	104
Gambar 4. 74 Kerusakan Pada Rangkaian PCB	108

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Pelayaran merupakan kegiatan transportasi yang berlangsung disektor laut dan memegang peranan penting dalam mendukung perekonomian global (Pandjaitan et al., 2025). Terutama sebagai sarana pengangkutan barang dan penumpang. Agar pelayaran dapat berjalan lancar dan efisien, dibutuhkan moda transportasi laut yang andal, yaitu kapal.

Kapal berfungsi sebagai alat transportasi air yang dirancang untuk berbagai keperluan seperti pengangkutan barang dan penumpang, serta mendukung aktivitas kelautan lainnya secara efektif. Seiring meningkatnya kompleksitas kebutuhan operasional di dunia maritim, desain kapal terus berevolusi untuk mencapai stabilitas, kecepatan, dan efisiensi bahan bakar. Salah satu inovasi *modern* dalam desain kapal adalah kapal *trimaran*.

Kapal *trimaran* merupakan kapal *multi hull* dimana kapal ini memiliki lambung lebih dari satu lambung oleh karena itu *trimaran* berarti memiliki 3 buah lambung (Tupan & Luhulima, 2021). Desain semacam ini mampu meningkatkan pusat gravitasi (*Center of Gravity*) dan pusat daya apung (*Center of Buoyancy*) yang mampu mengurangi hambatan gelombang, sehingga memberikan stabilitas yang optimal.

Dengan keunggulan seperti kestabilan tinggi dan distribusi beban yang merata, kapal trimaran sangat potensial untuk diterapkan dalam dunia kapal niaga. Desainnya mendukung operasi di berbagai kondisi laut dan memberikan

kenyamanan serta keamanan lebih baik bagi muatan dan awak kapal. Pengembangan dan penerapan kapal *trimaran* sebagai kapal niaga *modern* merupakan langkah strategis dalam menjawab kebutuhan transportasi laut yang semakin kompleks dan dinamis, khususnya pada sektor logistik dan distribusi barang. Selain aspek stabilitas, kecepatan juga menjadi faktor utama yang dipertimbangkan dalam proses perancangan kapal, karena akan berdampak langsung pada efisiensi waktu tempuh dan kinerja operasional..

Pada kapal *trimaran*, aspek kecepatan menjadi prioritas penting, sehingga pemilihan dan perancangan mesin penggerak utama (*main engine*) harus diperhatikan secara serius. Untuk mencapai kinerja optimal, sistem penggerak utama kapal perlu didukung oleh teknologi yang efisien, responsif, dan mudah dikendalikan.

Pada kapal *trimaran* dapat menggunakan penggerak berupa mesin diesel ataupun dengan motor listrik, bahkan pada perkembangan teknologi sekarang penggerak kapal *trimaran* dapat menggunakan gabungan antara mesin diesel dan motor listrik. Dalam hal ini motor listrik digunakan sebagai penggerak kapal karena motor listrik lebih mudah dikontrol dengan berbagai sistem kontrol. Selain itu penggunaan motor listrik ini bertujuan untuk mengurangi emisi gas buang.

Motor listrik terdiri dari berbagai macam jenis dimana salah satunya adalah motor listrik jenis DC yaitu motor *Brushless* DC (BLDC) atau motor arus searah tanpa sikat (Saputra & Dpk, 2020). Motor *Brushless* DC (BLDC) adalah motor sinkron dengan magnet permanen pada rotor dan kumparan jangkar pada stator, magnet permanen menciptakan fluks pada rotor dan

mengimbas pada stator sehingga menciptakan kutub elektromagnetik, rotor berputar karena imbas dari fase stator. Motor BLDC memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan motor DC konvensional. Keunggulannya antara lain perawatan menjadi lebih mudah karena motor ini tidak memiliki sikat, umur pemakaian lebih lama, memiliki efisiensi yang tinggi, respon dinamik yang tinggi, dan konsumsi energi yang kecil. Namun, motor BLDC memiliki beberapa kelemahan yaitu membutuhkan sensor posisi rotor dan rangkaian komutasi elektronik yang kompleks. Selain itu, karakteristik torsi dan kecepatan motor BLDC bersifat *non-linear*, sehingga sulit mencapai performa optimal. Dalam hal ini dibutuhkan kontrol *non-linear* untuk memperoleh kecepatan konstan agar motor BLDC dapat bekerja secara optimal. Salah satu metode kontrol *non-linear* adalah logika *fuzzy*.

Logika *fuzzy* ini digunakan karena kemampuannya menangani ketidakpastian dan *non-linearitas* (Widhiada et al., 2020). Sistem ini menghasilkan respons yang halus dan stabil berkat penggunaan fungsi keanggotaan yang kontinu, serta memberikan performa kontrol yang mampu beradaptasi dari berbagai gangguan dan perubahan parameter. Fleksibilitas menjadi nilai tambah karena fungsi keanggotaan dapat dimodifikasi dengan mudah tanpa mengubah struktur kontroler. Melalui penelitian ini diharapkan dapat dikembangkan sebuah kontrol pengendalian kecepatan motor BLDC pada kapal *trimaran* yang efektif sehingga dalam penelitian ini peneliti tertarik untuk mengontrol kecepatan motor BLDC pada kapal *trimaran* dengan menggunakan metode *fuzzy logic*.

B. Rumusan Masalah

Adapun yang perlu dibahas dari latar belakang tersebut, maka peneliti mengambil rumusan masalah diantaranya:

1. Bagaimana perancangan sistem kendali kecepatan motor BLDC menggunakan metode *fuzzy logic* pada kapal *trimaran*?
2. Bagaimana kinerja pengendalian kecepatan motor BLDC menggunakan metode *fuzzy logic* pada kondisi gelombang berbeda?

C. Batasan Masalah

Mengingat luasnya permasalahan, maka dalam pembahasan karya ilmiah ini penulis membatasinya dengan membatasi hal berikut:

1. Penelitian ini merupakan *prototype* pengendalian kecepatan motor listrik pada kapal *trimaran*.
2. Penelitian ini berfokus terhadap pengendalian kecepatan motor BLDC menggunakan metode *fuzzy logic*.
3. Penelitian ini menggunakan *prototype* kapal *trimaran* dengan ukuran panjang 120 cm, lebar 70 cm, dan tinggi 24 cm.
4. Penelitian ini diuji dengan menggunakan kondisi gelombang yang berbeda.
5. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *fuzzy logic*.
6. Penelitian ini menggunakan mikrokontroler STM32 sebagai perangkat pengolah data.
7. Penelitian ini menggunakan ESP32 sebagai mikrokontroler untuk pengelompokan data.

8. Penelitian ini menggunakan sensor *photodiode* sebagai pengukur rpm
9. Penelitian ini menggunakan sensor *voltage divider* sebagai pengukur tegangan.
10. Penelitian ini menggunakan sensor arus ACS758.

D. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian yang ingin dicapai dalam penulisan karya ilmiah terapan ini antara lain :

1. Merancang pengendalian kecepatan motor BLDC pada kapal *trimaran* berbasis *fuzzy logic*.
2. Mengetahui kinerja pengendalian kecepatan motor BLDC menggunakan metode *fuzzy logic* pada kapal *trimaran*.

E. Manfaat Penelitian

Dari penelitian mengenai Pengendalian Kecepatan Motor Listrik Pada Kapal *Trimaran* Berbasis *Fuzzy Logic* diharapkan membawa manfaat sebagai berikut:

1. Untuk mengurangi emisi gas buang pada kapal *trimaran*.
2. Penelitian ini menjadi media untuk meningkatkan pemahaman dan keterampilan dalam merancang serta mengimplementasikan sistem kontrol motor listrik berbasis *fuzzy logic*.
3. Penelitian ini memberikan alternatif sistem pengendalian motor yang efektif dan adaptif untuk meningkatkan performa operasional kapal.
4. Penelitian ini dapat dijadikan referensi dalam pengembangan karya ilmiah

dan penelitian lanjutan di bidang teknologi kelistrikan kapal.

5. Sebagai referensi sistem kecepatan yang bisa digunakan pada penelitian berikutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Review Penelitian Sebelumnya

Melihat penelitian-penelitian sebelumnya sangat penting untuk memahami hasil dan perbedaan yang sudah ada. Dengan begitu, penelitian ini bisa menghindari pengulangan, mengembangkan penelitian sebelumnya, dan menambah wawasan tentang topik yang akan dibahas. Karena itu, penulis membutuhkan informasi dari berbagai penelitian terdahulu. Berikut adalah ringkasan penelitian sebelumnya yang digunakan sebagai referensi dalam penelitian ini.

