

LAPORAN TUGAS AKHIR
KARYA ILMIAH TERAPAN

**RANCANG BANGUN SISTEM PROTEKSI OTOMATIS PADA
GENERATOR TURBIN GAS DARI ARUS BERLEBIH DAN
DROP TEGANGAN GUNA MENINGKATKAN KEANDALAN
OPERASIONAL**



I MADE DODY PERMANA
NIT. 09 21 009 1 03

disusun sebagai salah satu syarat untuk
menyelesaikan Program Pendidikan Sarjana Terapan

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

LAPORAN TUGAS AKHIR
KARYA ILMIAH TERAPAN

**RANCANG BANGUN SISTEM PROTEKSI OTOMATIS PADA
GENERATOR TURBIN GAS DARI ARUS BERLEBIH DAN
DROP TEGANGAN GUNA MENINGKATKAN KEANDALAN
OPERASIONAL**



I MADE DODY PERMANA
NIT. 09 21 009 1 03

disusun sebagai salah satu syarat untuk
menyelesaikan Program Pendidikan Sarjana Terapan

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

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : I Made Dody Permana

Nomor Induk Taruna : 09 21 009 1 03

Program Studi : SARJANA TERAPAN TEKNOLOGI REKAYASA
KELISTRIKAN KAPAL

Menyatakan bahwa KIT yang saya tulis dengan judul:

**“RANCANG BANGUN SISTEM PROTEKSI OTOMATIS PADA
GENERATOR TURBIN GAS DARI ARUS BERLEBIH DAN *DROP*
TEGANGAN GUNA MENINGKATKAN KEANDALAN OPERASIONAL”**

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, 28 Juli 2025



I MADE DODY PERMANA

**PERSETUJUAN UJI KELAYAKAN
PROPOSAL TUGAS AKHIR**

Judul : RANCANG BANGUN SISTEM PROTEKSI OTOMATIS
PADA GENERATOR TURBIN GAS DARI ARUS
BERLEBIH DAN *DROP* TEGANGAN GUNA
MENINGKATKAN KEANDALAN OPERASIONAL

Program Studi : Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal

Nama : I Made Dody Permana

NIT : 09 21 009 1 03

Jenis Tugas Akhir : Karya Ilmiah Terapan

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

Surabaya, 3 Desember 2024

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



(ANTONIUS EDY KRISTIYONO, M.Pd)
NIP. 196905312003121001



(ACHMAD DHANY F, S.Pd., M.Pd)
NIP. 198805042024211005

Mengetahui,
Ketua Program Studi
Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal



(AKHMAD KASAN GUPRON, M.Pd)
NIP. 19800517200502103

**PERSETUJUAN SEMINAR
HASIL TUGAS AKHIR**

Judul : RANCANG BANGUN SISTEM PROTEKSI OTOMATIS
PADA GENERATOR TURBIN GAS DARI ARUS
BERLEBIH DAN *DROP* TEGANGAN GUNA
MENINGKATKAN KEANDALAN OPERASIONAL

Program Studi : Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal

Nama : I Made Dody Permana

NIT : 09 21 009 1 03

Jenis Tugas Akhir : Karya Ilmiah Terapan

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

Surabaya, 5 Juli 2025

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I



(ANTONIUS EDY KRISTIYONO, M.Pd)
NIP. 196905312003121001

Dosen Pembimbing II



(ACHMAD DHANY F, S.Pd., M.Pd)
NIP. 198805042024211005

Mengetahui,

Ketua Program Studi

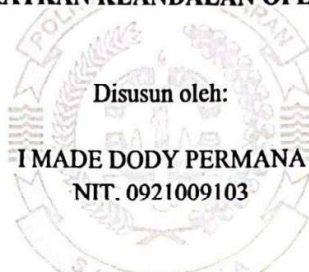
Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal



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

PENGESAHAN
PROPOSAL TUGAS AKHIR
KARYA ILMIAH TERAPAN

**RANCANG BANGUN SISTEM PROTEKSI OTOMATIS PADA GENERATOR
TURBIN GAS DARI ARUS BERLEBIH DAN DROP TEGANGAN GUNA
MENINGKATKAN KEANDALAN OPERASIONAL**



Disusun oleh:

I MADE DODY PERMANA
NIT. 0921009103

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

Surabaya, 8 Januari 2025

Mengesahkan,

Penguji I

(DIANA ALIA, S.T., M.Eng.)
NIP. 199106062019022003

Penguji II

(PRIMA YUDHA YUDIANTO, S.E., M.M.)
NIP. 197807172005021001

Penguji III

(ANTONIUS EDY KRISTYONO, M.Pd.)
NIP. 196905312003121001

Mengetahui,

Ketua Program Studi

Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal

(DIRHAM SYAH, S.E. M.Pd)
NIP. 197504302002121002

PENGESAHAN
LAPORAN TUGAS AKHIR
KARYA ILMIAH TERAPAN

**RANCANG BANGUN SISTEM PROTEKSI OTOMATIS PADA GENERATOR
TURBIN GAS DARI ARUS BERLEBIH DAN DROP TEGANGAN GUNA
MENINGKATKAN KEANDALAN OPERASIONAL**



Disusun oleh:

I MADE DODY PERMANA
NIT. 0921009103

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

Surabaya, 28 Juli 2025

Mengesahkan,

Penguji I

(DIANA ALIA, S.T., M.Eng.)
NIP. 199106062019022003

Penguji II

(PRIMA YUDHA YUDIANTO, S.E., M.M.)
NIP. 197807172005021001

Penguji III

(ANTONIUS EDY KRISTIYONO, M.Pd.)
NIP. 196905312003121001

Mengetahui,
Ketua Program Studi
Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal

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

ABSTRAK

I MADE DODY PERMANA, Rancang Bangun Sistem Proteksi Otomatis Pada Generator Turbin Gas Dari Arus Berlebih dan *Drop* Tegangan Guna Meningkatkan Keandalan Operasional.

Dibimbing oleh Bapak Antonius Edy Kristiyono, M.Pd. dan Bapak Achmad Dhany Fachrudin, S.Pd., M.Pd.

Generator turbin gas memiliki peran penting dalam penyediaan energi listrik, khususnya di sektor pelayaran, namun rentan terhadap gangguan seperti arus berlebih (*overcurrent*) dan penurunan tegangan (*undervoltage*) yang dapat menyebabkan kerusakan peralatan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji sistem proteksi otomatis berbasis mikrokontroler ESP32 dengan sensor INA219 untuk mendeteksi arus dan tegangan, serta relay sebagai pemutus rangkaian. Metode penelitian menggunakan pendekatan eksperimen, meliputi pengujian statis dan dinamis, baik tanpa beban maupun dengan beban lampu AC 5W. Hasil pengujian menunjukkan rata-rata *error* pembacaan sensor sebesar 2,65% untuk arus dan 1,76% untuk tegangan, yang masih dalam batas toleransi $\pm 3\%$. Pada pengujian dinamis dengan beban, sistem mampu memutus beban ketika salah satu parameter melewati ambang batas proteksi. Namun, ditemukan *error* di mana *relay* tidak aktif meskipun tegangan sudah mencapai batas *undervoltage*, yang diduga akibat fluktuasi pembacaan sensor. Kesimpulannya, sistem proteksi otomatis yang dirancang terbukti 85% akurat dan responsif dalam menjaga keandalan operasional generator turbin gas, serta dapat diterapkan sebagai solusi preventif terhadap gangguan kelistrikan.