Tabel 2. 1 *Review Penelitian Sebelumnya*
Sumber: Dokumentasi Pribadi

No	Nama Peneliti	Judul	Hasil Penelitian	Perbedaan
1	Zakiah Amalia, Achsanul Khabib, Erni Yudaningtyas, Talifatim Machfuroh, Fica Aida Nadhifatul Aini, Siti Duratun Nasiqiati Rosady (Amalia et al., 2023).	<i>Field Oriented Control</i> Untuk Pengatur Kecepatan Motor BLDC Pada Sepeda Motor Listrik	Pada penelitian ini di fokuskan untuk mengatur kecepatan motor BLDC dengan sistem kontrol menggunakan metode <i>Field Oriented Control</i> dimana dengan metode tersebut dapat mengontrol torsi dan flux secara terpisah sehingga motor BLDC bekerja secara efisien. dimana algoritma ini dapat mengendalikan motor BLDC dengan mengontrol torsi dan flux secara terpisah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan motor dapat dikontrol dengan akurasi lebih dari 99%	Pada penelitian sebelumnya, pengendalian kecepatan motor BLDC menggunakan metode <i>Field Oriented Control</i> (FOC), Namun, pada penelitian ini, menggunakan metode <i>Fuzzy logic</i> , yang memiliki keunggulan dalam menangani ketidakpastian dan <i>non-linearitas</i> sistem secara lebih baik. Dengan metode <i>fuzzy logic</i> .

No	Nama Peneliti	Judul	Hasil Penelitian	Perbedaan
2	Danu Akbar & Slamet Riyadi (Akbar & Riyadi, 2019).	Pengaturan Kecepatan Pada Motor <i>Brushless</i> DC (BLDC) Menggunakan PWM (<i>Pulse Width Modulation</i>)	Dalam penelitian ini Pengaturan kecepatan motor dengan menggunakan metode PWM. Metode tersebut dapat mengendalikan <i>duty cyle</i> yang akan berdampak terhadap tegangan yang terkena motor, ketika tegangan meningkat arus pada motor BLDC tersebut juga akan meningkat. Arus sebanding dengan torka pada motor sehingga torkanya juga akan meningkat. Metode ini secara efektif mengontrol torka motor melalui pengaturan tegangan.	Pada penelitian sebelumnya, pengaturan kecepatan motor BLDC dilakukan dengan menggunakan metode PWM (<i>Pulse Width Modulation</i>). Namun, pada penelitian sebelumnya tidak diketahui sistem kontrol yang digunakan. Sedangkan dalam penelitian ini sistem kontrol yang digunakan adalah <i>fuzzy logic</i> .
3	Harits P. Nuryadin, Fiqqih Faizah, Wayan Yudhi M. W (Nuryadin et al., 2020).	Pengaturan Kecepatan Motor BLDC dengan metode PID Berbasis Arduino Uno Sebagai Media Pembelajaran Di Politeknik Penerbangan Surabaya	Pada penelitian ini untuk mengatur kecepatan motor BLDC menggunakan metode PID. Metode PID ini bersifat <i>linier</i> . kontrol PID berbasis Arduino Uno membaca sinyal dari sensor <i>Hall-Effect</i> untuk menghitung RPM dan mengatur <i>duty cycle</i> PWM. PID terbukti menghasilkan respon lebih cepat, <i>overshoot</i> lebih kecil, dan menjaga rpm lebih dekat ke nilai <i>setpoint</i> dibanding tanpa kontrol PID (contoh: <i>rise time</i> $\approx$ 10 ms vs 100 ms, <i>overshoot</i> rendah).	Pada penelitian sebelumnya, pengaturan kecepatan motor BLDC dilakukan dengan menggunakan metode PID. Namun metode tersebut bersifat <i>linear</i> . Sedangkan dalam penelitian ini penulis menggunakan metode <i>fuzzy logic</i> yang bersifat <i>non-linear</i> .

B. Landasan Teori

Pada dasarnya yang dimaksud dengan pengendalian kecepatan motor adalah proses mengatur putaran motor agar sesuai dengan kebutuhan atau spesifikasi tertentu dengan cara mengontrol parameter seperti tegangan, arus, rpm atau sinyal pulsa (Amalia et al., 2023). Dalam penelitian-penelitian sebelumnya, pengendalian kecepatan motor *brushless* DC (BLDC) difokuskan untuk meningkatkan efisiensi dan performa motor listrik. Seperti dalam penelitian (Amalia et al., 2023) yang meneliti pengendalian kecepatan motor BLDC menggunakan metode *Field Oriented Control* (FOC), yang dapat mengontrol torsi dan *flux* secara terpisah sehingga menghasilkan efisiensi kerja motor yang optimal. Penelitian lain oleh (Akbar & Riyadi, 2019) menggunakan metode PWM (*Pulse Width Modulation*) untuk mengatur kecepatan motor BLDC melalui pengendalian *duty cycle*. Metode ini efektif dalam mengontrol torsi melalui pengaturan tegangan yang masuk ke motor. Kemudian pada penelitian (Nuryadin et al., 2020) menggunakan metode PID untuk mengatur kecepatan motor BLDC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode PID memiliki respon yang cepat dan *error* yang minimal. Namun, pendekatan ini bersifat *linier*, sehingga kurang optimal untuk sistem yang kompleks.

Pengendalian kecepatan motor BLDC ini akan dikaji lebih lanjut oleh peneliti didukung dengan adanya hasil dari penelitian penelitian sebelumnya, dalam hal ini peneliti akan menggunakan metode *fuzzy logic* dikarenakan memiliki keunggulan dalam menangani ketidakpastian dan *non-linearitas* (Saputra & Dpk, 2020). Sehingga dengan menggunakan metode ini mampu

memperbaiki kekurangan pada penelitian sebelumnya terkait pengendalian kecepatan motor BLDC.

Dalam perancangan sistem ini perlu adanya komponen-komponen pendukung agar sistem ini dapat bekerja dengan baik. Komponen-komponen itu meliputi, STM32 sebagai kontrol utama, sensor ACS758 untuk memonitor arus, *Photodiode speed* untuk mengetahui rpm motor dan *voltage sensor divider* untuk monitoring tegangan motor, serta baterai *lithium polymer* sebagai sumber daya utama. Hasil dari data monitoring sensor akan ditampilkan pada layar LCD. Komponen-komponen ini akan bekerja secara sinergis untuk mengimplementasikan pengendalian kecepatan motor pada kapal *trimaran* berbasis *fuzzy logic*.

1. Motor BLDC

Motor *Brushless* DC (BLDC) adalah motor sinkron dengan magnet permanen pada rotor dan kumparan jangkar pada stator, magnet permanen menciptakan fluks pada rotor dan mengimbas pada stator sehingga menciptakan kutub elektromagnetik, rotor berputar karena imbas dari fase stator (Saputra & Dpk, 2020). Ada dua bagian penting yang dimiliki motor BLDC yaitu rotor dan stator. Rotor adalah bagian yang bergerak tersusun dari magnet permanen sedangkan stator adalah bagian yang diam dan terbuat dari kumparan.

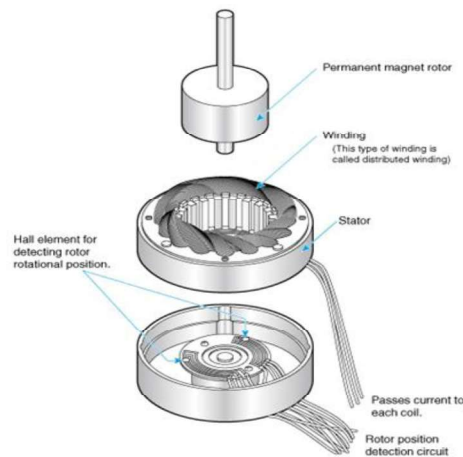
Motor BLDC memiliki beberapa keunggulan jika dibandingkan dengan Motor DC konvensional. Keunggulannya antara lain perawatan menjadi lebih mudah karena motor ini tidak memiliki sikat, umur pemakaian lebih lama dan tidak menimbulkan *electrical noise*. Selain itu

Motor BLDC memiliki efisiensi yang tinggi, respon dinamik yang tinggi, dan konsumsi energi yang kecil.. Adapun spesifikasi motor BLDC dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Spesifikasi Motor BLDC

Sumber: Dokumentasi Pribadi

<i>Voltage</i>	12 V
<i>Power</i>	1300 W
Motor	4050 KV
Ukuran	75x62x62 mm
Berat	162 g



Gambar 2. 1 Motor BLDC

Sumber:

<https://onexpirience.wordpress.com/2016/09/04/blog-post-title-2/>

2. *Electronic Speed Controller (ESC)*

ESC adalah rangkaian elektronik yang berfungsi sebagai pengatur kecepatan putaran motor pada pesawat RC atau helikopter RC, cara kerjanya yaitu dengan cara menterjemahkan sinyal yang diterima receiver dari *transmitter* (Lorenza, 2019).. Di pasaran terdapat berbagai merk ESC dengan kekuatan arus (*current rating*) dan kekuatan voltase (*voltage rating*) serta *feature* yang ditawarkan.

Untuk menentukan ESC yang akan kita gunakan sangatlah penting. untuk mengetahui kekuatan (*peak current*) dari motor. Pilihlah ESC yang kekuatannya melebihi kekuatan motor. Misalnya, dari data kita dapatkan kekuatan motor adalah 12A (sesuai dengan *datasheet* motor) pada saat throttle terbuka penuh. sebaiknya ESC yang akan kita gunakan adalah ESC yang berkekuatan 18A atau 20A. Jika kita paksakan menggunakan ESC 10A kemungkinan pada saat throttle dibuka penuh, ESC akan panas bahkan terbakar. Adapun spesifikasi ESC dapat dilihat pada tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Spesifikasi ESC
Sumber: Dokumentasi Pribadi

Rentang tegangan	4-16 V
Ampere	2A
Ukuran	45x24x11mm
Berat	25g
Motor yang berlaku	2212-14000KV



Gambar 2. 2 ESC

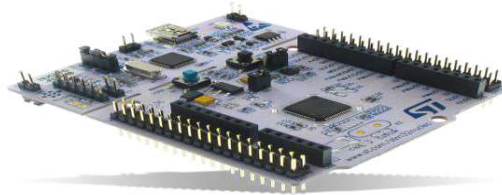
Sumber : <https://www.jouav.com/blog/electronic-speed-controller-esc.html>

3. STM32

STM32 adalah keluarga mikrokontroler 32-bit yang dibuat oleh STMicroelectronics (Eka Maulana & Nurpulaela, 2024). Mikrokontroler ini khusus dirancang untuk aplikasi Cortex-A (aplikasi umum), Cortex-M (embedded), dan Cortex-R (real- time). Keunggulan utama STM32 terletak pada kombinasi antara performa tinggi dan periferal berkualitas

tinggi, menjadikannya lebih unggul dibandingkan Arduino dalam hal kinerja

STM32 dapat diprogram menggunakan berbagai *Integrated Development Environment (IDE)*, termasuk *Keil MDK*, *IAR embedded workbench*, dan *platform IO*. Salah satu fitur menarik adalah kemampuannya untuk diprogram menggunakan arduino IDE, yang membuatnya lebih mudah diakses bagi pengembang yang sudah familiar dengan *platform* arduino. Untuk memprogram board ini dari Arduino IDE, pengguna perlu menggunakan modul *USB to Serial TTL* untuk menghubungkan board ke komputer.



Gambar 2. 3 STM32

Sumber : <https://www.mouser.co.id/new/stmicroelectronics/stm-nucleo-development-boards/>

4. Sensor ACS758

Sensor arus ACS758 adalah modul yang dirancang untuk mengukur arus listrik, baik arus DC maupun arus AC, dengan menggunakan prinsip *efect hall* (Rianto & Kusanti, 2023). Dimana *hallf Effect* merupakan jalur beban yang dialiri melalui konduksi tembaga yang dapat menghasilkan medan magnetik yang kemudian arus listrik tersebut akan dikonversikan dalam bentuk tegangan yang *linier* berdasarkan dari perubahan arus yang terjadngan yang sebanding dengan nilai arus yang terdeteksi.

Dalam konteks pemantauan arus pada motor BLDC, sensor ACS758 berfungsi untuk memantau arus yang mengalir ke motor secara linier. Sensor ini dapat mendeteksi perubahan nilai arus dan menghasilkan keluaran berupa tegangan yang sesuai dengan perubahan tersebut. Nilai tegangan keluaran dari sensor kemudian digunakan sebagai masukan untuk mikrokontroler. Mikrokontroler akan memproses data ini untuk berbagai tujuan, seperti mengontrol kecepatan motor, memonitor kondisi beban, atau melindungi sistem dari kelebihan arus



Gambar 2. 4 Sensor ACS758

Sumber: <https://id.scribd.com/document/376291676/ACS758-Datasheet-pdf>

5. *Voltage Sensor Divider*

Voltage sensor divider merupakan sensor tegangan dengan kemampuan membaca tegangan maksimum hingga 25 Volt (Santoso et al., 2024). Sensor ini memiliki dua pin *input*, yaitu "+" dan "-", yang dihubungkan secara paralel terhadap sumber tegangan yang akan diukur, seperti tegangan yang masuk ke motor BLDC.

Voltage sensor tipe pembagi tegangan (*voltage divider*) ini dirancang untuk mendeteksi tegangan hingga 25 V. Sensor memiliki dua pin input, yaitu '+' dan '-', yang dihubungkan secara paralel ke sumber tegangan seperti motor BLDC agar pembacaan tidak mengganggu jalur

utama arus. Sementara itu, pin keluaran terdiri dari tiga koneksi: '+' untuk suplai +5 V, '-' sebagai ground, dan 'S' sebagai output yang menghasilkan sinyal analog. Nilai tegangan di pin 'S' proporsional terhadap tegangan masukan, dan sensitivitasnya dapat diatur menggunakan variabel resistor untuk disesuaikan dengan kebutuhan pengukuran sistem.



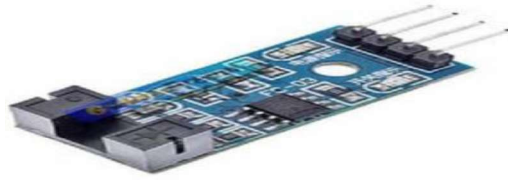
Gambar 2. 5 Voltage Sensor Divider

Sumber: <https://how2electronics.com/interfacing-0-25v-dc-voltage-sensor-with-arduino/>

6. Sensor *Photodiode*

Sensor *Photodiode* adalah sensor yang bekerja dengan mendeteksi pantulan atau terputusnya cahaya inframerah oleh penanda kontras pada poros motor, seperti cakram reflektif atau pola hitam-putih (Nasution, 2020). Sinyal *Photodiode* yang dihasilkan kemudian diubah menjadi pulsa digital yang dihitung oleh mikrokontroler untuk menentukan kecepatan putaran motor dalam satuan RPM. Data ini selanjutnya dapat digunakan untuk ditampilkan pada layar atau diolah dalam sistem kontrol motor.

Sensor ini memungkinkan sistem kontrol mendapatkan umpan balik langsung dari kecepatan motor, sehingga mempermudah pengendalian kecepatan yang presisi dan optimal. Selain itu, integrasi sensor dengan mikrokontroler membuatnya cocok untuk digunakan pada berbagai aplikasi, seperti kendaraan listrik dan sistem otomasi industri.



Gambar 2. 6 Sensor *Photodiode*

Sumber: <https://www.rytechindo.com/index.php/electronic/25-sensor-transducer/175-sensor-kecepatan-speed-groove-coupler-photoelectric-ir-count>

7. Baterai *Lithium Polymer (Li-Po)*

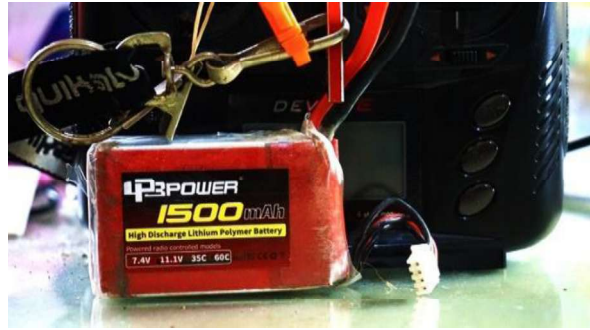
Baterai adalah suatu sel elektrokimia yang mengubah dari energi kimia menjadi energi listrik (Lamablawa & Aritonang, 2022). Baterai *Litium Polymer (Li-Po)* Hampir sama dengan baterai Li- Ion akan tetapi baterai Li-Po tidak menggunakan cairan sebagai elektrolit melainkan menggunakan elektrolit polimer kering yang berbentuk seperti lapisan plastik film tipis. Lapisan film ini disusun berlapis-lapis diantara anoda dan katoda yang mengakibatkan pertukaran ion.