Kata kunci: Proteksi Otomatis, ESP32, Sensor INA219, *Overcurrent*, *Undervoltage*.

ABSTRACT

I MADE DODY PERMANA, Design and Development of an Automatic Protection System for Gas Turbine Generators Against Overcurrent and Voltage Drop to Enhance Operational Reliability.

Supervised by Mr. Antonius Edy Kristiyono, M.Pd. and Mr. Achmad Dhany Fachrudin, S.Pd., M.Pd.

The Gas turbine generators play an important role in electricity supply, particularly in the maritime sector, but are vulnerable to disturbances such as overcurrent and undervoltage, which can cause equipment damage. This study aims to design and test an automatic protection system based on an ESP32 microcontroller with an INA219 sensor to detect current and voltage, and a relay as a circuit breaker. The research method employs an experimental approach, including both static and dynamic testing, with and without a 5W AC lamp load. The test results show that the average sensor reading error is 2.65% for current and 1.76% for voltage, which is still within the $\pm 3\%$ tolerance limit. In the dynamic testing with load, the system is capable of disconnecting the load when one of the parameters exceeds the protection threshold. However, an error was found where the relay was not activated even though the voltage had reached the undervoltage limit, which is suspected to be due to sensor reading fluctuations. In conclusion, the designed automatic protection system has proven to be 85% accurate and responsive in maintaining the operational reliability of the gas turbine generator, and it can be applied as a preventive solution to electrical disturbances.

Keywords: *Automatic Protection, ESP32, INA219 Sensor, Overcurrent, Undervoltage.*

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, penulis bersyukur atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga dapat menyelesaikan Karya Ilmiah Terapan berjudul:

“RANCANG BANGUN SISTEM PROTEKSI OTOMATIS PADA GENERATOR TURBIN GAS DARI ARUS BERLEBIH DAN *DROP* TEGANGAN GUNA MENINGKATKAN KEANDALAN OPERASIONAL”

Dengan segala kerendahan hati, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Moejiono, M.T., M.Mar.E. selaku Direktur Politeknik Pelayaran Surabaya yang telah mendukung serta memberi semangat dalam penyusunan Karya Ilmiah Terapan.
2. Bapak Dirhamsyah, S.E., M.Pd. selaku Ketua Prodi Diploma IV TRKK di Politeknik Pelayaran Surabaya yang telah membimbing kami dalam penyusunan Karya Ilmiah Terapan.
3. Bapak Antonius Edy Kristiyono, M.Pd. dan Bapak Achmad Dhany Fachrudin, S.Pd., M.Pd. selaku dosen pembimbing yang selalu meluangkan waktu dalam memberikan bimbingan serta semangat dalam penulisan Karya Ilmiah Terapan.
4. Kedua orang tua Bapak I Nengah Narita dan Ibu Nyoman Wiyati yang telah memberikan dukungan, motivasi dan semangat dalam menyelesaikan karya ilmiah ini.
5. *Last but not least, I wanna thank me, I wanna thank me for believing in me, I wanna thank me for doing all this hard work, I wanna thank me for having no days off, I wanna thank me for never quitting, I wanna thank me for always being a giver and tryna give more than I receive, I wanna thank me for tryna do more right than wrong, I wanna thank me for just being me at all times.*

Dengan segala kerendahan hati, penulis mengakui bahwa Karya Ilmiah Terapan ini masih memiliki banyak kekurangan. Untuk itu, kritik dan saran yang konstruktif sangat diharapkan sebagai bahan penyempurnaan karya ini selanjutnya.

Surabaya, 28 Juli 2025

I MADE DODY PERMANA
NIT. 0921009103

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
PERSETUJUAN UJI KELAYAKAN.....	iii
PERSETUJUAN SEMINAR HASIL	iv
PENGESAHAN PROPOSAL	v
PENGESAHAN LAPORAN LAPORAN AKHIR.....	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	3
C. Batasan Masalah.....	4
D. Tujuan Penelitian.....	4
E. Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
A. Review Penelitian Sebelumnya.....	6
B. Landasan Teori	7

BAB III METODE PENELITIAN	33
A. Jenis Penelitian.....	33
B. Perancangan Sistem	33
C. Model Perancangan Alat	35
D. Rencana Pengujian Uji Coba Produk.....	38
BAB IV HASIL PENELITIAN	42
A. Pengujian Statis.....	42
B. Pengujian Dinamis	47
C. Analisis Data	54
BAB V PENUTUP.....	58
A. Simpulan	58
B. Saran.....	58
DAFTAR PUSTAKA.....	60
LAMPIRAN.....	62

DAFTAR TABEL

Tabel. 2.1. Beberapa penelitian terkait	6
Tabel. 4.1. Pengujian Sensor Arus dengan Multimeter	43
Tabel. 4.2. Pengujian Sensor Tegangan dengan Multimeter	44
Tabel. 4.3. Hasil Pengujian Sistem Proteksi	48
Tabel. 4.4. Data Pengujian 1 dengan Beban Lampu	52
Tabel. 4.5. Data Pengujian 2 dengan Beban Lampu	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar. 2.1. Generator	8
Gambar. 2.2. Generator Turbin Gas	10
Gambar 2. 3 Dinamo DC	13
Gambar. 2.4. Mikrokontroler ESP32	13
Gambar. 2.5. Sensor INA219	14
Gambar. 2.6. Relay	15
Gambar. 2.7. LCD	15
Gambar. 2.8. Modul Step Down LM2596.....	16
Gambar. 2.9. MCB DC.....	17
Gambar. 2.10. Pilot LED.....	18
Gambar. 2.11. <i>Keypad</i>	19
Gambar. 2.12. Kompresor	20
Gambar. 2.13. Fitting Inverter DC to AC.....	21
Gambar. 3.1. Blok Diagram Rancangan.....	34
Gambar. 3.2. Software Arduino IDE.....	35
Gambar. 3.3. <i>Flowchart</i> Rancangan.....	36
Gambar. 3.4. <i>Software Fritzing</i>	37
Gambar. 4.1. Pengujian ESP32	42
Gambar. 4.2. Pengujian Sensor Arus dengan Multimeter	43
Gambar. 4.3. Grafik Perbandingan Sensor Arus dengan Multimeter.....	43
Gambar. 4.4. Pengujian Sensor Tegangan dengan Multimeter	44
Gambar. 4.5. Grafik Perbandingan Sensor Tegangan dengan Multimeter.....	45
Gambar. 4.6. Pengujian LCD	45
Gambar. 4.7. Pengujian <i>Relay</i>	46
Gambar. 4.8. Panel Sistem Secara Keseluruhan	47
Gambar. 4.9. Prototipe Secara Keseluruhan.....	47
Gambar. 4.10. Pengujian dengan Beban Lampu	50
Gambar. 4.11. Grafik Perbandingan Tegangan Uji 1 dan Tegangan Uji 2	56
Gambar 4. 12 Grafik Perbandingan Tegangan Uji 1 dan Tegangan Uji 2.....	57

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran. 1.1. Coding Software Program	62
--	----

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Generator turbin gas adalah komponen vital dalam sistem kelistrikan industri dan pelayaran yang menyediakan pasokan listrik stabil. Namun, operasionalnya rentan terhadap gangguan seperti arus berlebih atau *overcurrent* dan penurunan tegangan atau *voltage drop*. Penurunan tegangan, yang terjadi ketika tegangan di sisi penerima lebih rendah dari sisi sumber (Wahyudianto et al., 2021), dapat menurunkan kualitas daya dan menaikkan arus listrik. Jika penurunan tegangan ini melampaui batas toleransi, peralatan listrik dapat beroperasi secara tidak efisien atau bahkan rusak (Asy'ari, 2020). Oleh karena itu, penelitian dalam tugas akhir ini berfokus pada analisis penurunan tegangan pada sistem kelistrikan kapal untuk mencegah kerusakan pada motor listrik.