Lapisan tipis pada struktur baterai Li-Po memberikan keuntungan dalam hal fleksibilitas desain, sehingga memungkinkan baterai ini dibuat lebih ringan dan dalam berbagai bentuk sesuai kebutuhan perangkat. Selain itu, baterai Li-Po juga unggul dalam kapasitas penyimpanan energi yang lebih besar serta kemampuan *discharge* yang tinggi, memungkinkan suplai daya yang kuat untuk perangkat dengan kebutuhan arus besar. Adapun spesifikasi dari batrai *Li-Po* dapat dilihat pada tabel 2.5

Tabel 2. 4 Spesifikasi Batrai Li-Po

Sumber: Dokumentasi Pribadi

<i>Capacity</i>	5000mAh
<i>Voltage</i>	3S1P/3 Cell/ 11.1 V
<i>Discharge</i>	25C
<i>Weight</i>	184 gr



Gambar 2. 7 Baterai Li-Po

Sumber: <https://aryadega.com/arti-c-pada-baterai-lipo-20c-45c-50c-65c/>

8. ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler berbiaya rendah dan hemat daya yang dikembangkan oleh *Espressif*, yang sudah dilengkapi dengan kemampuan *Wi-Fi* dan *Bluetooth* serta memiliki *prosesor dual-core* (Ezenwobodo & Samuel, 2022). Mikrokontroler ini dirancang untuk digunakan dalam perangkat *mobile*, *wearable electronics*, dan aplikasi *Internet of Things (IoT)*.

ESP32 adalah sebuah mikrokontroler mandiri yang lengkap dan tersedia dalam berbagai varian modul dengan biaya yang relatif ekonomis. Perangkat ini ditenagai oleh prosesor berkecepatan sekitar 240 MHz serta dilengkapi dengan memori utama sebesar 512 KiB. Selain itu, ESP32 juga memiliki *coprocessor Ultra Low Power* dengan memori 8 KiB, yang memungkinkan perangkat tetap berfungsi dalam mode konsumsi daya rendah



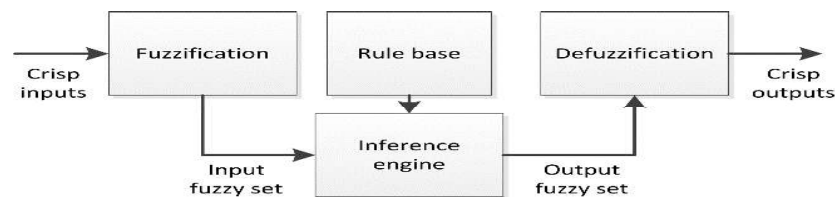
Gambar 2. 8 ESP32

Sumber: <https://raharja.ac.id/2021/11/16/mikrokontroler-esp32-3/>

9. *Fuzzy Logic*

Kontroler *fuzzy logic* termasuk dalam kategori kontrol cerdas (*intelligent control*). Sistem ini mampu mengatasi permasalahan pada perilaku sistem yang kompleks, yang tidak dapat diselesaikan oleh kontroler konvensional (Sutawinaya et al., 2024). Pendekatan ini memungkinkan pengambilan keputusan berbasis aturan linguistik (*if-then*) yang lebih intuitif dan mirip dengan cara manusia berpikir.

Fuzzy logic bekerja dengan memanfaatkan fungsi keanggotaan untuk mengkonversi input yang bersifat samar atau tidak pasti menjadi nilai numerik yang dapat dianalisis. Hal ini menjadikannya sangat sesuai untuk digunakan pada sistem yang sulit dijelaskan secara matematis. Metode ini merupakan pendekatan kontrol berbasis logika yang efektif dalam mengelola sistem *non-linear* serta menangani ketidakpastian parameter. Kelebihan utama dari *fuzzy logic* terletak pada fleksibilitasnya, karena mampu mengendalikan sistem tanpa memerlukan model matematis yang rumit.



Gambar 2. 9 Blok Diagram *Fuzzy Logic*

Sumber: https://www.researchgate.net/figure/Fuzzy-Logic-Controller-Block-Diagram_fig3_278961834

10. Kapal Trimaran

Kapal *trimaran* merupakan kapal *multihull*, terdiri dari satu *main hull* dan dua *sidehull* yang ukurannya cenderung lebih pendek dan terletak

di kedua sisi *main hull* (Tupan & Luhulima, 2021). Bentuk lambung kapal trimaran merupakan pengembangan dari bentuk lambung tunggal yang bertujuan untuk meningkatkan kecepatan kapal yang diikuti dengan pengurangan tenaga yang dibutuhkan. Desain *trimaran* memiliki peran penting dalam mengurangi WSA (*Wet Surface Area*), sehingga hambatan yang dialami kapal menjadi lebih kecil. Hal ini memungkinkan kapal untuk mencapai kecepatan tinggi dan mengurangi konsumsi bahan bakar.

Salah satu keunggulan utama kapal trimaran terletak pada stabilitas serta kemampuannya untuk mencapai kecepatan pelayaran yang tinggi. Desain lambung yang khas memungkinkan kapal ini mengalami hambatan minimum saat bergerak di air, sehingga performa meningkat dan konsumsi energi dapat ditekan. Secara keseluruhan, trimaran menjadi bentuk inovatif dalam dunia desain kapal yang memberikan keuntungan signifikan dalam hal kestabilan dan efisiensi operasional.



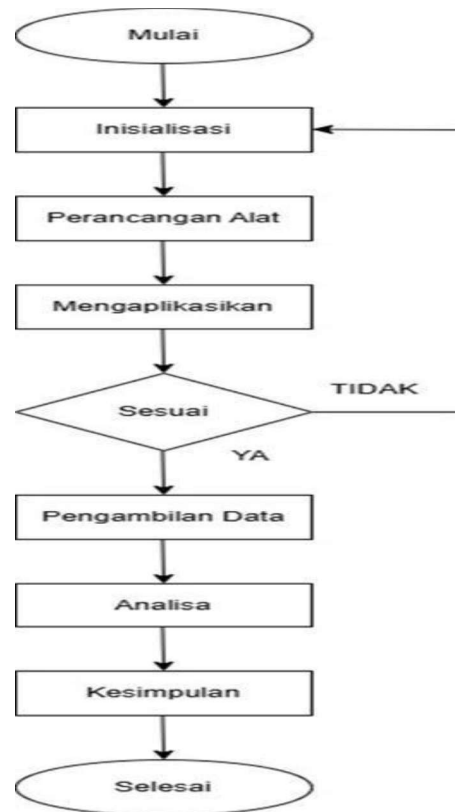
Gambar 2. 10 Kapal Timaran

Sumber: <https://www.suara.com/tag/kapal-trimaran>

C. Kerangka Berfikir

Kerangka berfikir disusun untuk menganalisa permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian dan dapat mempermudah dalam pemaparan secara

lebih merinci. Oleh karena itu, diperlukan konsep algoritma rancang bangun penelitian ini. Peneliti akan menyajikan algoritma penelitian dalam bentuk gambar berupa kerangka berfikir.



Gambar 2. 11 Kerangka Berfikir

Sumber: Dokumentasi Penelitian

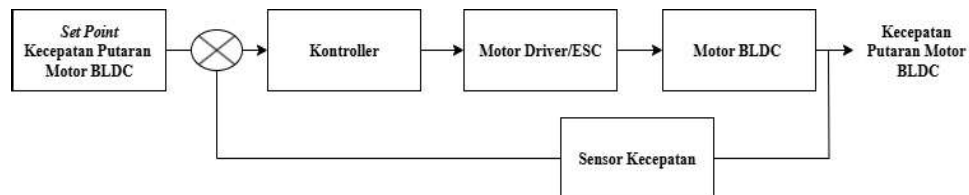
BAB III

METODE PENELITIAN

Bab ini berisi tentang metode dan alur penelitian. Alur penelitian yang akan dijelaskan pada bab ini disertai dengan perancangan sistem, perancangan alat, serta rencana pengujian yang dijelaskan secara rinci, sistematis, dan urut sesuai dengan langkah-langkah yang telah ditentukan dalam bentuk narasi. Dalam penyusunan karya ilmiah terapan ini, peneliti menggunakan metode eksperimen. (Wandini et al., 2022). Metode ini bertujuan untuk mengeksplorasi hubungan sebab-akibat antara variabel dengan mengontrol faktor-faktor lain yang mungkin mempengaruhi hasil.

A. Perancangan Sistem

Kerangka perancangan sistem dapat dilihat pada gambar 3.1



Gambar 3. 1 Blok Diagram Perancangan Sistem

Sumber: Dokumentasi Pribadi

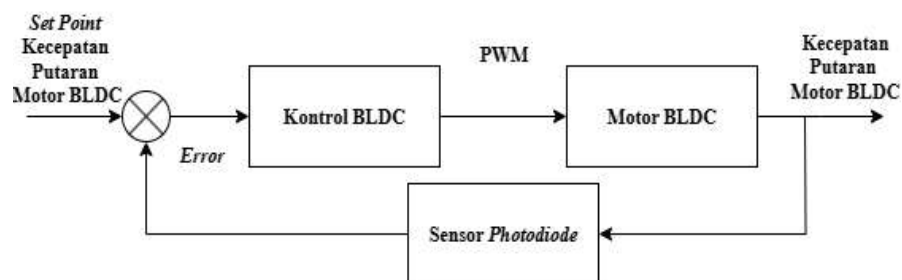
Blok diagram tersebut menggambarkan sistem kontrol motor BLDC berbasis kontrol *fuzzy logic* yang dirancang untuk mengatur kecepatan kapal (Ginola et al., 2020). Perancangan sistem dimulai dari *Set point* kecepatan motor BLDC. Kemudian kontrol *fuzzy logic* memproses data. Hasil kontrol *fuzzy logic* diteruskan ke ESC (*Electronic Speed Controller*) yang bertugas mengatur tegangan dan arus yang disuplai motor BLDC sehingga motor BLDC

berjalan sesuai kebutuhan. Sensor kecepatan berfungsi sebagai umpan balik (*feedback*) untuk membaca kecepatan aktual motor, sehingga sistem dapat terus melakukan penyesuaian dan menjaga kecepatan motor tetap stabil. Dengan sistem kontrol ini, kapal dapat beroperasi secara efektif dan responsif terhadap perubahan kondisi

B. Perancangan Alat

Pada tahap perancangan alat terdiri dari beberapa tahapan yaitu diagram blok perancangan alat, *flowchart* perancangan alat, diagram blok alat dan skema rangkaian elektronika sistem atau *wiring diagram*. Perancangan alat merupakan tahap di mana kita membuat atau merancang perangkat dengan memulai dari identifikasi alat yang diperlukan agar hasil akhirnya sesuai dengan harapan. Proses ini memerlukan ketelitian, ketekunan, dan ketepatan, karena rancangan awal sangat memengaruhi hasil akhir dalam pembuatan alat. Berikut adalah skema perancangan alat untuk motor BLDC yang menggunakan kontrol *fuzzy logic*. Setiap komponen dalam skema ini memiliki peran penting dalam memastikan motor BLDC dengan kontrol *fuzzy logic* dapat beroperasi secara efektif. Diagram perancangan alat dapat dilihat pada gambar 3.2.

1. Blok Diagram Perancangan Alat

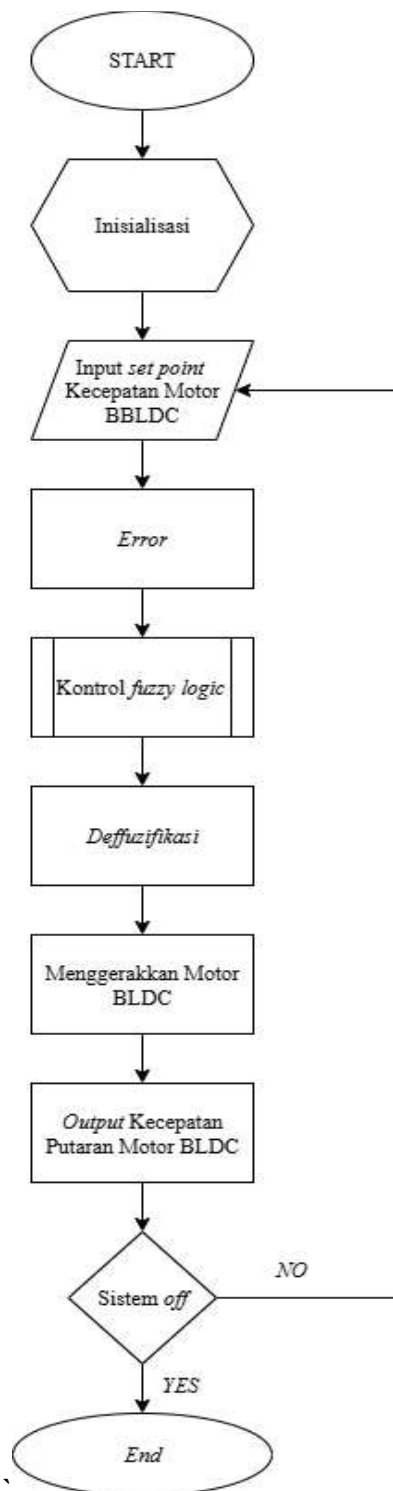


Gambar 3. 2 Blok Diagram Perancangan Alat
Sumber: Dokumentasi Pribadi

Diagram blok ini menggambarkan alur kerja sistem kontrol kecepatan motor BLDC (*Brushless DC Motor*) dengan bantuan sensor *photodiode* sebagai alat umpan balik (*feedback*).

- a. *Set point* kecepatan berfungsi sebagai tahap awal yang digunakan sebagai input berupa *set point* kecepatan yang diinginkan oleh pengguna atau sistem. Nilai ini menjadi acuan kecepatan putaran yang harus dicapai oleh motor BLDC.
- b. Kontrol BLDC berfungsi sebagai otak pengendali sistem. Ia membandingkan antara nilai *set point* dengan nilai kecepatan aktual dari sensor *photodiode*. Hasil dari proses ini berupa nilai *error* (selisih kecepatan) yang akan diolah menggunakan metode kontrol *fuzzy logic*.
- c. Motor BLDC berfungsi sebagai penerima sinyal kontrol berupa PWM dari kontroler untuk menghasilkan kecepatan putaran sesuai dengan nilai yang diinginkan.
- d. Sensor *photodiode* berfungsi untuk mengukur kecepatan putaran aktual motor BLDC. *Photodiode* mendeteksi jumlah pulsa cahaya yang dipantulkan oleh objek pada poros motor dan mengubahnya menjadi sinyal digital. Sinyal ini diolah untuk mendapatkan nilai RPM. Nilai kecepatan aktual ini kemudian dikembalikan ke kontroler sebagai *feedback*, sehingga sistem dapat melakukan penyesuaian secara terus-menerus untuk mencapai kecepatan target.
- e. Baterai *lithium polymer (Li-Po)* digunakan sebagai sumber utama motor BLDC.

2. Flowchart



Gambar 3. 3 Flowchart

Sumber: Dokumentasi Pribadi

a. Perancangan Sistem Kendali *Fuzzy Logic*

Sistem kendali kecepatan motor BLDC pada kapal *trimaran* ini menggunakan metode *fuzzy logic* untuk mengatur dua motor BLDC. *Fuzzy logic* dipilih karena kemampuannya dalam menangani sistem non-linier dan perubahan dinamis, yang sulit dikendalikan dengan metode konvensional.

1) *Input Sistem*

Sistem *fuzzy* memiliki satu variabel *input* utama yaitu, *error* RPM (selisih antara *set point* RPM dengan RPM aktual dari motor BLDC). *Input* ini dikalkulasi secara *real time* berdasarkan pembacaan sensor *Photodiode*. Rentang *error* yang digunakan adalah antara -5.000 hingga +5.000 RPM.