Menurut standar IEC (International Electrotechnical Commission), *overcurrent* didefinisikan sebagai aliran arus listrik yang melebihi batas nominal yang dirancang untuk sebuah sistem listrik atau perangkat tertentu, baik karena kelebihan beban atau *overload* maupun gangguan seperti *short circuit*. Kondisi ini dapat muncul karena berbagai faktor, seperti perubahan beban yang tiba-tiba, misalnya, saat peralatan besar seperti bow thruster dioperasikan secara bersamaan, kegagalan mekanis, atau kerusakan komponen internal generator. Jika *overcurrent* tidak ditangani dengan baik, dapat menyebabkan panas berlebih, kerusakan isolasi, bahkan kebakaran di ruang mesin. Untuk mencegah risiko ini, generator pada kapal biasanya dilengkapi dengan sistem proteksi

berbasis standar IEC, termasuk Relay overcurrent dan circuit breaker yang secara otomatis memutus aliran listrik jika arus melebihi ambang batas. Sistem proteksi ini juga memastikan kontinuitas operasi dengan mendeteksi dan menangani gangguan sebelum terjadi kerusakan parah, sehingga menjaga keandalan sistem kelistrikan kapal.

Untuk mewujudkan tujuan tersebut, diperlukan sebuah prototipe yang dapat mensimulasikan respons cepat terhadap perubahan arus dan tegangan secara efisien. Ide untuk membuat prototipe ini muncul setelah penulis membaca jurnal penelitian tentang prototipe sistem proteksi arus dan suhu berlebih pada motor DC (Bagus S. & Sri Mulyanto H., 2024). Berbeda dengan penelitian sebelumnya, pada penelitian ini penulis menambahkan sensor tegangan dan relay sebagai pemutus aliran listrik dengan menambahkan beban berlebih pada prototipe dan clampmeter sebagai alat perbandingan sensor dalam pengujian.

Penggunaan teknologi berbasis mikrokontroler telah membuka peluang baru dalam pengembangan sistem proteksi yang lebih canggih dan efisien. Dengan memanfaatkan sensor arus INA219, sistem ini mampu memantau parameter listrik secara real-time dan memberikan respons otomatis jika terjadi kondisi abnormal. Mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali memproses data dari sensor dan mengaktifkan mekanisme proteksi jika parameter listrik melebihi batas aman yang telah ditentukan. Hal ini tidak hanya meningkatkan keamanan operasional generator tetapi juga memperpanjang umur perangkat dengan mencegah kerusakan yang disebabkan oleh gangguan listrik.

Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan suatu sistem proteksi otomatis untuk generator turbin gas. Fokus utama adalah integrasi perangkat sensor yang reliabel, di mana parameter keandalan ditentukan oleh akurasi data arus dan tegangan dibandingkan dengan pengukuran manual. Sistem yang dikembangkan ini diproyeksikan sebagai solusi inovatif untuk mengatasi gangguan overcurrent dan drop voltage, khususnya di lingkungan maritim. Dengan demikian, implementasi alat proteksi ini diharapkan dapat meningkatkan reliabilitas operasional generator, serta mendukung efisiensi dan keselamatan kerja secara berkelanjutan.

Berdasarkan uraian diatas, maka penulis mengangkat judul: “RANCANG BANGUN SISTEM PROTEKSI OTOMATIS PADA GENERATOR TURBIN GAS DARI ARUS BERLEBIH DAN DROP TEGANGAN GUNA MENINGKATKAN KEANDALAN OPERASIONAL”.

B. Rumusan Masalah

Mengacu pada latar belakang yang telah dipaparkan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perancangan sistem proteksi arus berlebih dan *drop* tegangan pada generator turbin gas?
2. Bagaimana kinerja dan keandalan sistem proteksi tersebut ditinjau dari akurasi pembacaan arus dan tegangan serta respons *relay* pada pengujian prototipe, termasuk ketika generator diberi beban lampu sebagai simulasi kondisi pembebanan nyata?

C. Batasan Masalah

Untuk menjaga agar pembahasan tetap fokus dan terarah, maka ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada aspek-aspek berikut:

1. Penelitian difokuskan pada sistem proteksi pada generator turbin untuk mendeteksi kondisi arus berlebih dan *drop* tegangan.
2. Menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemrosesan utama
3. Sensor INA219 untuk mendeteksi arus dan tegangan.
4. Keandalan dengan tingkat akurasi data arus dan tegangan dari pembacaan secara manual dengan *error* relatif.

D. Tujuan Penelitian

1. Untuk menghasilkan rancangan sistem proteksi arus berlebih dan *drop* tegangan pada generator turbin gas.
2. Untuk menguji dan mengevaluasi kinerja serta keandalan sistem proteksi yang dirancang meliputi akurasi pembacaan arus dan tegangan, dan respons *relay* melalui pengujian prototipe baik tanpa beban maupun dengan beban lampu sebagai simulasi kondisi pembebanan nyata pada sistem kelistrikan generator.

E. Manfaat Penelitian

Dari penelitian ini, manfaat yang diharapkan oleh penulis diantaranya:

1. Manfaat teoritis

Secara teoritis, penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan dalam bidang teknologi sistem proteksi

generator, khususnya pada generator turbin gas. Dengan mengintegrasikan mikrokontroler, penelitian ini menambah wawasan mengenai aplikasi teknologi terkini dalam mengatasi permasalahan operasional yang kompleks. Selain itu, penelitian ini dapat menjadi referensi ilmiah bagi pengembangan lebih lanjut terkait desain sistem proteksi otomatis, baik dalam konteks akademis maupun industri, yang mengutamakan efisiensi dan keandalan.