2) *Fuzzyfikasi – Fungsi Kenaggotaan*

Input error RPM dikonversi ke dalam lima kategori *linguistik*, yaitu:

Tabel 3. 1 Tabel Fuzzyfikasi
Sumber: Dokumen Pribadi

Nama	Simbol	Rentang (RPM)	Tipe Kurva	Parameter
<i>Negative Large</i>	NL	≤ -2.000	Trapesium	$(-\infty, -\infty, -5.000, -2.000)$
<i>Negative Small</i>	NS	-5.000 s.d 0	Segitiga	$(-5.000, -2.000, 0)$
<i>Zero</i>	ZE	-2.000 s.d +2.000	Segitiga	$(-2.000, 0, +2.000)$
<i>Positive Small</i>	PS	0 s.d +5.000	Segitiga	$(0, +2.000, +5.000)$
<i>Positive Large</i>	PL	$\geq +2.000$	Trapesium	$(+2.000, +5.000, +\infty, +\infty)$

3) *Basis Aturan (rule base)*

Sistem fuzzy menggunakan 5 aturan utama berbasis logika *IF-THEN* seperti pada tabel berikut:

Tabel 3. 2 Tabel *Rule Base*
Sumber: Dokumen Pribadi

Kondisi (<i>Error RPM</i>)	Aksi Motor 1	Aksi Motor 2	Nilai <i>Output</i>
NL	<i>Decrease Large (-1.0)</i>	<i>Decrease Large (-1.0)</i>	Turunkan cepat
NS	<i>Decrease Small (-0.5)</i>	<i>Decrease Small (-0.5)</i>	Turunkan perlahan
ZE	<i>No Change (0.0)</i>	<i>No Change (0.0)</i>	Stabil
PS	<i>Increase Small (+0.5)</i>	<i>Increase Medium (+0.7)</i>	Naikkan ringan
PL	<i>Increase Large (+1.0)</i>	<i>Increase XLarge (+1.5)</i>	Naikkan cepat

Output dari masing-masing aturan berbentuk nilai pengali PWM yang digunakan untuk mengatur ESC motor BLDC.

4) *Defuzzifikasi*

Untuk mengubah hasil *inferensi fuzzy* menjadi *output* nyata (*crisp value*), sistem menggunakan metode *Weighted Average* (Sugeno). Rumus *defuzzifikasi*:

$$\text{Output} = \frac{\sum(\mu_i \times z_i)}{\sum \mu_i} \quad (3.1)$$

Keterangan:

μ_i adalah derajat keanggotaan urutan ke- i

z_i adalah nilai *output* dari aturan ke- i

Nilai *output* ini kemudian diteruskan sebagai sinyal PWM ke ESC, yang akan mengatur tegangan ke motor BLDC sesuai perubahan *set point* yang diinginkan.

b. Implementasi Pada Sistem

Seluruh logika *fuzzy* diimplementasikan pada mikrokontroler STM32, yang berperan sebagai unit pengendali utama. Sensor *Photodiode* digunakan untuk membaca RPM aktual, dan ESP32 digunakan sebagai komunikasi data sensor. Nilai *output* dari sistem *fuzzy* dikirim ke dua ESC untuk mengontrol dua motor BLDC secara paralel.

Pada gambar 3.3 *flowchart* yang ditampilkan menggambarkan alur kerja sistem pengendalian kecepatan motor BLDC berbasis *fuzzy logic* dalam bentuk naratif berkesinambungan. Proses dimulai dari tahap awal ketika sistem dinyalakan (*start*). Setelah sistem aktif, langkah pertama yang dilakukan adalah inisialisasi, di mana seluruh komponen sistem seperti mikrokontroler STM32, sensor, serta koneksi ke ESC (*Electronic Speed Controller*) disiapkan untuk bekerja. Inisialisasi ini mencakup konfigurasi komunikasi, pembacaan awal sensor, serta pengaturan dasar sistem kontrol.

Setelah proses inisialisasi selesai, sistem akan menerima *input* berupa nilai *set point* kecepatan motor BLDC. Nilai ini merupakan kecepatan putaran yang ditargetkan oleh sistem, misalnya dalam satuan RPM (putaran per menit). Input ini menjadi referensi utama yang akan dijadikan acuan dalam proses kontrol motor.

Selanjutnya, sistem menghitung nilai *error*, yaitu selisih antara nilai *set point* dengan kecepatan aktual motor yang diperoleh dari pembacaan sensor *photodiode*. Nilai *error* ini mencerminkan seberapa besar deviasi antara kondisi yang diinginkan dengan kondisi nyata di lapangan.

Nilai *error* yang diperoleh kemudian diproses dalam blok kontrol *fuzzy logic*. Pada tahap ini, sistem *fuzzy logic* akan melakukan proses *fuzzifikasi* untuk mengubah nilai numerik *error* menjadi nilai *linguistik* seperti negatif besar, negatif kecil, nol, positif kecil, atau positif besar. Nilai ini kemudian diproses berdasarkan sekumpulan aturan *IF-THEN* (*rule base*) yang telah dirancang sebelumnya. Proses *inferensi fuzzy* ini menghasilkan suatu keputusan dalam bentuk nilai *fuzzy* yang belum bisa langsung digunakan untuk mengontrol motor.

Agar dapat diterapkan dalam sistem fisik, hasil *inferensi fuzzy* ini perlu melalui proses *defuzzifikasi*. Proses ini mengubah hasil logika *fuzzy* ke dalam bentuk nilai konkret atau *crisp value* menggunakan metode *weighted average*. Nilai ini kemudian digunakan untuk mengatur besarnya sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) yang akan dikirim ke ESC.

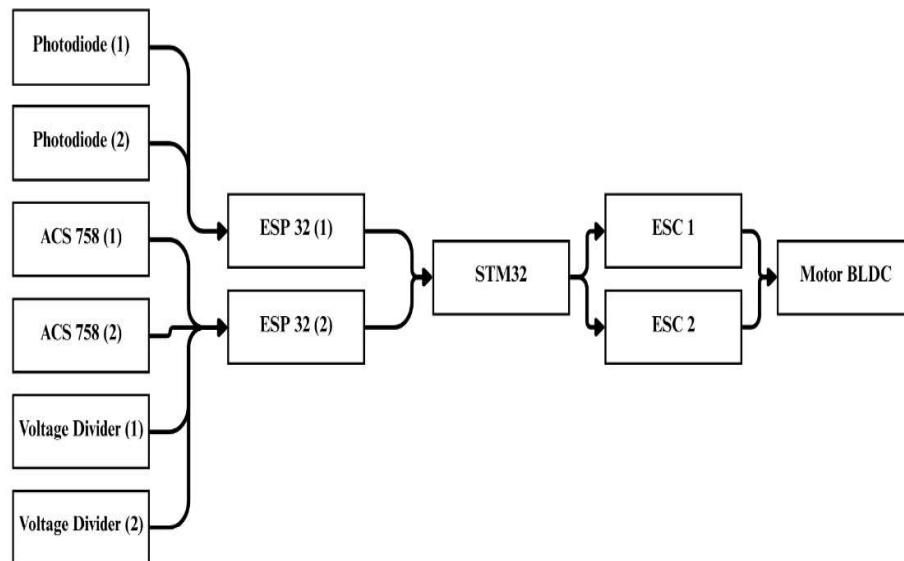
Setelah nilai PWM ditentukan, sinyal tersebut dikirim ke ESC yang bertugas mengatur arus dan tegangan yang masuk ke motor BLDC. Dengan demikian, motor BLDC akan berputar dengan kecepatan yang disesuaikan berdasarkan hasil kontrol *fuzzy logic*.

Selanjutnya, sistem akan membaca kembali kecepatan putaran motor melalui sensor *photodiode* dan menampilkannya sebagai *output* kecepatan aktual. Nilai ini sekaligus menjadi umpan balik (*feedback*) untuk proses kontrol selanjutnya.

Sebelum sistem mengulang proses kontrol dari awal, sistem terlebih dahulu memeriksa apakah telah ada perintah untuk mematikan sistem.

Jika kondisi sistem masih aktif, maka proses akan kembali ke tahap *input set point* dan berulang terus-menerus secara *real-time* untuk menjaga kestabilan kecepatan motor. Namun jika sistem mendeteksi perintah untuk berhenti, maka sistem akan masuk ke tahap akhir (*end*) dan seluruh proses dihentikan.