2. Manfaat praktis

Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat diterapkan secara langsung dalam industri pelayaran maupun sektor lainnya yang menggunakan generator turbin gas. Sistem proteksi otomatis yang dirancang mampu mendeteksi dan menangani gangguan arus berlebih dan penurunan tegangan secara *real-time*, sehingga dapat mencegah kerusakan dan meningkatkan keandalan operasional generator.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Review Penelitian Sebelumnya

Tabel. 2.1. Beberapa penelitian terkait
Sumber: Jurnal Penelitian

No	Penulis	Judul Penelitian	Kesimpulan
1.	Bagus Saefulloh & Sri Mulyanto H (2024)	Rancang Bangun Sistem Proteksi Pada Motor DC Dari Gangguan Arus Dan Suhu Berlebih Berbasis <i>Internet Of Things</i>	Sistem ini menggunakan ACS712 untuk arus, DS18B20 untuk suhu, ESP32 sebagai mikrokontroler, dan aplikasi Blynk untuk monitoring real-time via WiFi. Saat terjadi gangguan, sensor memicu mosfet untuk memutus arus dan mematikan motor DC.
2.	Ahmad Hendrawan, Muhammad Hasbi, & Noor Rahman (2022)	Simulasi <i>Safety Device Overheat</i> Generator Set <i>Engine</i> Berbasis Arduino	Simulasi <i>safety device overheat</i> pada genset berbasis Arduino menggunakan komponen seperti Arduino Uno, sensor suhu DS18B20, dan modul <i>relay</i> . Alat ini memantau suhu <i>coolant</i> , mengaktifkan <i>buzzer</i> saat suhu mencapai 45°C, dan memutus arus ke motor DC pada suhu 50°C untuk menghentikan operasi mesin.
3.	Hendro Widiarto (2023)	Rancangan <i>Mock Up</i> Sistem Monitoring Panel Tegangan Rendah Berbasis <i>Transmission Control Protocol / Internet Protocol</i> (Tcp/Ip)	Sistem otomatis ini secara kontinu mengirimkan data arus dan tegangan, memungkinkan teknisi memantau kondisi secara <i>real-time</i> . Data tersebut juga dapat diakses melalui website, mempermudah pengawasan dan respons terhadap gangguan.
4.	Agus Kiswantono, Hasti Afianti, Saidah, dan Bambang Purwahyudi (2024)	Proteksi Tegangan Berbasis IoT: Sistem Monitoring Cerdas dan Responsif	Sistem proteksi tegangan berbasis IoT dengan <i>Over Voltage Relay</i> (OVR) dan aplikasi Blynk terbukti efektif dalam memantau tegangan dan arus. Meski terdapat perbedaan hasil antara OVR dan Blynk, sistem ini tetap andal, dan penyesuaian lebih lanjut dapat meningkatkan keselarasan data untuk stabilitas yang lebih baik.

B. Landasan Teori

1. Pembangkitan Energi Listrik

Energi listrik dapat didefinisikan sebagai energi yang timbul dari aliran muatan listrik melalui suatu konduktor, di mana aliran ini terjadi akibat adanya perbedaan potensial atau tegangan. Dalam sebuah sistem pembangkitan, energi listrik dihasilkan dengan cara mengubah energi mekanik menggunakan perangkat yang disebut generator. Menurut Supari Muslim dkk. (2009), salah satu metode yang paling banyak digunakan adalah dengan memutar generator sinkron untuk menghasilkan tenaga listrik berupa arus bolak-balik tiga fasa.

2. Tegangan dan Arus Listrik

a. Tegangan Listrik (*Voltage*)

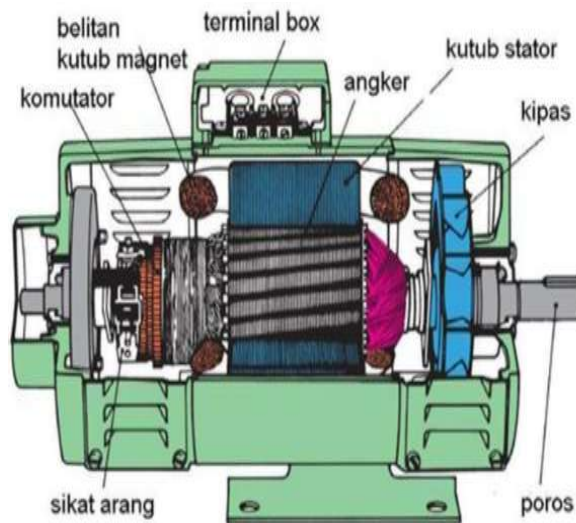
Tegangan listrik, atau beda potensial, adalah ukuran energi listrik yang mendorong aliran muatan listrik dalam sebuah rangkaian. Tegangan diukur dalam satuan volt (V). Dalam generator, tegangan dihasilkan akibat pergerakan konduktor dalam medan magnet yang berubah-ubah, sesuai dengan hukum induksi elektromagnetik *Faraday*.

b. Arus Listrik (*Current*)

Arus listrik adalah aliran muatan listrik yang mengalir melalui penghantar. Arus diukur dalam satuan ampere (A). Dalam generator, arus dihasilkan saat tegangan yang cukup diterapkan pada rangkaian tertutup, sehingga muatan listrik dapat mengalir.

3. Generator

Generator adalah perangkat yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik. Generator dapat menggunakan berbagai sumber energi, seperti diesel, gas, atau tenaga surya, dan menghasilkan arus bolak-balik (AC) atau arus searah (DC). Komponen utamanya meliputi *rotor*, *stator*, dan *armature*.



Gambar. 2.1. Generator

Sumber: <https://www.unboxing.eu.org/2013/08/generator-dc.html>

a. Cara Kerja Generator

Ketika kumparan konduktor diputar dalam medan magnet, arus listrik diinduksi di dalam konduktor tersebut. Proses ini didasarkan pada hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik.

- 1) Prinsip Dasar : Medan magnet yang berubah terhadap waktu di sekitar kumparan konduktor menghasilkan tegangan listrik.
- 2) Sumber Energi Mekanis : Bisa berasal dari turbin (air, uap, angin), mesin diesel, atau mesin bensin.

b. Komponen Generator

Generator memiliki dua komponen utama: stator sebagai bagian yang diam dan rotor sebagai bagian yang berputar. Stator terdiri dari rangka motor, belitan, sikat arang, *bearing*, dan *terminal box*. Sementara itu, rotor tersusun atas komutator, belitan, kipas, dan poros.

- 1) Kutub Stator: Menghasilkan medan magnet yang dibutuhkan untuk induksi elektromagnetik.
- 2) Angker (*Armature*): Menghasilkan arus listrik dengan berputar dalam medan magnet.
- 3) Kipas (*Cooling fan*): Mendinginkan komponen-komponen generator agar tidak overheat.
- 4) Poros (*Shaft*): Menghubungkan rotor dengan sumber tenaga penggerak dan mentransfer energi mekanik.
- 5) *Terminal Box*: Tempat sambungan kabel output generator ke beban atau sistem distribusi daya.
- 6) Sikat Arang (*Brushes*): Menyediakan sambungan arus listrik antara komutator dan beban eksternal.
- 7) Belitan Kutub Magnet: Menciptakan medan magnet pada kutub stator untuk induksi listrik.
- 8) Komutator: Membalikkan arah arus listrik dalam generator DC untuk menghasilkan arus searah.

c. Gas Buang

Pada akhir langkah ekspansi, gas dalam silinder mesin masih bertekanan cukup tinggi yaitu 30 sampai 50 psig. Tekanan tinggi inilah yang nantinya digunakan untuk menggerakkan turbin.

4. Generator Turbin Gas

Generator turbin gas menghasilkan listrik dengan memanfaatkan energi mekanik dari turbin gas yang digerakkan oleh gas panas. Proses ini melibatkan kompresi udara, pembakaran bahan bakar, dan penggerakan rotor generator melalui prinsip induksi elektromagnetik. Generator turbin gas memiliki efisiensi tinggi dan daya *output* besar, namun rentan terhadap gangguan seperti *overcurrent* dan *voltage drop*. Oleh karena itu, sistem proteksi yang efektif, seperti *relay* proteksi dan pemutus sirkuit, diperlukan untuk menjaga keandalan operasinya.



Gambar. 2.2. Generator Turbin Gas

Sumber: <https://indonesian.alibaba.com/product-detail/300KW-Small-Pelton-Water-Wheel-Hydro-60489943826.html>

5. Sistem Proteksi

Sistem proteksi adalah susunan peralatan yang direncanakan untuk dapat merasakan, mengukur adanya gangguan dan menentukan letak

gangguan atau mulai mendeteksi adanya ketidaknormalan pada peralatan atau sebagian sistem tenaga listrik dan segera secara otomatis membuka pemutusan beban untuk memisahkan peralatan atau bagian dari sistem yang terganggu dan memberi isyarat berupa lampu, alarm dan lain sebagainya (Agus Kiswantono, dkk, 2024).

a. Proteksi Arus Beban Lebih

Arus Beban lebih pada mesin listrik dapat memicu kenaikan arus yang, jika dibiarkan terlalu lama, berisiko menyebabkan pemanasan berbahaya hingga kerusakan. Untuk mencegah hal ini, dipasang sistem proteksi arus lebih. Sesuai standar PUIL 2000 (5.5.4.1), tujuan utama proteksi ini adalah melindungi motor dan sistem kendalinya dari panas berlebih. Prinsip kerjanya sederhana: sistem akan secara otomatis memutus rangkaian apabila arus yang mengalir terdeteksi melampaui batas aman yang telah diatur sebelumnya (*Iset*).

$I_{\text{beban}} > I_{\text{setting}}$, maka *relay* bekerja (*trip*).

$I_{\text{beban}} < I_{\text{setting}}$, maka *relay* tidak bekerja.

b. Proteksi Drop Tegangan

Salah satu gangguan utama yang menurunkan kualitas daya listrik adalah penurunan tegangan atau *undervoltage*. Fenomena yang umumnya disebabkan oleh sistem perkabelan yang buruk atau beban berlebih atau *overload* ini dapat berdampak serius. Beberapa akibatnya antara lain penurunan efisiensi peralatan terutama jika tegangan turun dibawah 10%, degradasi komponen elektronik, panas berlebih pada motor, hingga kerusakan belitan rotor. Untuk memitigasi risiko tersebut,

diperlukan sistem proteksi menggunakan relai tegangan yang akan memutus rangkaian secara otomatis ketika mendeteksi penurunan tegangan di bawah ambang batas aman yang telah ditentukan.

6. Keandalan Operasional

Keberhasilan sistem proteksi ini ditentukan oleh keandalan sensornya, dengan target eror relatif tidak melebihi $\pm 3\%$ sesuai spesifikasi sensor INA219. Untuk menguji ini, prototipe dianalisis dengan membandingkan hasil pembacaan sensor arus dan tegangan terhadap pengukuran dari alat ukur digital. Perbedaan atau selisih data yang teramati kemudian digunakan untuk menghitung nilai eror relatif menggunakan Persamaan 2.1.

$$\%Error = \frac{\text{Nilai Sebenarnya} - \text{Nilai Terbaca}}{\text{Nilai Sebenarnya}} \times 100\% \dots\dots\dots 2.1$$

Keterangan:

Nilai Sebenarnya = Hasil pembacaan alat ukur digital

Nilai Terbaca = Hasil pembacaan sensor

7. Dinamo DC

Dinamo DC mengonversi energi listrik menjadi mekanik melalui induksi elektromagnetik (Hughes, 2022). Motor ini populer karena torsi yang kuat, kontrol kecepatan yang mudah (Chapman, 2019), dan respons dinamis yang unggul untuk aplikasi presisi (Nasar, 2021). Selain itu, efisiensinya yang tinggi berkat pengaturan medan magnet pada *field winding* membuatnya ideal untuk aplikasi skala menengah hingga besar (Krause et al., 2022).



Gambar 2. 3 Dinamo DC

Sumber: <https://i.pinimg.com/736x/14/70/dd/14731b84599394a5a59.jpg>

8. Mikrokontroler ESP32

Menurut Wag yana dan Rahmad (2021), ESP32 adalah mikrokontroler *System on a Chip* (SoC) yang sangat populer karena harganya terjangkau dan kaya fitur. Perangkat ini sudah memiliki prosesor dual-core, WiFi, dan Bluetooth terintegrasi, serta memori dan pin I/O yang melimpah (tersedia dalam versi 30/36 GPIO). Kemudahan pemrograman via Arduino IDE berkat *port* USB bawaan dan konektivitasnya yang andal menjadikannya sangat ideal untuk berbagai aplikasi *Internet of Things* (IoT).

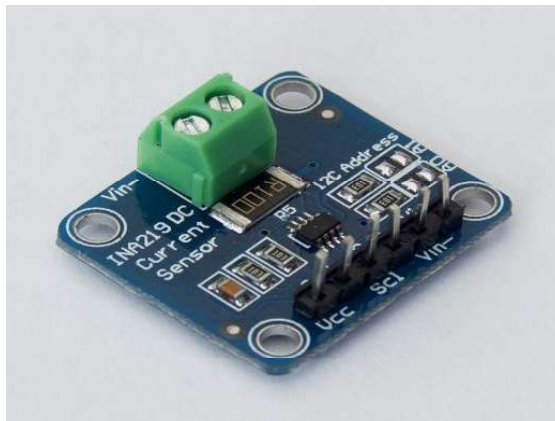


Gambar. 2.4. Mikrokontroler ESP32

Sumber: <https://www.conrad.com/en/p/joy-it-development-board-node-mcu-esp32-modul-1656367.html>

9. Sensor INA219

Sensor INA219 adalah alat untuk mengukur arus, tegangan, dan daya DC. Cara kerjanya dengan membaca selisih tegangan pada resistor kecil (*shunt*) untuk menghitung arus. Sensor ini terhubung ke mikrokontroler seperti Arduino melalui komunikasi I2C. INA219 mampu membaca tegangan hingga 26V dan arus sampai 3,2A dengan error maksimal $\pm 3\%$. Sensor ini banyak digunakan pada sistem monitoring baterai, panel surya, dan proyek IoT karena akurat dan mudah digunakan.



Gambar. 2.5. Sensor INA219

Sumber: <https://en.hwlibre.com/measure-voltage,-current-and-power-with-the-ina219-sensor/>

10. Relay

Relay adalah sebuah saklar otomatis yang bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik. Saat menerima sinyal kontrol bertegangan rendah dari perangkat seperti ESP32, kumparan di dalam relai akan menciptakan medan magnet untuk membuka atau menutup sirkuit daya. Mekanisme ini sangat efektif untuk mengendalikan perangkat berdaya tinggi karena mampu memberikan isolasi elektrik antara sirkuit kontrol dan sirkuit daya,

sehingga dapat mengamankan mikrokontroler dari lonjakan arus atau tegangan yang berpotensi merusak.