3. Blok Diagram Alat



Gambar 3. 4 Blok Diagram Alat

Sumber: Dokumentasi Pribadi

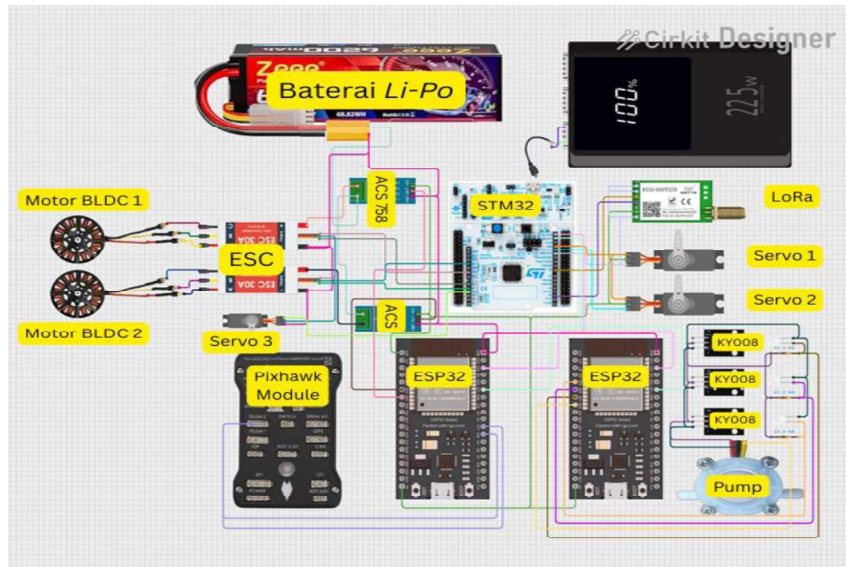
Berikut ini adalah penjelasan mengenai cara kerja setiap komponen dalam mendukung fungsi dari sistem pengendalian kecepatan motor BLDC berbasis *fuzzy logic*:

- a) Sensor *Photodiode* berperan sebagai perangkat pengukur kecepatan rotasi motor BLDC, dinyatakan dalam satuan RPM.
- b) Sensor arus ACS758 berfungsi sebagai perangkat yang digunakan untuk memantau besar atau kecilnya arus listrik yang mengalir ke motor BLDC.

- c) *Voltage sensor divider* digunakan untuk mendeteksi nilai tegangan yang mengalir pada motor BLDC.
- d) ESP32 Berfungsi sebagai jembatan komunikasi antara sensor-sensor dan STM32. ESP32 mengelompokkan data yang diperoleh dari sensor-sensor dan mengirimkannya ke STM32, sehingga proses pengendalian menjadi lebih efektif dan terintegrasi
- e) STM32 digunakan sebagai pusat kendali utama dalam sistem pengaturan kecepatan motor BLDC.
- f) *Electronic Speed Control* (ESC) digunakan untuk mengatur besar arus atau tegangan yang masuk ke motor BLDC.
- g) Motor BLDC digunakan digunakan sebagai aktuator utama yang menggerakkan beban, dalam hal ini adalah untuk menggerakkan kapal *trimaran*.

4. Wiring Diagram

Pada perancangan alat, ada rancangan sistem perangkat keras yang akan ditampilkan menggunakan *wiring diagram*. Hal ini sangat diperlukan sebelum memulai proses pembuatan alat, karena perancangan yang baik akan memudahkan proses pembuatan alat. Sehingga proses pembuatan alat tersebut dapat lebih efisien dan tertata. Selain itu *wiring diagram* akan mempermudah peneliti karena peneliti sudah memiliki gambaran yang jelas mengenai posisi dan koneksi setiap komponen. *wiring diagram* dapat dilihat pada gambar 3.5 dan tabel 3.3.



Gambar 3. 5 Wiring Diagram

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Tabel 3. 3 Koneksi Komponen

Sumber: Dokumentasi Pribadi

No	Komponen	Pin Label	Koneksi dengan Komponen Lain
1	ESC 1	Battery VCC	VCC (5V)
2	ESC 1	Battery GND	GND (semua komponen GND)
3	ESC 1	GND out	GND (semua komponen GND)
4	ESC 1	M1	Phase 1 pada BLDC Motor 1
5	ESC 1	M2	Phase 2 pada BLDC Motor 1
6	ESC 1	M3	Phase 3 pada BLDC Motor 1
7	ESC 1	Signal	A1 pada NUCLEO-G0 B1 RE
8	ESC 2	Battery VCC	VCC (5V)
9	ESC 2	Battery GND	GND (semua komponen GND)
10	ESC 2	GND out	GND (semua komponen GND)
11	ESC 2	M1	Phase 1 pada BLDC Motor 2
12	ESC 2	M2	Phase 2 pada BLDC Motor 2
13	ESC 2	M3	Phase 3 pada BLDC Motor 2
14	ESC 2	Signal	A0 pada NUCLEO-G0 B1 RE
15	BLDC Motor 1	Phase 1	M1 pada ESC 1
16	BLDC Motor 1	Phase 2	M2 pada ESC 1

No	Komponen	Pin Label	Koneksi dengan Komponen Lain
17	BLDC Motor 1	<i>Phase 3</i>	M3 pada ESC 1
18	BLDC Motor 2	<i>Phase 1</i>	M1 pada ESC 2
19	BLDC Motor 2	<i>Phase 2</i>	M2 pada ESC 2
20	BLDC Motor 2	<i>Phase 3</i>	M3 pada ESC 2
21	ACS758 Current Sensor 1	VCC	VCC (5V)
22	ACS758 Current Sensor 1	VCC	VCC (5V)
23	ACS758 Current Sensor 1	GND	GND (semua komponen GND)
24	ACS758 Current Sensor 1	<i>OUT</i>	G35 pada ESP32 1
25	ACS758 Current Sensor 2	VCC	VCC (5V)
26	ACS758 Current Sensor 2	VCC	VCC (5V)
27	ACS758 Current Sensor 2	GND	GND (semua komponen GND)
28	ACS758 Current Sensor 2	<i>OUT</i>	G34 pada ESP32 1
29	EBYTE LoRa E220	GND	GND (semua komponen GND)
30	EBYTE LoRa E220	VCC	VCC (5V)
31	EBYTE LoRa E220	RXD	D8 pada NUCLEO-G0 B1 RE
32	EBYTE LoRa E220	TXD	D2 pada NUCLEO-G0 B1 RE
33	Lipo 6200mAh	+	VCC (5V)
34	Lipo 6200mAh	-	GND (semua komponen GND)
35	NUCLEO-G0 B1 RE	A0	<i>Signal</i> pada ESC 2
36	NUCLEO-G0 B1 RE	A1	<i>Signal</i> pada ESC 1
37	NUCLEO-G0 B1 RE	A2	PWM pada Servo 3 (<i>Throttle</i>)
38	NUCLEO-G0 B1 RE	Pin 12	PWM pada Servo 2 (<i>Rudder</i>)

No	Komponen	Pin Label	Koneksi dengan Komponen Lain
39	NUCLEO-G0 B1 RE	Pin 13	PWM pada Servo 1 (<i>Rudder</i>)
40	NUCLEO-G0 B1 RE	5V	VCC (5V)
41	NUCLEO-G0 B1 RE	GND	GND (semua komponen GND)
42	NUCLEO-G0 B1 RE	D2	TXD pada EBYTE LoRa E220
43	NUCLEO-G0 B1 RE	D8	RXD pada EBYTE LoRa E220
44	NUCLEO-G0 B1 RE	SCL/D15	G22 pada ESP32 1
45	NUCLEO-G0 B1 RE	SDA/D14	G21 pada ESP32 1
46	ESP32 1	GND	GND (semua komponen GND)
47	ESP32 1	V5	VCC (5V)
48	ESP32 1	G35	OUT pada ACS758 <i>Current Sensor 1</i>
49	ESP32 1	G34	OUT pada ACS758 <i>Current Sensor 2</i>
50	ESP32 1	G22	SCL pada NUCLEO-G0 B1 RE
51	ESP32 1	G21	SDA pada NUCLEO-G0 B1 RE
52	ESP32 1	G35	C pada <i>Photodiode 1</i>
53	ESP32 1	G33	C pada <i>Photodiode 2</i>
54	ESP32 2	GND	GND (semua komponen GND)
55	ESP32 2	V5	VCC (5V)
56	KY-008 <i>Laser Emitter 1</i>	SIG	GND (semua komponen GND)
57	KY-008 <i>Laser Emitter 1</i>	5V	VCC (5V)
58	KY-008 <i>Laser Emitter 1</i>	GND	GND (semua komponen GND)
59	KY-008 <i>Laser Emitter 2</i>	SIG	GND (semua komponen GND)
60	KY-008 <i>Laser Emitter 2</i>	5V	VCC (5V)
61	KY-008 <i>Laser Emitter 2</i>	GND	GND (semua komponen GND)
62	<i>Photodiode 1</i>	E	GND (semua komponen GND)
63	<i>Photodiode 1</i>	C	G35 pada ESP32 1
64	<i>Photodiode 2</i>	E	GND (semua komponen GND)
65	<i>Photodiode 2</i>	C	G33 pada ESP32 1

Dalam hal ini STM32 adalah sebagai *hardware* kontrol. Dimana sensor *Photodiode*, sensor ACS758 dan *voltage sensor divider* akan mengirimkan sinyal ke ESP32 lalu diteruskan ke main kontrol. LCD sebagai penampil data dari hasil monitoring. Komponen ESC bertugas sebagai pengatur performa motor yang terhubung ke STM32 dan motor BLDC. Motor BLDC ini digerakkan dengan sumber utama baterai *Li-Po*.

C. Rencana Pengujian

Rencana pengujian adalah proses yang dirancang untuk mengevaluasi alat yang telah dibuat, guna memahami cara kerjanya dan mengidentifikasi potensi masalah yang mungkin muncul. Pengujian alat ini akan dilakukan menggunakan dua metode utama, yaitu pengujian statis dan pengujian dinamis.

1. Rancangan Pengujian Statis

a. Motor BLDC

Pengujian motor BLDC dilakukan untuk memastikan bahwa motor dapat menyala dan merespons sinyal PWM yang dikirimkan dari mikrokontroler melalui ESC. Pengujian dilakukan dalam dua kondisi, yaitu saat ESC tidak menerima sinyal PWM (motor dalam kondisi *off*), dan saat ESC menerima sinyal PWM (motor dalam kondisi *on*). Selama pengujian, tegangan output ESC diukur menggunakan AVOMeter untuk mengamati perubahan tegangan yang menunjukkan adanya aliran arus ketika motor aktif. Indikator keberhasilan dari pengujian ini adalah motor BLDC dalam keadaan mati saat tidak menerima PWM dan motor berputar saat sinyal PWM

diberikan, disertai dengan penurunan tegangan sebagai tanda beban bekerja.

b. ESC

Pengujian ESC bertujuan untuk mengevaluasi keandalan dan linieritas kinerjanya dalam merespons sinyal PWM dari mikrokontroler ESP32. Nilai PWM divariasikan dan pengaruhnya terhadap kecepatan putaran motor (RPM) serta tegangan *output* dicatat secara sistematis. Pembacaan RPM dilakukan menggunakan *tachometer* digital dan sensor photodiode, sementara pengukuran tegangan dilakukan menggunakan AVOMeter serta sensor *voltage divider*. Keberhasilan pengujian ditentukan oleh hubungan linier antara nilai PWM dan RPM serta kestabilan tegangan *output* ESC.

c. STM32

Pengujian STM32 dilakukan untuk menguji fungsi dasar *output* digital sebagai bagian dari sistem pengendali utama. Pengujian dilakukan secara statis dengan menjalankan program sederhana untuk menyalakan dan mematikan LED. Keberhasilan pengujian ditunjukkan oleh respon LED yang menyala dan mati sesuai perintah dalam program, yang menandakan bahwa STM32 berhasil menjalankan kode dari IDE dan siap digunakan dalam pengendalian motor dan sensor dalam sistem yang lebih kompleks.

d. ESP32

Pengujian ESP32 dilakukan untuk memastikan bahwa mikrokontroler berfungsi baik dalam menghasilkan *output* digital

sebelum diintegrasikan dalam sistem dinamis. Pengujian dilakukan dengan menyusun rangkaian LED sederhana menggunakan *breadboard*, di mana satu LED dihubungkan ke pin *output* digital ESP32 melalui resistor 1,1 k Ω . Program sederhana ditulis dalam Arduino IDE untuk mengatur LED menyala dan mati secara berkala. Keberhasilan pengujian ditandai dengan LED yang merespons instruksi secara tepat dan bergantian, menandakan ESP32 siap menjalankan fungsi-fungsi kontrol PWM dan pembacaan sensor dalam sistem.

e. Sensor *Photodiode*

Pengujian sensor *photodiode* dilakukan untuk menilai akurasi pembacaan RPM motor sebagai pengganti alat ukur konvensional. Sensor *photodiode* dihubungkan ke STM32 untuk membaca pantulan dari permukaan reflektif yang berputar, lalu membandingkan hasilnya dengan pembacaan tachometer digital. Pengujian dilakukan pada rentang RPM dari 5.000 hingga 40.000. Nilai RPM hasil sensor dicatat melalui serial monitor dan dibandingkan dengan nilai tachometer menggunakan perhitungan *error*. Keberhasilan pengujian ditunjukkan oleh nilai *error* maksimum tidak lebih dari 5%, menandakan bahwa sensor dapat digunakan dalam sistem monitoring kecepatan.

f. Sensor ACS758

Pengujian sensor arus ACS758 dilakukan untuk mengevaluasi akurasi pembacaan arus listrik oleh sensor dibandingkan dengan AVOMeter sebagai alat ukur referensi. Pengujian dilakukan dalam

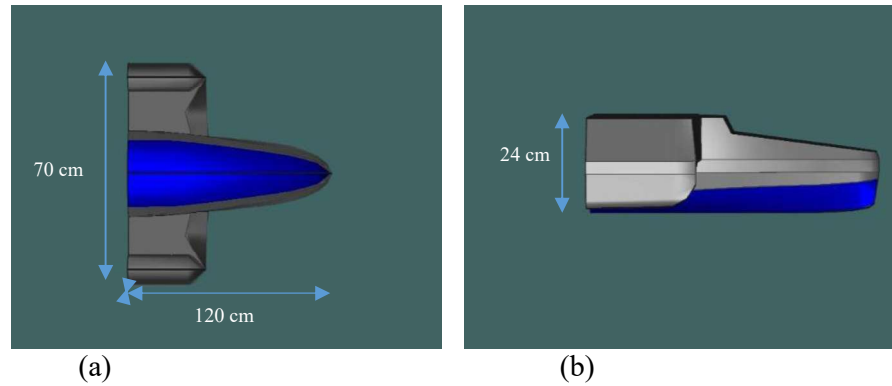
dua kondisi beban yaitu menggunakan satu resistor $5,6 \Omega$ dan dua resistor $5,6 \Omega$ yang dirangkai seri. Sensor dihubungkan secara seri bersama beban dan AVOMeter agar arus yang sama dapat terbaca. Pembacaan hasil ditampilkan melalui serial monitor ESP32. Selisih arus dan *error* dihitung pada setiap skenario.

g. Sensor *Voltage Divider*

Pengujian sensor *voltage divider* dilakukan untuk memverifikasi akurasi pengukuran tegangan oleh sensor terhadap nilai acuan dari AVOMeter. Rangkaian *voltage divider* dihubungkan ke mikrokontroler dan serial monitor sebagai *output* pembacaan, dengan sumber tegangan DC 12V. Hasil pembacaan dari sensor dibandingkan dengan pembacaan AVOMeter, dan persentase *error* dihitung untuk menilai keakuratannya. Hal ini menunjukkan bahwa sensor *voltage divider* cukup andal digunakan dalam sistem pemantauan tegangan secara *real-time* pada sistem kelistrikan kapal.

2. Rancangan Pengujian Dinamis

Setelah dilakukan pengujian statis perkomponen maka dilakukan pengujian dinamis. Pengujian dinamis pada sistem pengendalian kecepatan motor BLDC pada *prototype* kapal *trimaran* berbasis *fuzzy logic* bertujuan mengidentifikasi performa sistem secara menyeluruh. Pengujian dinamis ini dilakukan dengan cara mengintegrasikan semua sensor, kontrol dan aktuator pada *prototype* kapal *trimaran* pada gambar 3.5.



Gambar 3. 6 *Prototype Kapal Trimaran*

(a) Tampak Bawah (b) Tampak Samping

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Pengujian dilakukan di kolam air dengan gelombang buatan yang bervariasi untuk mensimulasikan kondisi perairan yang berbeda. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengevaluasi performa kecepatan putaran motor BLDC pada *prototype* kapal *trimaran* dengan membandingkan sistem kontrol berbasis *fuzzy logic* dan sistem manual tanpa kontrol *fuzzy logic*. Perbandingan ini dilakukan untuk menilai efektivitas kontrol *fuzzy logic* dalam menghadapi berbagai kondisi gelombang.