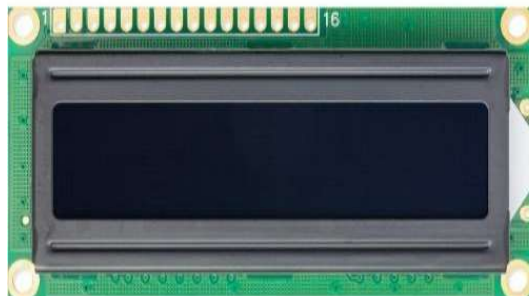


Gambar. 2.6. *Relay*

Sumber: <https://circuitlistadrienne.z13.web.core.windows.net/arduino-and-Relay-module.html>

11. LCD

Liquid Crystal Display (LCD) merupakan komponen penampil visual yang mampu menampilkan beragam data, mulai dari teks, angka, hingga simbol. Kelebihan ini menjadikannya solusi tampilan yang lebih rapi, menarik, dan serbaguna jika dibandingkan dengan LED tujuh segmen. Oleh karena itu, tidak mengherankan jika Muhammad Fiqar dkk (2022) menyatakan bahwa LCD merupakan media keluaran yang paling sering diaplikasikan pada sistem berbasis mikrokontroler.



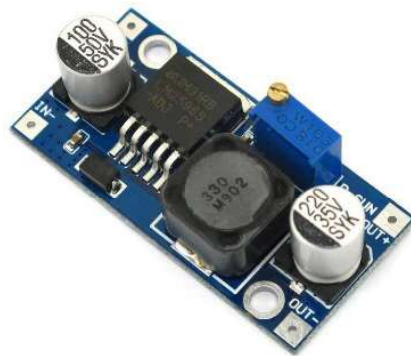
Gambar. 2.7. LCD

Sumber: <https://soldered.com/product/lcd-display-16x2-blue-black/>

12. Modul *Step Down* LM2596

Modul *step down* LM2596 adalah rangkaian catu daya DC-DC buck converter, yang berfungsi menurunkan tegangan *input* (V_{in}) menjadi tegangan *output* (V_{out}) yang lebih rendah dan stabil. IC LM2596 merupakan komponen utama dalam modul ini, yang dirancang untuk efisiensi tinggi dan kemampuan menangani arus hingga 3 ampere.

Modul ini bekerja dengan prinsip *switching regulator*, di mana tegangan diturunkan melalui proses saklar elektronik (MOSFET) yang dikendalikan oleh frekuensi tinggi (biasanya 150 kHz). Dibandingkan dengan *linear regulator*, efisiensi LM2596 jauh lebih tinggi karena energi yang hilang dalam bentuk panas lebih kecil.



Gambar. 2.8. Modul *Step Down* LM2596

Sumber: <https://www.pixelelectric.com/lm2596-dc-dc-buck-converter-step-down-power-module/>

13. MCB DC

MCB (*Miniature Circuit Breaker*) adalah alat proteksi listrik yang berfungsi untuk memutus arus listrik secara otomatis apabila terjadi arus lebih (*overcurrent*) atau hubung singkat (*short circuit*). MCB tipe DC 3A

khusus digunakan pada sistem listrik arus searah (DC) dan dirancang untuk memutus arus bila melebihi 3 ampere.

Fungsi utama MCB DC 3A adalah untuk melindungi perangkat elektronik atau sistem kelistrikan seperti panel surya, baterai, sistem IoT, atau motor DC kecil, dari kerusakan akibat kelebihan arus.



Gambar. 2.9. MCB DC

Sumber: <https://indgosolar.com/product/32a-2-pole-dc-mcb/>

14. Pilot LED

Pilot LED (*Light Emitting Diode*) adalah salah satu jenis indikator cahaya yang digunakan secara luas dalam berbagai aplikasi elektronik, terutama untuk memberikan indikasi visual terkait status operasional perangkat. LED merupakan semikonduktor yang menghasilkan cahaya ketika arus listrik mengalir melaluinya dalam arah tertentu. Mekanisme kerja LED didasarkan pada prinsip elektroluminesensi, di mana elektron dan *hole* atau lubang elektron dalam bahan semikonduktor bergabung di area persimpangan dan memancarkan foton sebagai hasilnya.



Gambar. 2.10. Pilot LED

Sumber: <https://www.yesss.co.uk/eris-22mm-led-pilot-lamp-ip65-amber-110v-acdc>

15. Keypad

Keypad adalah perangkat input berupa kumpulan tombol yang biasa digunakan untuk memasukkan data ke mikrokontroler, salah satunya ESP32. Jenis *Keypad* yang umum digunakan adalah *Keypad* matriks, seperti 4x4 atau 4x3, yang terdiri dari baris dan kolom. Saat tombol ditekan, salah satu baris dan kolom akan saling terhubung, dan sistem akan mendeteksi kombinasi tersebut untuk mengetahui tombol mana yang ditekan. ESP32, sebagai mikrokontroler yang memiliki banyak pin GPIO dan fitur canggih seperti Wi-Fi dan *Bluetooth*, dapat dengan mudah dihubungkan dengan *Keypad* menggunakan pustaka seperti *Keypad.h*. Melalui teknik pemindaian atau *scanning*, ESP32 dapat membaca input tombol secara efisien. Penggunaan *Keypad* pada ESP32 banyak diterapkan dalam sistem kontrol seperti kunci pintu digital, antarmuka pengguna, dan sistem input data karena bersifat sederhana, hemat pin, dan mudah diprogram.



Gambar. 2.11. *Keypad*

Sumber: https://m.media-amazon.com/images/I/71Tht-aj-aL._SL1500_.jpg

16. Kompresor

Kompresor angin adalah alat yang berfungsi untuk mengubah energi mekanik menjadi energi udara bertekanan. Udara bertekanan ini kemudian disalurkan untuk menggerakkan turbin, yang terhubung langsung dengan poros generator. Ketika turbin berputar akibat dorongan udara bertekanan, energi kinetik tersebut diubah oleh generator menjadi energi listrik. Efektivitas sistem ini sangat dipengaruhi oleh tekanan dan aliran udara yang dihasilkan kompresor. Oleh karena itu, pemilihan kompresor dengan kapasitas dan tekanan yang sesuai sangat penting agar turbin dapat berputar stabil dan optimal dalam menghasilkan listrik.



Gambar. 2.12. Kompresor

Sumber: <https://www.blibli.com/p/shark-1-4-hp-lzpm-5114-kompresor-angin-automatic/ps--PDC-25220-00142>

17. *Fitting Inverter DC to AC*

Inverter merupakan perangkat elektronika daya yang berfungsi mengubah tegangan arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) agar dapat digunakan oleh peralatan listrik berbasis AC. *Fitting inverter DC to AC* berperan sebagai penghubung antara sumber DC, seperti baterai atau sistem MPPT, dengan keluaran inverter menuju beban AC. Pemasangan fitting harus memperhatikan tegangan kerja, arus maksimum, serta material konduktor agar tidak menimbulkan rugi daya dan memastikan keselamatan sistem. Selain itu, proteksi tambahan seperti sekering atau MCB umumnya dipasang di titik ini untuk menghindari kerusakan akibat arus berlebih. Dalam penelitian ini, *fitting inverter* digunakan untuk menghubungkan keluaran inverter ke beban lampu, sehingga sistem proteksi dapat diuji pada kondisi pembebanan nyata.



Gambar. 2.13. Fitting Inverter DC to AC

Sumber: <https://blogger.googleusercontent.com/img/b/R29vE01.jpg>

BAB III

METODE PENELITIAN

A. Jenis Penelitian

Metodologi yang diterapkan dalam penyusunan karya ilmiah terapan ini adalah metode eksperimen. Pendekatan ini digunakan dengan tujuan mengembangkan sebuah produk, baik yang baru maupun hasil peningkatan, serta untuk mengevaluasi efektivitas dari produk tersebut melalui pengujian.

Mengacu pada Sugiyono (2012: 109), metode penelitian eksperimen adalah pendekatan yang digunakan untuk mengidentifikasi pengaruh dari suatu perlakuan spesifik terhadap objek penelitian dalam kondisi yang terkontrol. Prosesnya melibatkan tindakan peneliti yang secara sengaja memanipulasi suatu perlakuan atau stimulus, untuk kemudian mengamati dan mengukur dampak yang dihasilkan dari manipulasi tersebut.

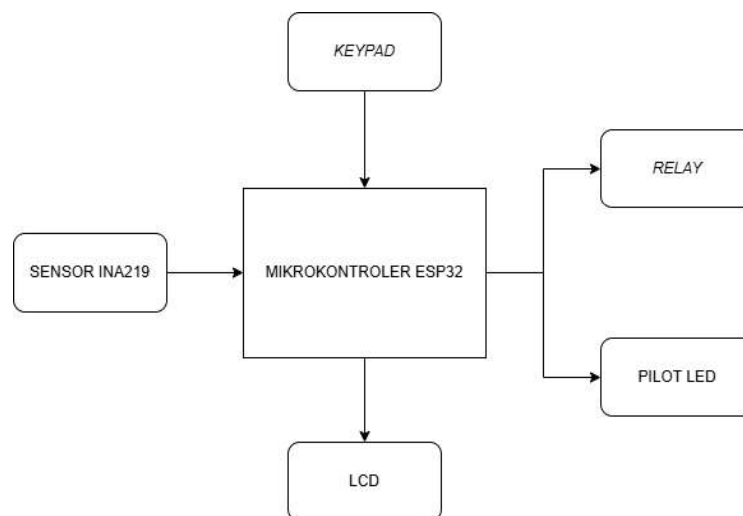
B. Perancangan Sistem

Perancangan sistem yang dibahas dalam penelitian ini terdiri atas dua aspek utama, yakni perangkat keras dan perangkat lunak. Untuk perangkat keras, rancangannya mencakup komponen-komponen krusial seperti mikrokontroler ESP32, sensor INA219, dan LCD. Rincian seluruh perangkat keras dan perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Hardware

a. Mikrokontroler ESP32

- b. Sensor INA219
 - c. LCD
 - d. *Relay*
 - e. Pilot LED
 - f. *Keypad*
2. *Software*
- a. Arduino Ide
 - b. *Flowchart*
 - c. Aplikasi *Fritzing*



Gambar. 3.1. Blok Diagram Rancangan
Sumber: Dokumentasi Penelitian

Keterangan:

1. Mikrokontroler ESP32 digunakan untuk tempat mengatur dan memproses data.
2. Sensor INA219 digunakan untuk mengukur arus dan tegangan.
3. LCD digunakan sebagai perangkat tampilan data.
4. Pilot LED digunakan sebagai indikator operasional alat.

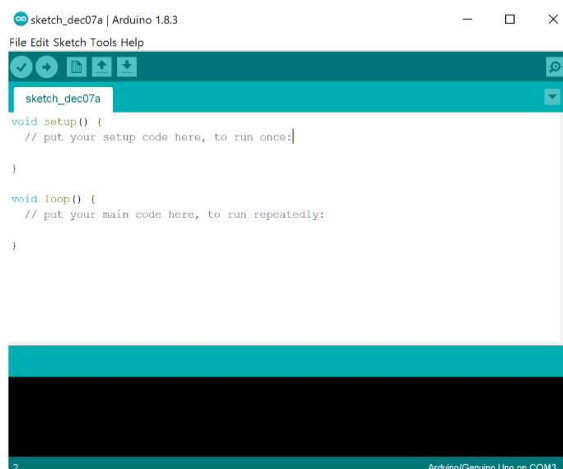
5. *Relay* digunakan sebagai pemutus aliran listrik apabila ada arus berlebih atau tegangan jatuh.
6. *Keypad* digunakan untuk mengatur batas arus & tegangan.

Rancangan seluruh alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada diagram blok yang disajikan pada Gambar 3.1. Diagram tersebut memberikan visualisasi yang jelas mengenai bagaimana setiap komponen saling terhubung dan berinteraksi untuk mencapai tujuan penelitian. Oleh karena itu, untuk memastikan akurasi pembacaan sensor arus dan tegangan, rancangan ini memerlukan proses pengujian secara berkala agar dapat berfungsi secara optimal.

C. Model Perancangan Alat

Perancangan sistem *software* dibagi menjadi tiga bagian, yaitu program *Arduino*, *flowchart* dan aplikasi *Fritzing* yang akan dijelaskan sebagai berikut:

1. Program Arduino IDE



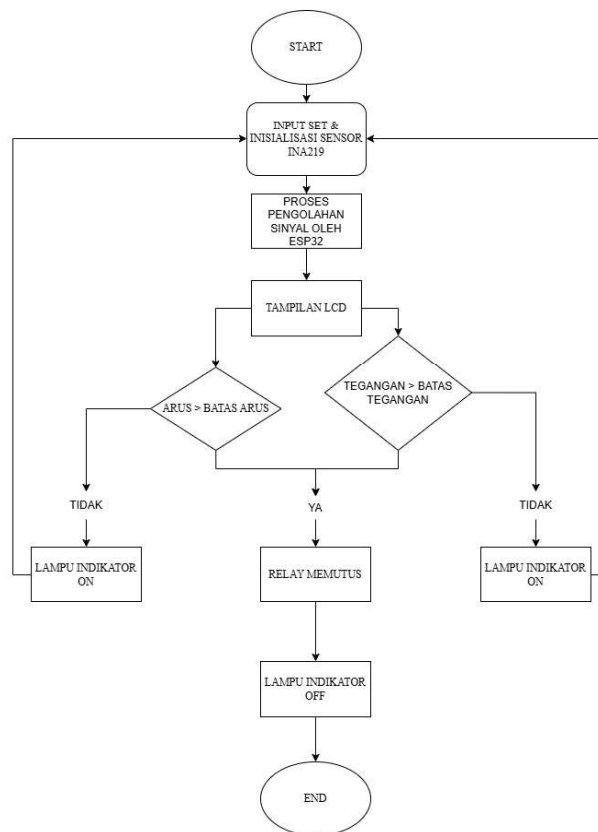
Gambar. 3.2. Software Arduino IDE

Sumber: Dokumentasi Penelitian

Arduino IDE sebagai lingkungan pengembangan perangkat lunak yang dirancang khusus untuk memprogram mikrokontroler Arduino (Banzi dan Shiloh, 2022). Mereka menekankan bahwa Arduino IDE mendukung bahasa pemrograman C/C++ dan menyediakan berbagai pustaka yang memudahkan pengguna dalam mengembangkan proyek-proyek elektronik.

2. *Flowchart*

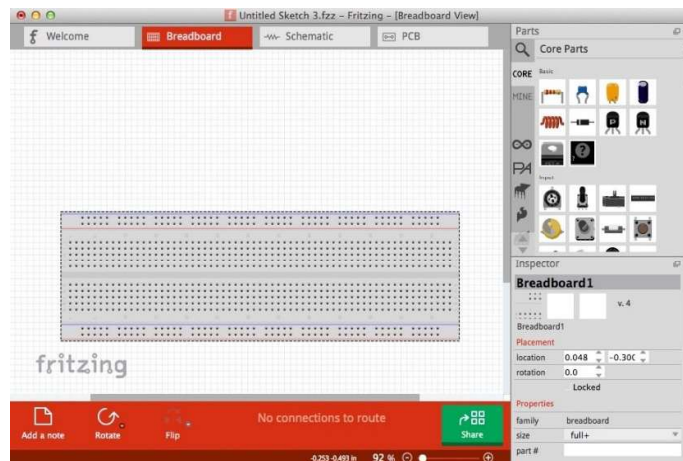
Flowchart pemrogram seperti pada gambar 3.3, dimana program akan dimulai dengan menginisialisasi sensor, setelah menginisialisasi sistem akan aktif, input batas arus & tegangan, apabila arus dan tegangan melebihi batas, maka *Relay* akan memutus aliran listrik dan lampu indikator akan mati.



Gambar. 3.3. *Flowchart* Rancangan
Sumber: Dokumentasi Penelitian

3. *Fritzing*

Fritzing adalah perangkat lunak *open-source* yang mempermudah pembuatan dan dokumentasi prototipe sirkuit elektronik. Dengan *Fritzing*, pengguna dapat merancang rangkaian secara visual menggunakan komponen elektronik grafis, dan membuat diagram breadboard, skematik, serta *layout* PCB. Tersedia untuk Windows, MacOS, dan Linux, *Fritzing* cocok digunakan oleh pemula maupun profesional. Selain itu, *Fritzing* memiliki komunitas pengguna yang luas dan pustaka komponen yang terus diperbarui, serta menyediakan panduan visual untuk membantu memahami penghubungan komponen dalam rangkaian.

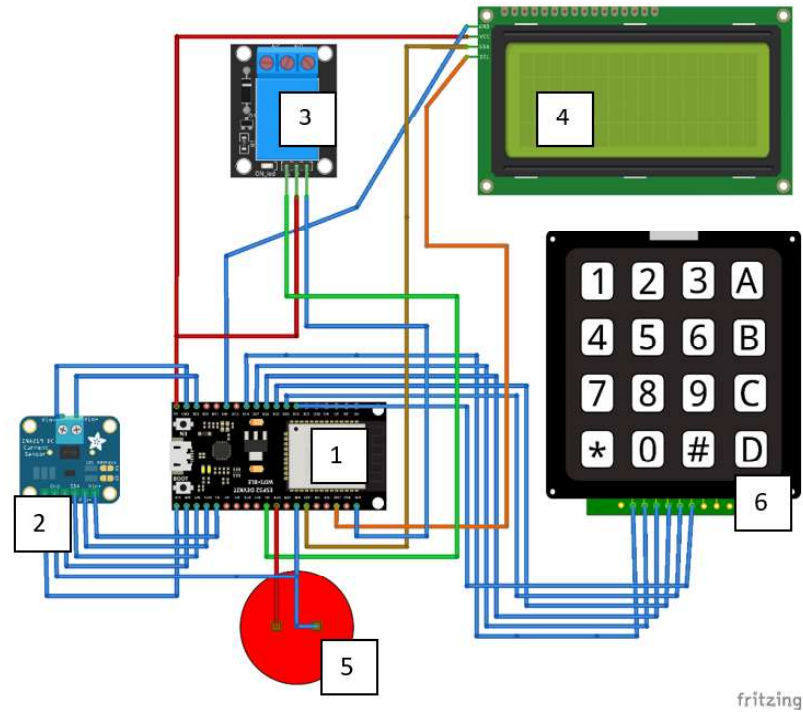


Gambar. 3.4. *Software Fritzing*

Sumber: Dokumentasi Penelitian

4. *Wiring* rangkaian perancangan alat

Penulisan perancangan sistem alat menggunakan aplikasi *Fritzing* untuk membuat rangkaian alat, aplikasi ini menunjang aspek-aspek untuk mendesain secara teknis dan fungsional untuk menciptakan hasil yang sesuai dengan tujuan dan hasil yang ditentukan. Sistematis rangkaian keseluruhan dapat dilihat pada gambar 3.5.



Gambar. 3.5. *Wiring* Rancangan
Sumber: Dokumentasi Penelitian

Keterangan:

- a. Mikrokontroler ESP32
- b. Sensor INA219
- c. *Relay Module*
- d. LCD
- e. *Lamp Indicator*
- f. *Keypad*

D. Rencana Pengujian Uji Coba Produk

1. Waktu dan tempat pengujian

Penelitian dilakukan oleh peneliti pada semester VIII untuk membuat sebuah proyek dan mengumpulkan data penelitian. Lokasi

penelitian dengan judul “RANCANG BANGUN SISTEM PROTEKSI OTOMATIS PADA GENERATOR TURBIN GAS DARI ARUS BERLEBIH DAN DROP TEGANGAN GUNA MENINGKATKAN KEANDALAN OPERASIONAL" dilakukan di Politeknik Pelayaran Surabaya.

2. Pengujian Alat

Untuk memperoleh data penelitian, dilakukan pengujian terhadap alat yang terdiri dari dua metode berikut:

a. Uji Statis

Pengujian dilaksanakan dengan mengevaluasi setiap komponen alat secara terpisah sesuai dengan fungsi dan karakteristik spesifiknya. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa seluruh komponen dapat bekerja secara maksimal dan memenuhi fungsi yang diharapkan. Seluruh hasil dari proses pengujian ini selanjutnya didokumentasikan dalam sebuah tabel.

b. Uji Dinamis

Uji dinamis ini direncanakan dilaksanakan di Poltekpel Surabaya. Seluruh komponen seperti mikrokontroler ESP32, Sensor INA219, *Relay* dan LCD harus diperhatikan dengan cermat. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja alat yang dikembangkan dan mencatat hasil pengukuran dalam tabel. Sebanyak 20 kali uji coba akan dilakukan untuk memastikan akurasi alat tersebut dalam persentase kesalahan.